

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

ВЕСТНИК
Волжской государственной академии
водного транспорта

Выпуск 60

Изд-во ФГБОУ ВО «ВГУВТ»
Н. Новгород, 2019

УДК 33+34+53+62+65+68+81+86+91+93

В 38

В 38 Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. Выпуск 60. – Н. Новгород: Изд-во ФГБОУ ВО «ВГУВТ», 2019. – 244 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.
Воробьев А.В.	д.э.н., проф.	Вычужанин В.В.	д.т.н., проф.
Гаврилов А.И.	д.э.н., проф.	Гирин С.Н.	к.т.н., проф.
Грамузов Е.М.	д.т.н., проф.	Ермаков С.А.	д.ф.-м.н., проф.
Зув В.А.	д.т.н., проф.	Иванов В.М.	к.т.н., проф.
Казаков Н.Н.	к.т.н., доц.	Клементьев А.Н.	д.т.н., проф.
Корнилов Д.А.	д.э.н., проф.	Королев Ю.Ю.	к.э.н., доц.
Костров В.Н.	д.э.н., проф.	Лаврентьева Е.А.	д.э.н., проф.
Мареев Е.А.	д.ф.-м.н., чл.-кор. РАН	Матвеев Ю.И.	д.т.н., проф.
Мясников Е.Н.	д.ф.-м.н., проф.	Никущенко Д. В.	д.т.н., проф.
Озина А.М.	д.э.н., проф.	Плющаев В.И.	д.т.н., проф.
Роннов Е.П.	д.т.н., проф.	Ситнов А.Н.	д.т.н., проф.
Степанов А.Л.	д.т.н., проф.	Удалов О.Ф.	д.э.н., проф.
Уметалиев А.С.	д.э.н., проф.	Уртминцев Ю.Н.	д.т.н., проф.
Федосенко Ю.С.	д.т.н., проф.	Франк Венде	к.т.н., проф.
Хватов О.С.	д.т.н., проф.	Цветков Ю.Н.	д.т.н., проф.

Редакционный совет журнала:

Алексеев В.Я. – Генеральный директор ОАО «Порт Коломна»
Бессмертный Д.Э. – Руководитель ФБУ «Администрация волжского бассейна», к.т.н.
Ежов П.В. – Генеральный директор ООО «Си Тех»
Ефремов Н.А. – Первый заместитель генерального директора ФАУ РРР, д.э.н.
Захаров В.Н. – Советник ректора ФГБОУ ВО «ВГУВТ», д.т.н., профессор, Заслуженный деятель науки и техники Российской Федерации, Почетный работник транспорта России
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
Сазонов И.Г. – заместитель Министра промышленности Нижегородской области
Стопоницкий К.С. – начальник Управления государственного морского и речного надзора Ространснадзора
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

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, 2019

СОДЕРЖАНИЕ

Раздел I

Судостроение, судоремонт и экологическая безопасность судна

Борисов А.М., Пряничников К.Н.

Проектирование конструкции корпуса железобетонных причальных понтонов 11

Бычков В.Я., Грошева Л.С., Плющев В.И.

Область применимости алгоритма удержания судна с колесным движительно-рулевым комплексом на курсе..... 26

Васькин С.В., Леушова И.Е.

Выбор типа и производительности судовых установок для очистки сточных и нефтесодержащих вод танкера-бункеровщика экологического судна, эксплуатируемого на озере Байкал..... 34

Глебов В.В., Блинов В.М., Репин Ф.Ф.

Влияние горячей пластической деформации и термообработки на образование нитридов хрома в стали 05X22AG14H7M 46

Калинина Н.В., Солдаткин О.Б.

Теоретико-экспериментальные исследования влияния состояния ледяного покрова на ходкость судов в условиях продленной навигации..... 52

Наумов В.С., Кочнева И.Б., Демина Е.А.

Аспекты реализации национального проекта «экология» в области утилизации судов 62

Родькина А.В.

Защита от коррозии в составе нагрузки масс судна 68

Грамзуев Е.М., Родькина А.В., Иванова О.А.

Анализ технико-экономических показателей защиты корпусных конструкций судов от коррозии 77

Роннов Е.П., Корепанов А.Э.

Тримараны: состояние и перспективы развития..... 91

Роннов Е.П., Кочнев Ю.А.

Особенности обеспечения эксплуатационных качеств судового якоря 97

Смирнова М.В., Капустин И.А., Глухова В.С., Носова А.Д.

Измерение средних и пульсационных скоростей течений, формируемых восходящим пузырьковым потоком в приповерхностном слое воды в присутствии пленки поверхностно-активного вещества..... 104

Февральских А.В.

Численное исследование аэродинамики бортового ограждения воздушной подушки в составе компоновки экраноплана..... 113

Чебан Е.Ю., Лукина Е.А., Мартемьянова О.В., Кшталтная М.Н.

Оценка сопротивления большегрузного катамарана численными методами 122

Раздел II

Финансовые и учетно-аналитические проблемы современной экономики

Соловьева В.Г.

Системный подход к внедрению инновационных управленческих технологий 135

Раздел III

Экономика, логистика и управление на транспорте

Кегенбеков Ж.К., Керимкулова Д.А.

Анализ современного состояния железнодорожной сети Казахстана 147

Сергеев С.Н., Уртминцев Ю.Н., Железнов С.В., Малышкин А.Г.

Концептуальная модель оценки целесообразности развития воднотранспортных систем на водных путях местного значения 159

Раздел IV

Эксплуатация водного транспорта, судоходство и безопасность судоходства

Бажанкин Ю.В.

Использование тренажера навигационной прокладки в учебном процессе 175

Казаков Н.Н.

Инструментарий моделирования состояния воднотранспортной системы Республики Беларусь в условиях ее инновационного развития 183

Платов А.Ю., Васильева О.Ю.

Анализ применимости методов расчета коэффициента остаточного сопротивления для судов внутреннего плавания при эксплуатационно-экономическом обосновании новых судов 193

Токарев П.Н.

Оценка условий безопасного маневрирования судна при ветре на малых скоростях хода 202

Тимошек Е.С., Маликова Т.Е.

Распределительная модель судов снабжения арктического региона на участке транспортной сети 213

Раздел V

Эксплуатация судового энергетического оборудования

Бурмакин О.А., Малышев Ю.С., Попов С.В., Шилов М.П.

Сравнительный анализ результатов исследований реальной судовой электростанции и ее модели в переходных режимах работы 225

Матвеев Ю.И., Орехов В.А., Храмов М.Ю., Орехов А.В.

Особенности напрессовки облицовок гребных валов 232

Орехов В.А., Лузгин А.С.

Перспективы применения преобразователей вторичной теплоты СЭУ для получения электроэнергии на судах речного и морского флота 237

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

BULLETIN
of the Volga State Academy
of Water Transport

Issue 60

VSUWT publishing house
N. Novgorod, 2019

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

The Editorial Council of the journal

Alekseev V.J. – General Director of JSC «Port Kolomna»
 Bessmertnui D.E. – The head of the FBI «The administration of the Volga basin», Ph.D.
 Ezov P.V. – General Director of «Sea Tech»
 Efremov, NA – First Deputy General Director of the State PPP, Ph.D.
 Zakharov V. N. – Advisor to Rector of Volga State University of Water Transport, Professor, 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
 Sazonov I.G. – Deputy Minister of Industry of Nizhny Novgorod Region
 Stolvitsky K. S. – the head of the Directorate for State of Maritime and River Supervision of Federal Agency for transport supervisiona
 Theodore de Jonge – General Director of «Numeriek Centrum Groningen BV», The Netherlands
 Frank Wende – Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung IFF, Magdeburg, Germany, PhD.
 Shatalov V.V. – General Director of CB «Vympel», Professor

CONTENTS

Section I

Shipbuilding, ship repair, and ecological safety of the ship

Borisov A.M., Prjanichnikov K.N.

The design of the hull construction reinforced concrete mooring pontoons 11

Bychkov V.Y., Grosheva L.S., Plyushchaev V.I.

The field of applicability of the algorithm keep the vessel with wheeled propulsion-steering complex on the course 26

Vas'kin S.V., Leushova I.E.

Selection of type and capacity of ship plants for treatment of waste and oily water tanker-bunker-environmental vessel, operated on Lake Baikal 34

Glebov V.V., Blinov V.M., Repin F.F.

Effect of hot plastic deformation and heat treatment on the process of formation of chromium nitrid in steel 05H22AG14N7M 46

Kalinina N.V., Soldatkin O.B.

Theoretical and experimental studies of the influence of the ice cover state on the ice propulsion of ships 52

Naumov V.S., Kochneva I.B., Dyomina E.A.

Aspects of the implementation of the national project «ecology» in the field of ship recycling 62

Rodkina A.V.

Corrosion protection as structure of a ship mass load 68

Gramuzov E.M., Rodkina A.V., Ivanova O.A.

Analysis of technical and economic indicators of ships hull construction corrosion protection 77

Ronnov E.P., Korepanov A.E.

Trimarans: state and prospects of development 91

Ronnov E.P., Kochnev Y.A.

Features ensure the performance of the ship's anchor 97

Smirnova M.V., Kapustin I.A., Glukhova V.S., Nosova A.D.

Experimental study of mean and pulsation velocities of flows formed by pop-up bubble flow in a near-surface water layer in the presence of a surfactant film 104

Fevralskikh A.V.

Numerical investigation of board seal aerodynamics impact on wing in ground effect vehicle characteristics 113

Cheban Y.Y., Lukina E.A., Olga V.M., Kshtalnaya M.N.

Numerical simulation of the towing tests extra-capacity catamaran 122

Section II

Financial and accounting-analytical problems of the modern economy

Solovyeva V.G.

System approach to the implementation of innovative management technologies 135

Section III

Economics, logistics and transport management

Kegenbekov Z.K., Kerimkulova D.A.

Analysis of the current state of the railway network of Kazakhstan 147

Sergeev S.N., Urtmintsev Y.N., Zheleznov S.V., Malishkin A.G.

Conceptual model of evaluating the vitality of development of water transport systems on waterways of local value 159

Section IV

Operation of water transport, navigation and safety of navigation

Bazhankin Y.V.

Using of navigational plotting simulator for training process 175

Kazakov N.N.

Tool modeling of the condition of the water transportation system of the Republic of Belarus in the conditions of its innovative development 183

Platov A.Y., Vasileva O.Y.

Analysis of the applicability of methods of calculating of the residual resistance coefficients of Inland ships for feasibility study of new ships 193

Tokarev Pavel N.

Estimation of safety maneuvering conditions of the vessel in wind at low speeds 202

Timoshek E.S., Malikova T.E.

Routing model for supply ships operating in the Arctic Region transport network 213

Section V

Operation of ship power equipment

Burmakin O.A., Malyshev Y.S., Popov S.V., Shilov M.P.

Comparative analysis of results of research of the real ship power station and its models in transition operating modes 225

Matveev Y.I., Orekhvo V.A., Khramov M.Y., Orekhvo A.V.

Peculiarities of the forming of facing shaft faces 232

Orekhvo V.A., Luzgin A.S.

Prospects for application of secondary converters heats of seu for producing electric power in ships of the river and navy 237

Раздел I

**Судостроение, судоремонт
и экологическая безопасность судна**



Section I

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

УДК 629.514-033.37/.015.4

Борисов Александр Михайлович, к.т.н., доцент кафедры теории
конструирования инженерных сооружений ФГБОУ ВО «ВГУВТ»,
e-mail: smk@vgavt-nn.ru

Пряничников Константин Николаевич, к.т.н., доцент кафедры теории
конструирования инженерных сооружений ФГБОУ ВО «ВГУВТ»,
e-mail: smk@vgavt-nn.ru

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
образования «Волжский государственный университет водного транспорта»
(ФГБОУ ВО «ВГУВТ»)

603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ КОРПУСА ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ПРИЧАЛЬНЫХ ПОНТОНОВ

Ключевые слова: причальный понтон, плавучий объект, Правила Российского Речного Регистра, конструкция корпуса, железобетон, арматура, общая прочность, местная прочность, изгибающий момент, напряжения, трещиностойкость.

Аннотация. Приводятся результаты проверки соответствия требований Правил Российского Речного Регистра (ПРРР) к конструкции и прочности корпусов причальных понтонов трех типов, построенных фирмой «Marinetek»: M3320BRS, M3315HDS, M2715HDS, выполненных из железобетона. Причальные понтоны стоечного типа, безнаборной конструкции, предназначены для швартовки судов маломерного флота водоизмещением до 200 т, могут использоваться в качестве одиночных причалов или соединяться между собой для формирования плавучих причалов различной длины и конфигурации. Проведено инструментальное обследование рассматриваемых причальных понтонов с определением главных размерений, толщины наружной обшивки, схемы армирования плит обшивки, прочности бетона. Внутреннее пространство понтонов для обеспечения непотопляемости заполнено пенополистиролом. В соответствии с ПРРР выполнены расчеты прочности и трещиностойкости основных связей корпуса трех типов причальных понтонов. Приводятся результаты сопоставления требований ПРРР к элементам конструкции корпуса причальных понтонов, принятых в проекте. Показано, что требования ПРРР по конструкции корпуса, прочности и трещиностойкости причальных понтонов проектов M3320BRS, M3315HDS и M2715HDS для постановки на классификационный учет и присвоения им класса плавучих объектов «Р 1,2 IV» Российского Речного Регистра выполняются.

В последнее время в нашей стране возрос интерес к обустройству акватории водоемов (марин) для швартовки судов маломерного флота (катеров, парусных и моторных яхт). Финская фирма «Marinetek» [1] занимает одно из ведущих мест на рынке проектирования железобетонных причальных понтонов, которые представляют собой плавучие модули, позволяющие использовать их в качестве как отдельного причала, так и компоновать плавучие причалы разной формы в зависимости от размеров акватории и количества швартующихся маломерных судов. На российском рынке «Marinetek» действует в лице ЗАО «Маринетек СПб». В Санкт-Петербурге также имеются фирмы «ПОНТОН», «Морской бриз» и др., которые ведут строительство железобетонных причальных понтонов по проектным разработкам фирмы «Marinetek» и др. Проектированию яхтенных марин уделяется много внимания в нашей стране и за рубежом [2,3,4,5,6,7,8]. Пример формирования плавучего причала из железобетонных модулей приведен на рис. 1.



Рис. 1. Пример формирования яхтенной марины

Фирма ООО «Скортекс» приобрела у иностранного поставщика без соответствующих документов причальные железобетонные понтоны финской фирмы «Marinetek» [1] следующих модификаций: волнорез М3320BRS (тип 1), М3315HDS (тип 2), М2715HDS (тип 3), предназначенные для эксплуатации в Пестовском водохранилище разряда «Р», расположенном в Московской области (рис. 2).



Рис. 2. Общий вид причальных понтонов в Пестовском водохранилище

Поскольку фирма «Скортекс» приобрела уже построенные понтоны, то в соответствии с техническим заданием для постановки указанных понтонов на классификационный учет Российского Речного Регистра (РРР) в ходе выполнения технического проекта на кафедре теории конструирования инженерных сооружений ФГБОУ ВО «ВГУВТ» проверялось соответствие конструкции корпуса и принятых размеров связей трех типов железобетонных понтонов требованиям Правил Российского Речного Регистра (ПРРР) [9, 10] к плавучим объектам класса «Р1,2 IV» с учетом отсутствия на них постоянных членов экипажа и при временном пребывании людей (посетителей).

Тип каждого понтона – стоечный плавучий причальный понтон с корпусом безнаборной конструкции, при которой наружная обшивка, настил палубы и поперечные переборки выполнены из железобетона. Форма корпуса – прямоугольный параллелепипед без подъема днища в оконечностях.

Назначение каждого понтона (плавучего объекта) – причальный понтон, предназначенный для швартовки судов маломерного флота (катера, яхты) водоизмещением до 200 т. При этом понтоны, по желанию заказчика, могут использоваться в качестве одиночных причалов или соединяться между собой для формирования плавучих причалов различной длины и конфигурации. Для этого в оконечностях каждого понтона со стороны транцев около борта имеются устройства для возможного соединения с помощью шпилек причальных понтонов между собой при формировании плавучего причала. В соответствии с техническим заданием понтоны рассматривались в качестве

ве одиночных причалов. В корпусе каждого понтона также установлены две поперечные переборки в районе размещения клюзов элементов амортизирующей системы «Seaflex», используемой для закрепления каждого понтона на месте. Общий вид и основные элементы конструкции рассматриваемых причальных понтонов приведены на рис. 3.

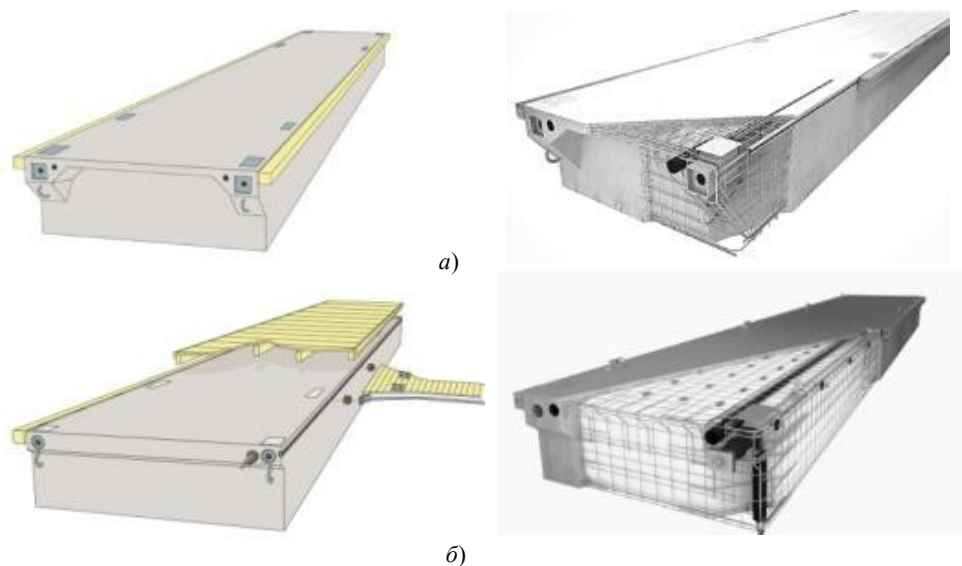


Рис. 3. Общий вид и основные элементы конструкции причальных понтонов:
а – тип 1 (M3320BRS); б – тип 2 (M3315HDS) и тип 3 (M2715HDS)

На основании выполненного специалистами университета обследования корпусов понтонов (рис. 4) подтверждаются заявленные «Marinetek» [1] технические характеристики (табл. 1), схемы армирования и прочность бетона рассматриваемых причальных понтонов.



Рис. 4. Обследование схемы армирования причальных понтонов

Таблица 1

Технические характеристики причальных понтонов по результатам обследования

Характеристики	Тип причального понтона		
	тип 1 (M3320BRS)	тип 2 (M3315HDS)	тип 3 (M2715HDS)
Длина по расчетной ватерлинии $L_{вл}$, м	19,32	14,68	14,68
Длина габаритная $L_{гб}$, м	19,90	14,92	14,92
Ширина по расчетной ватерлинии $B_{вл}$, м	3,00	3,00	2,40
Ширина наибольшая $B_{нб}$, м	3,30	3,30	2,70
Высота борта H , м	1,00	0,85	0,85
Надводный борт в грузу $h_{гр}$, м	0,25	0,27	0,27
Осадка по расчетную ватерлинию $T_{вл}$, м	0,75	0,58	0,58
Водоизмещение в грузу D (при осадке $T_{вл}$), кН	426	250	200
Надводный борт порожнем $h_{п}$, м	0,54	0,44	0,43
Осадка порожнем $T_{п}$, м	0,46	0,41	0,42
Масса понтона порожнем $M_{п}$, т	26,4	18,1	15,0
Водоизмещение порожнем $D_{п}$, кН	262	178	147
Полезная нагрузка (условный груз) Q_y , кН	164	72	53
Коэффициент общей полноты δ	1,00	1,00	1,00
Предельная местная нагрузка на палубу p , кН/м ²	5,0	5,0	5,0

Толщина плит, армирование и защитный слой бетона при обследовании сотрудниками ФГБОУ ВО «ВГУВТ» наружной обшивки, настила палубы и поперечных переборок определены путем местного разрушения бетона с последующим его восстановлением. Прочность бетона в соответствии с ГОСТ 22690-2015 определялась неразрушающим методом с помощью прибора «ОНИКС-2.5», шаг арматуры – прибора «ПОИСК-2.5». Толщина плит наружной обшивки, настила палубы и поперечных переборок соответствует требованиям ПРПП [9] для железобетонных судов безнаборной конструкции при длине менее 30 м. Соотношения главных размерений понтонов, принятых в проекте и в соответствии с требованиями ПРПП [9], выполняются и приведены в табл. 2.

Таблица 2

Соотношения главных размерений причальных понтонов

Тип понтона	Главные размерения, м			Соотношение главных размерений			
	L	B	H	L/H		B/H	
				ПРПП [9]	проект	ПРПП [9]	проект
тип 1 (M3320BRS)	19,32	3,00	1,00	40	19,32	7	3,00
тип 2 (M3315HDS)	14,68	3,00	0,85	40	17,27	7	3,52
тип 3 (M2715HDS)	14,68	2,40	0,85	40	17,27	7	2,82

Предполагаемые условия эксплуатации – стоянка причальных понтонов у специального оборудованного берега с использованием питания с берега в условиях водных бассейнов разряда «Р» с высотой волны не более 1,2 м. В конструкции каждого понтона предусмотрены продольные каналы для размещения водопровода и кабельных трасс, а также специальная «рельса» по борту для крепления к понтону швартовых «пальцев», обеспечивающих швартовку судов маломерного флота.

Внутреннее пространство корпуса понтонов полностью заполнено пенополистиролом, что исключает возможность проникновения воды при получении пробоин железобетонной обшивкой и обеспечивает непотопляемость и аварийную остойчивость судна при эксплуатации.

Проектируемые плавучие понтоны являются беспалубными, закрытого типа, без надстроек, полностью исключают доступ внутрь корпуса. По всему периметру каждого понтона устанавливается привальный брус, который может разрезаться в местах крепления швартовных «пальцев» и других понтонов.

Класс бетона по прочности на сжатие для плит наружной обшивки понтонов по результатам исследования с помощью прибора «ОНИКС–2.5» составляет не ниже В45, поэтому в расчетах для железобетонной обшивки корпуса и поперечных переборок принят тяжелый бетон класса В45 в соответствии с ОСТ 5.9267-87.

Для армирования корпусов причальных понтонов используется стержневая арматура периодического профиля класса А-III (А400) по ГОСТ 5781-82.

Расчетные характеристики материалов, принятые в расчетах прочности по результатам обследования понтонов и на основании требований ПРРР [9], приведены в табл. 3.

Таблица 3

Расчетные характеристики материалов причальных понтонов

Наименование характеристики	Расчетное значение
1. Бетон тяжелый класса В45:	
1.1. Сжатие осевое (призменная прочность) $R_{пр}$, МПа	47,1
1.2. Растяжение осевое R_p , МПа	3,53
1.3. Начальный модуль упругости E_6 , МПа	39200
2. Арматура класса А-III (А400):	
2.1. Предел текучести R_{eH} , МПа	390
2.2. Модуль упругости E_a , МПа	200000
3. Коэффициент приведения бетона к арматуре $\alpha = E_6/E_a$	0,196
4. Расчетная массовая плотность:	
4.1. Бетон ρ_b , т/м ³	2,40
4.2. Железобетон $\rho_{жб}$, т/м ³	2,55
4.3. Сталь ρ_c , т/м ³	7,85

Расчеты общей и местной прочности проектируемых причальных понтонов выполнены в соответствии с требованиями нормативных документов [9,10,11,12,13,14]. Общие изгибающие моменты на тихой воде $M_{т.в.}$ найдены с помощью программы «WINRAVNUS» (согласованной РРР) для трех вариантов нагружения каждого понтона:

- судно порожнем;
- судно в полном грузу при переносе 5% общего количества полезной нагрузки судна из оконечностей в среднюю часть;
- судно в полном грузу при переносе 5% общего количества полезной нагрузки из средней части судна в оконечности.

Составлена весовая нагрузка для каждого понтона. Поскольку причальные понтоны являются стоечными плавучими объектами, без надстройки, эксплуатирующимися у берега без экипажа, то для каждого понтона для состояния «в грузу» рассматривается условная нагрузка (временные посетители, случайный незначительный груз причаливающих судов и пр.).

Изгибающие моменты определены с учетом действия дополнительного волнового момента, найденного по программе «MDV» (согласованной PPP) для класса «Р». Расчетные изгибающие моменты и перерезывающие силы причальных понтонов приведены в табл. 4.

Плиты палубы и днища понтонов с учетом действующей нагрузки в районе ДП армированы одной арматурной сеткой по растянутой зоне бетона. Такое армирование является отступлением от ПРРР [9], но в расчетах прочности показано, что прочность в расчетных сечениях достаточна.

Таблица 4

Расчетные изгибающие моменты и перерезывающие силы причальных понтонов

Тип понтона	Состояние нагрузки	Изгибающие моменты, кН·м			Расчетная перерезывающая сила Q , кН	Осадка средняя T , м
		на тихой воде $M_{тв}$	дополнительный волновой $M_{дв}$	расчетный M		
тип 1 (M3320BRS)	прогиб	31,0	-300	-269	69,0	0,75
	перегиб	59,0	300	359	71,0	0,75
тип 2 (M3315HDS)	прогиб	15,0	-200	-185	58,0	0,58
	перегиб	21,0	200	221	58,0	0,58
тип 3 (M2715HDS)	прогиб	9,0	-200	-191	61,0	0,58
	перегиб	15,0	200	215	62,0	0,58

Арматура плит в соответствии с требованиями Регистра [9,10,12,13] располагается в шахматном порядке при толщине плиты до 80 мм с обеспечением требуемого защитного слоя. В остальных случаях принято цепное расположение стержней арматуры в плитах наружной обшивки. Поперечные переборки в соответствии с ПРРР [9] армированы одной полуторной сеткой. В наиболее нагруженных опорных сечениях плит обшивки (в соединении борта с палубой и днищем), в районе транцев, а также в узлах расположения на поперечных переборках у борта элементов якорной системы «Seaflex» выполнено усиленное армирование корпуса.

Схемы армирования основных элементов корпуса рассматриваемых трех типов причальных понтонов приведены на рис. 5–7.

Анализ применяемых материалов для изготовления понтонов, защитных слоев бетона, количества и расположения арматуры в элементах железобетонного корпуса [9,10,11,12,13,15,16] показал, что конструкция корпуса спроектированных причальных понтонов проектов M3320BRS (тип 1), M3315HDS (тип 2), M2715HDS (тип 3) соответствует требованиям Правил [9, 10] применительно к плавучим объектам класса «Р 1,2 IV».

Прочность причальных понтонов по нормальным, наклонным сечениям и трещиностойкость наружной обшивки при общем изгибе корпуса проверена в соответствии с требованиями ПРРР [9,11,12,13,14]. Результаты проверки общей прочности и трещиностойкости понтонов приведены в табл. 14–16.

Местная прочность плит железобетонной обшивки днища, борта, палубы и транцев причальных понтонов выполнена в соответствии с нормативными документами [9,10,11,12,13,14] и проверена по разрушающим усилиям и на раскрытие трещин. Результаты проверки местной прочности элементов корпуса понтонов приведены в табл. 17.

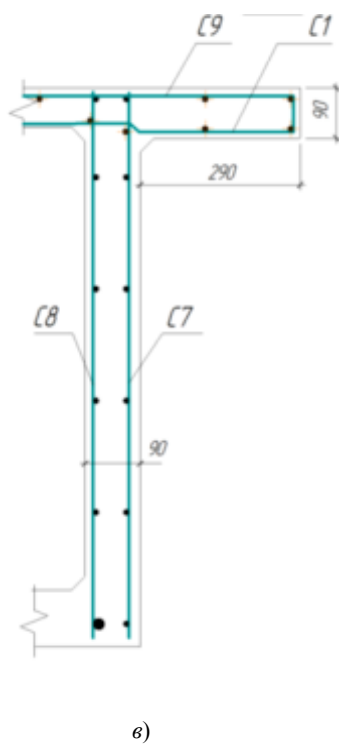
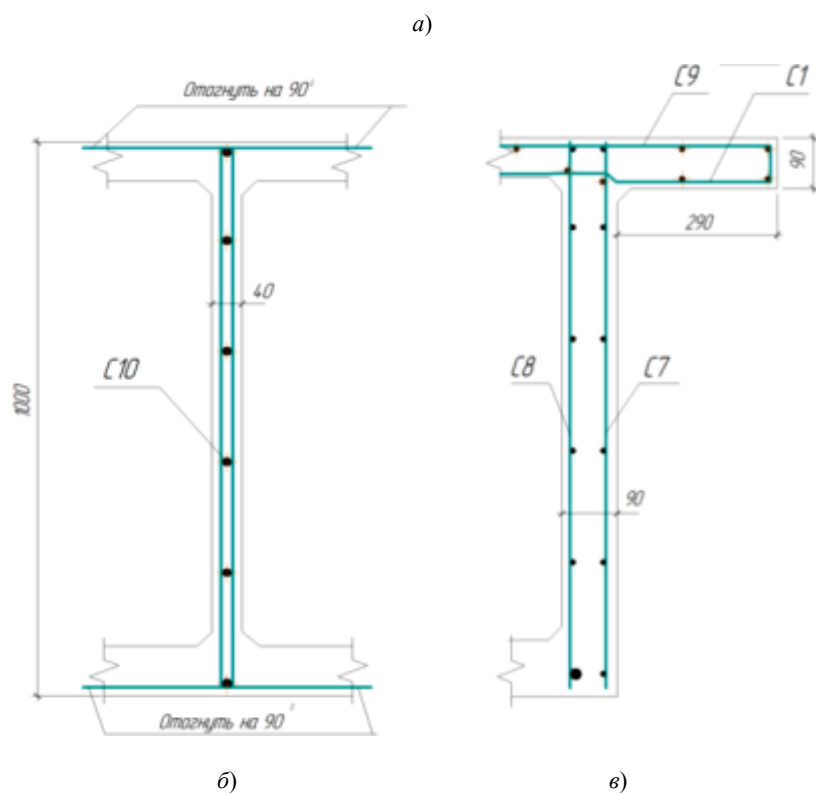
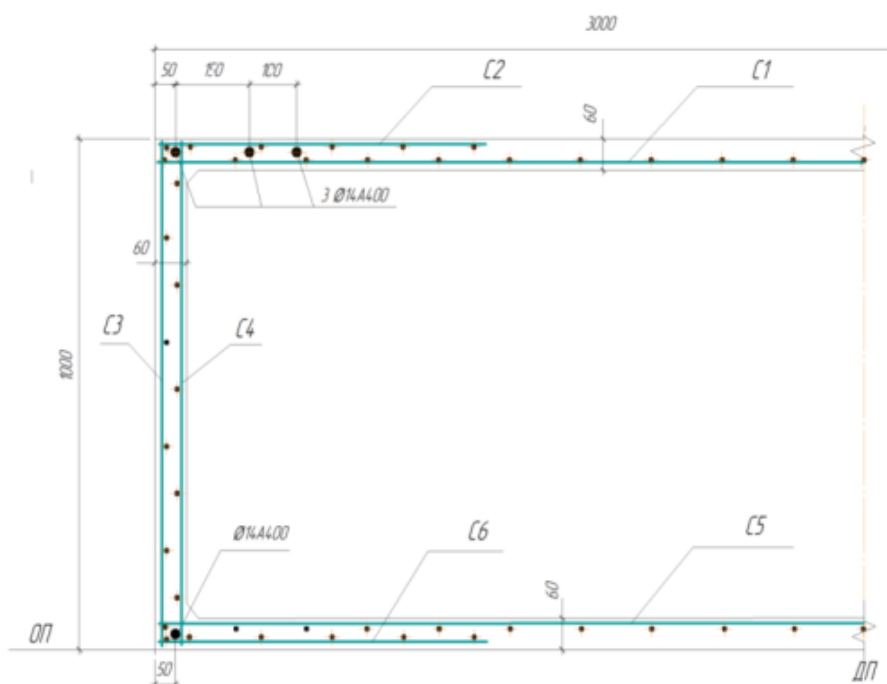
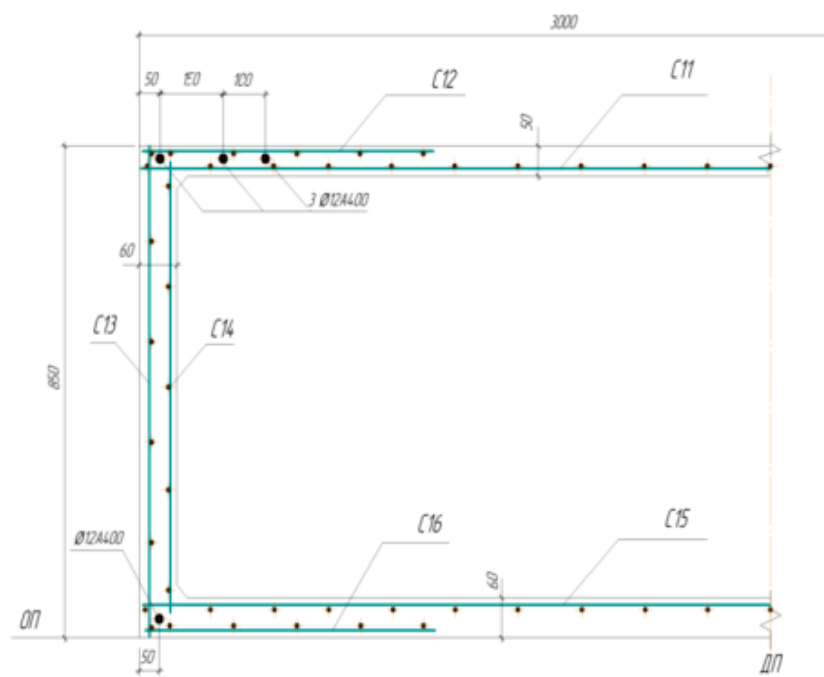
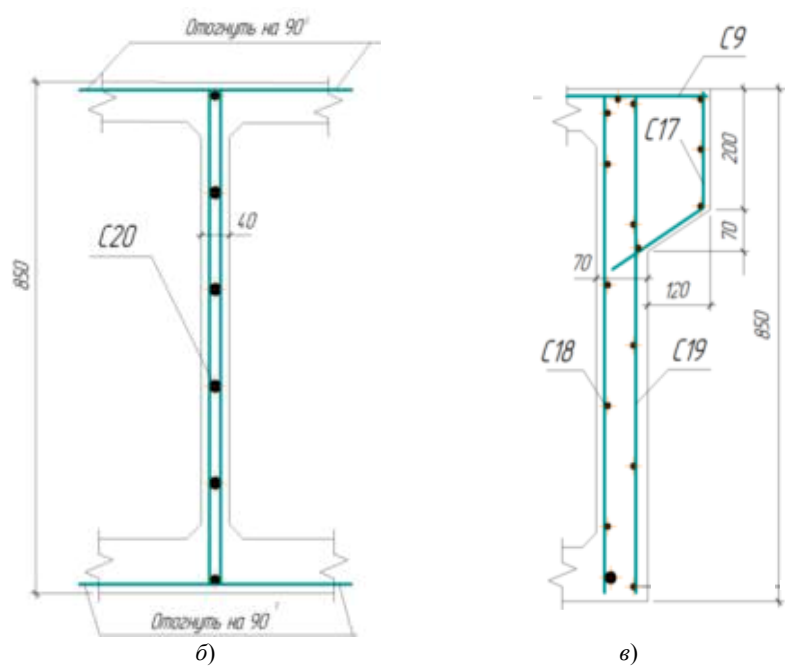


Рис. 5. Схема армирования понтона проекта М3320BRS (тип 1):
 а – средняя части корпуса; б – поперечная переборка; в – транец



а)



б)

в)

Рис. 6. Схема армирования понтона проекта М3315HDS (тип 2):
а – средняя части корпуса; б – поперечная переборка; в – транец

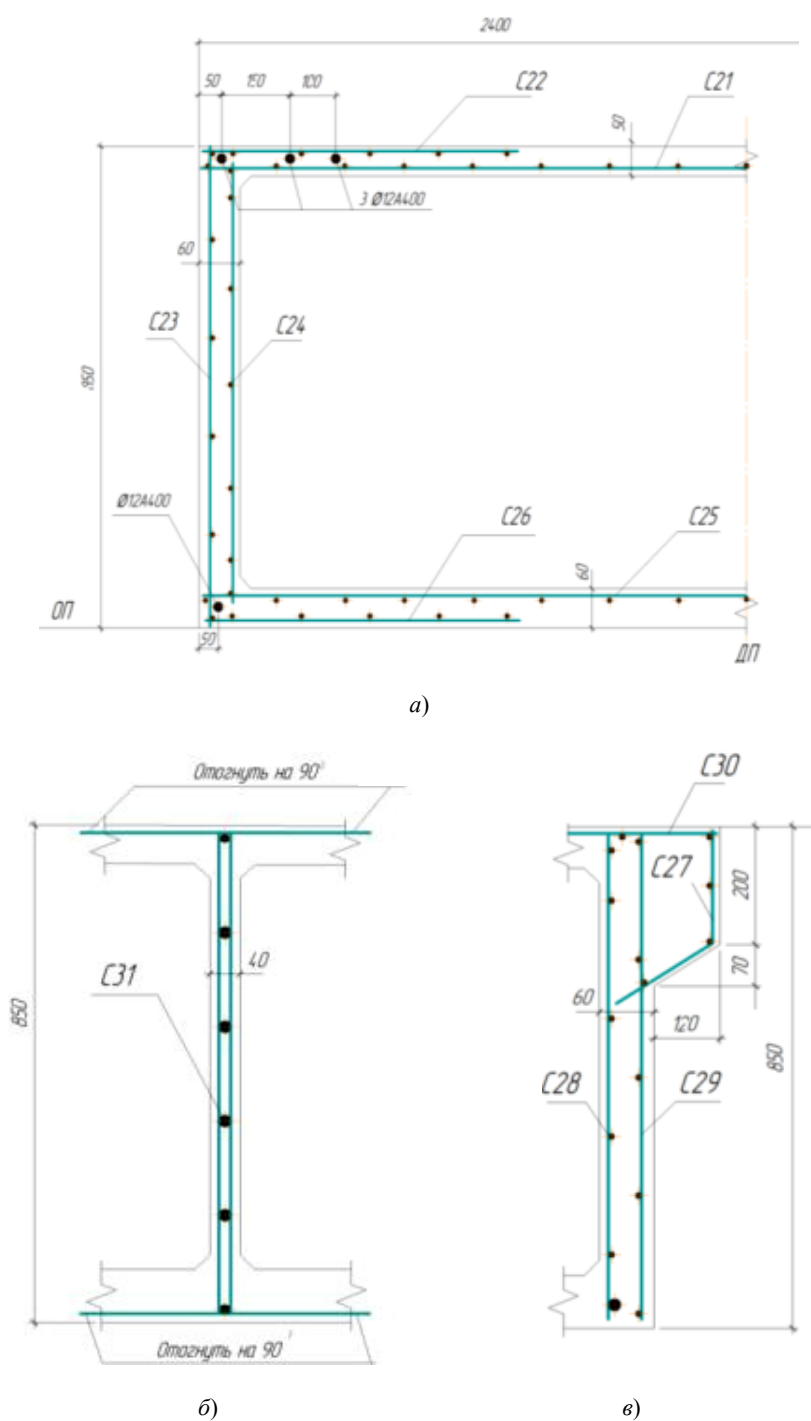


Рис. 7. Схема армирования понтона проекта M2715HDS (тип 3):
 а – средняя части корпуса; б – поперечная переборка; в – транец

Таблица 14

**Результаты проверки общей прочности
эквивалентного бруса понтонов
по нормальным сечениям**

Тип понтона	Состояние нагрузки	Приведенная площадь поперечного сечения, см ²			Момент инерции сечения, см ⁴	Продольные усилия растяжения, кН		Коэффициент запаса прочности	
		днище	борт	палуба		расчетные N	разрушающие N_p	расчетный $k = N_p/N$	допускаемый $[k]$
тип 1 (M3320BRS)	прогиб	11,8	213,2	370,8	50,67	269	460	1,71	1,6
	перегиб	364,6	213,2	18,0	53,63	359	702	1,96	1,6
тип 2 (M3315HDS)	прогиб	11,0	180,8	309,6	30,68	218	429	1,97	1,6
	перегиб	363,8	180,8	15,6	34,27	260	608	2,34	1,6
тип 3 (M2715HDS)	прогиб	9,9	180,8	249,6	28,4	224	386	1,72	1,6
	перегиб	292,1	180,8	14,4	31,86	253	561	2,22	1,6

Таблица 15

**Результаты проверки прочности бортов понтонов
по наклонным сечениям при общем изгибе**

Тип понтона	Расчетная перерезывающая сила Q , кН	Суммарная толщина бортов $\sum t$, см	Высота борта H , м	Касательные напряжения τ , МПа	Отношение R_p / k_1
тип 1 (M3320BRS)	71,0	12,0	1,0	0,59	1,41
тип 2 (M3315HDS)	58,0	12,0	0,85	0,57	1,41
тип 3 (M2715HDS)	62,0	12,0	0,85	0,61	1,41

Таблица 16

**Результаты проверки трещиностойкости
по нормальным сечениям понтонов
при общем изгибе**

Тип понтона	Элемент корпуса	Продольные усилия растяжения N , кН	Расстояние между трещинами $l_{тр}$, мм	Ширина раскрытия трещин, мм	
				расчетная a_{τ}	допускаемая $[a_{\tau}]$
тип 1 (M3320BRS)	палуба	359	93	0,06	0,07
	днище	269	111	0,07	0,08
тип 2 (M3315HDS)	палуба	260	78	0,04	0,07
	днище	218	116	0,06	0,08
тип 3 (M2715HDS)	палуба	253	69	0,04	0,07
	днище	224	111	0,07	0,08

В результате выполненных расчетов общей и местной прочности требования ПРРР [9,10] к прочности и трещиностойкости безнаборного корпуса спроектирован-

ных причальных понтонов М3320BRS (тип 1), М3315HDS (тип 2), М2715HDS (тип 3) для плавучих объектов класса «Р 1,2 IV» выполняются.

Таблица 17

**Результаты проверки местной прочности
элементов корпуса причальных понтонов**

Тип понтона	Характеристика	Элементы корпуса судна				
		палуба		борт	днище	
		на опоре	в пролете	на опоре	на опоре	в пролете
тип 1 (М3320BRS)	расчетный момент M , кН·м	3,67	-3,36	7,02	-7,02	5,66
	разрушающий момент M_p , кН·м	8,93	6,51	11,33	11,33	12,64
	коэффициенты запаса прочности k ($[k]$)	2,4 (1,5)	1,94 (1,5)	1,61 (1,5)	1,61 (1,5)	2,23 (1,5)
	ширина раскрытия трещин a_T ($[a_T]$)	0,06 (0,08)	0,11 (0,15)	0,06 (0,08)	0,06 (0,10)	0,06 (0,15)
тип 2 (М3315HDS)	расчетный момент M , кН·м	4,00	-2,76	6,41	-6,41	4,74
	разрушающий момент M_p , кН·м	8,72	5,96	11,33	11,33	12,64
	коэффициенты запаса прочности k ($[k]$)	2,18 (1,5)	2,16 (1,5)	1,76 (1,5)	1,76 (1,5)	2,66 (1,5)
	ширина раскрытия трещин a_T ($[a_T]$)	0,04 (0,08)	0,08 (0,15)	0,06 (0,08)	0,06 (0,10)	0,06 (0,15)
тип 3 (М2715HDS)	расчетный момент M , кН·м	2,45	-1,83	3,73	-3,73	3,34
	разрушающий момент M_p , кН·м	4,41	3,04	5,86	5,86	6,62
	коэффициенты запаса прочности k ($[k]$)	1,8 (1,5)	1,66 (1,5)	1,57 (1,5)	1,57 (1,5)	1,95 (1,5)
	ширина раскрытия трещин a_T ($[a_T]$)	0,07 (0,08)	0,06 (0,15)	0,03 (0,08)	0,04 (0,10)	0,03 (0,15)
Примечание. В скобках приведены допускаемые ПРРР [9] значения нормируемых величин						

Результаты сопоставления требований ПРРР [9] к элементам конструкции корпуса причальных понтонов, принятых в проекте, приведены в табл. 18.

Таблица 18

**Сопоставление требований ПРРР [9] к элементам конструкции
корпуса причальных понтонов, принятых в проекте**

Наименование	Размеры элементов конструкции			
	по ПРРР [9]	проект		
		тип 1 (М3320BRS)	тип 2 (М3315HDS)	тип 3 (М2715HDS)
1. Материал корпуса				
1.1 бетон	В30	В45	В45	В45
1.2 арматура	А-III (А400)	А400	А400	А400

Наименование	Размеры элементов конструкции			
	по ПРРР [9]	проект		
		тип 1 (М3320BRS)	тип 2 (М3315HDS)	тип 3 (М2715HDS)
2. Минимальные толщины связей, мм				
2.1 настил палубы $h_{\text{п}}$	40	60	50	50
2.2 обшивка борта $h_{\text{б}}$	60	60	60	60
2.3 обшивка днища $h_{\text{дн}}$	60	60	60	60
2.4 плита транца $h_{\text{тр}}$	60	90	70	60
2.5 поперечная переборка $h_{\text{пер}}$	35	40	40	40
3. Защитный слой бетона, мм				
3.1 для наружных поверхностей $a_{\text{н}}$	10	10	10	10
3.2 для внутренних поверхностей $a_{\text{в}}$	5	5	5	5

Наименование	Размеры элементов конструкции			
	по ПРРР [1]	проект		
		тип 1 (М3320BRS)	тип 2 (М3315HDS)	тип 3 (М2715HDS)
4. Характеристики арматурных сеток, мм				
4.1 палуба				
а) внутренняя сетка				
- продольная арматура $d_{\text{w}} \times t_{\text{w}}$	6×240 (200; 200)	6×150	6×150	6×150
- поперечная арматура $d \times t$	6×150 (125; 125)	8×150	6×75	6×75
б) наружная сетка				
- продольная арматура $d_{\text{w}} \times t_{\text{w}}$	6×240 (200; 200)	6×150	6×150	6×150
- поперечная арматура $d \times t$	6×150 (125; 125)	10×150	8×75	6×75
4.2 борт				
а) внутренняя сетка				
- продольная арматура $d_{\text{w}} \times t_{\text{w}}$	6×240	6×200	6×150	6×150
- поперечная арматура $d \times t$	6×150	8×150	8×150	8×150
б) наружная сетка				
- продольная арматура $d_{\text{w}} \times t_{\text{w}}$	6×240	6×150	6×150	6×150
- поперечная арматура $d \times t$	6×150	8×75	8×75	8×150
4.3 днище				
а) внутренняя сетка				
- продольная арматура $d_{\text{w}} \times t_{\text{w}}$	6×240	6×150	6×150	6×150
- поперечная арматура $d \times t$	6×150	8×75	8×75	8×75
б) наружная сетка				
- продольная арматура $d_{\text{w}} \times t_{\text{w}}$	6×240	6×150	6×150	6×150
- поперечная арматура $d \times t$	6×150	8×75	8×75	8×75
4.4 транец				
а) внутренняя сетка				
- продольная арматура $d_{\text{w}} \times t_{\text{w}}$	6×360 (280; 240)	6×200	6×200	6×200

Наименование	Размеры элементов конструкции			
	по ПРРР [1]	проект		
		тип 1 (M3320BRS)	тип 2 (M3315HDS)	тип 3 (M2715HDS)
- поперечная арматура $d \times t$	6×225 (175; 150)	6×150	6×150	6×150
б) наружная сетка				
- продольная арматура $d_w \times t_w$	6×360 (280; 240)	8×200	6×150	6×200
- поперечная арматура $d \times t$	6×225 (175; 150)	6×150	6×150	6×150
4.5 поперечная переборка (полуторная сетка)				
- горизонтальная арматура $d_w \times t_w$	6×160	8×150	8×150	8×150
- вертикальная арматура $d \times t$	6×100	8×100	8×100	8×100
<i>Примечание.</i> Для характеристик арматурных сеток в скобках приведен шаг арматуры для понтонов типа 2 и типа 3 соответственно				

В результате выполненного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Требования ПРРР [9, 10] по соотношению главных размерений, конструкции корпуса, прочности и трещиностойкости причальных понтонов проектов M3320BRS (тип 1), M3315HDS (тип 2) и M2715HDS (тип 3) для постановки на классификационный учет и присвоения им класса плавучих объектов «Р 1,2 IV» Российского Речного Регистра выполняются.

2. При проектировании железобетонных причальных понтонов возможно использование бетона более низкого класса В30 вместо применяемого в проекте бетона класса В45. Также имеется дополнительный резерв по использованию для некоторых элементов корпуса арматуры меньшего диаметра и большего шага ее установки, что позволит уменьшить стоимость постройки понтонов.

3. Расчеты прочности показывают возможность армирования обшивки днища и настила палубы в средней части корпуса причальных понтонов одинарной сеткой вместо требования ПРРР [9] по установке двух сеток (с наружной и внутренней стороны плиты).

4. ФГБОУ ВО «ВГУВТ» обладает достаточным кадровым потенциалом, способным разрабатывать техническую документацию по проектированию причальных железобетонных понтонов и возможной их постройкой на Городецкой судовой верфи ООО «ССК», имеющей 40-летний опыт строительства железобетонных причалов по заказам Минобороны.

Список литературы:

- [1] Marinetek. <http://marinetek.net>
- [2] Лебедева А.В. Яхтенные порты и марины в Европе и России / Лебедева А. В. // Судостроение. – 2004. – № 7-8. – С. 31.
- [3] Новоселов П.Н. Современный яхтенный порт - марина. // Практика создания. М. [б. и.] – 2011. – 112 с.
- [4] Kovalev N.V. Yacht Marinas Investment Attractiveness and Ways to Improve it. Administrative Consulting. 2015;(9): – Pp. 159–163
- [5] Efficient and profitable marina operation. Practical advice for optimizing service provision. PLANCO Consulting GmbH. 2013
- [6] Fundamental truths about marinas past, present & future. Common sense rules of thumb. Neil W. Ross. 2008
- [7] UK leisure, superyacht and small commercial marine industry. Key performance indicators 2009/10. British Marine Federation. 2010
- [8] Daniels, S.H. State to revisit pontoon fix // Engineering News Record. P. 15, Dec. 8, 1997

- [9] Российский Речной Регистр. Правила. В 5 т. Т. 2. – М. : Наука, 2016. – 437 с.
- [10] Правила классификации и освидетельствования плавучих объектов (ПКПО): [электронный ресурс] / Российский Речной Регистр. – М. 2017. – 86 с. <https://docplan.ru/Data2/1/4293745/4293745270.pdf>
- [11] Пособие по проектированию бетонных и железобетонных конструкций из тяжелого бетона без предварительного напряжения арматуры (к СП 52-101-2003) / ЦНИИПромзданий, НИИЖБ. – М. : ОАО «ЦНИИПромзданий», 2005. – 214 с.
- [12] Справочник по железобетонному судостроению (Суда внутреннего плавания) / Н.М. Егоров [и др.] – Л. : Судостроение, 1969. – 358 с.
- [13] Правила постройки корпусов морских судов и плавучих сооружений с применением железобетона / Российский Морской Регистр Судоходства. – СПб. : Российский Морской Регистр Судоходства, 2000. – 83 с.
- [14] Городецкий А.С. Современные технологии автоматизированного расчета и проектирования железобетонных конструкций / А.С. Городецкий, М.В. Лазнюк // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – 2007. – № 5 – С.62–63
- [15] Волков И.В. Оптимизация конструкции элементов железобетонных корпусов судов внутреннего плавания : дис. ... канд. техн. наук : 05.08.03 / Волков Иван Владимирович. Н.Новгород, 2010. – 199 с.
- [16] Konig G., Deutschmann K. High Performance Concrete (HPC) with Improved Ductility. International Conference «New Technologies in Structural Engineering». Pp. 27 – 34, Lisbon, 1997

THE DESIGN OF THE HULL CONSTRUCTION REINFORCED CONCRETE MOORING PONTOONS

Borisov Aleksandr M., *Candidate of Engineering Science,*

Associate Professor of the Department of theory

design of engineering structures

Volga State University of Water Transport

Prjanichnikov Konstantin N., *Candidate of in Engineering Science,*

Associate Professor of the Department of theory

design of engineering structures

Volga State University of Water Transport.

5, Nesterov st, Nizhniy Novgorod, 603951

Keywords: *mooring pontoon, floating object, Russian River Register rules, hull construction, reinforced concrete, reinforcement, General strength, local strength, bending moment, stresses, crack resistance*

Annotation. *The results of verification of compliance with the requirements of the Rules of the Russian River Register (RRRR) to the design and strength of the hulls of berthing pontoons of three types built by Marinetek: M3320BRS, M3315HDS, M2715HDS, made of reinforced concrete. Mooring pontoons rack type designed for mooring small boats with displacement of up to 200 tons, can be used as single berths or be interconnected for the formation of floating piers of different lengths and configuration. Conducted instrumental researches of berthing pontoons with the definition of the main dimensions, the thickness of the cladding, the scheme of reinforcement plates of the shell plating strength of concrete. The inner space of the pontoons is filled with polystyrene foam to ensure unsinkability. In accordance with the RRRR calculations of strength and crack resistance of the main body bonds of the three types of mooring pontoons. The results of comparing the requirements of RRRR to the structural elements of the hull mooring pontoons adopted in the project. It is shown that the requirements of the RRRR on the hull structure, strength and crack resistance of mooring pontoons of projects M3320BRS, M3315HDS and M2715HDS for classification and assignment of the class of floating objects "P 1,2 IV" of the Russian River Register are fulfilled.*

References:

- [1] Marinetek. <http://marinetek.net>
- [2] Lebedeva, A. V. YAhtennye porty i mariny v Evrope i Rossii / Lebedeva A.V. // Sudohodstvo. – 2004. – № 7-8. – S. 31.
- [3] Novoselov, P. N. Sovremennyy yahtennyj port - marina. // Praktika sozdaniya. M. [b. i.] – 2011. – 112 s.
- [4] Kovalev N.V. Yacht Marinas Investment Attractiveness and Ways to Improve it. *Administrative Consulting*. 2015;(9): – pp. 159–163.
- [5] Efficient and profitable marina operation. Practical advice for optimizing service provision. PLANCO Consulting GmbH. 2013
- [6] Fundamental truths about marinas past, present & future. Common sense rules of thumb. Neil W. Ross. 2008
- [7] UK leisure, superyacht and small commercial marine industry. Key performance indicators 2009/10. British Marine Federation. 2010
- [8] Daniels, S.H. State to revisit pontoon fix // Engineering News Record. P. 15, Dec. 8, 1997
- [9] Rossijskij Rechnoj Registr. Pravila. V 5 t. T. 2. – M. : Nauka, 2016. – 437 s.
- [10] Pravila klassifikacii i osvidetel'stvovaniya plavuchih ob"ektov (PKPO): [elektronnyj resurs]/ Rossijskij Rechnoj Registr. – M. 2017. – 86 s. <https://docplan.ru/Data2/1/4293745/4293745270.pdf>
- [11] Posobie po proektirovaniyu betonnyh i zhelezobetonnyh konstrukcij iz tyazhelogo betona bez predvaritel'nogo napryazheniya armatury (k SP 52-101-2003)/ CNIIPromzdanij, NIIZHB. – M. : OAO «CNIIPromzdanij», 2005. – 214 s.
- [12] Spravochnik po zhelezobetonnomu sudostroeniyu (Suda vnutrennego plavaniya) / N.M. Egorov [I dr.] – L. : Sudostroenie, 1969. – 358 s.
- [13] Pravila postrojki korpusov morskikh sudov i plavuchih sooruzhenij s primeneniem zhelezobetona / Rossijskij Morskoj Registr Sudohodstva. – SPb. : Rossijskij Morskoj Registr Sudohodstva, 2000. – 83 s.
- [14] Gorodeckij, A.S. Sovremennye tekhnologii avtomatizirovannogo rascheta i proektirovaniya zhelezobetonnyh konstrukcij / A.S. Gorodeckij, M.V. Laznyuk // Stroitel'nye materialy, oborudovanie, tekhnologii XXI veka. – 2007. – № 5 – S.62–63
- [15] Volkov, I.V. Optimizaciya konstrukcii elementov zhelezobetonnyh korpusov sudov vnutrennego plavaniya : dis. ...kand. tekhn. nauk : 05.08.03 / Volkov Ivan Vladimirovich. N.Novgorod, 2010. – 199 s.
- [16] Konig G., Deutschmann K. High Performance Concrete (HPC) with Improved Ductility. International Conference «New Technologies in Structural Engineering». Lisbon. – 1997. – pp. 27–34

Статья поступила в редакцию 13.08.2019 г.

УДК 629.5.061.11

Бычков Владислав Ярославич, инженер кафедры радиоэлектроники
ФГБОУ ВО «ВГУВТ», e-mail: vim@vgavt-nn.ru

Грошева Людмила Серафимовна, кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ВГУВТ», e-mail: vim@vgawt-nn.ru

Плющев Валерий Иванович, заведующий кафедрой, доктор технических наук,
профессор ФГБОУ ВО «ВГУВТ», e-mail: vip@vgavt-nn.ru
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
образования «Волжский государственный университет водного транспорта»
(ФГБОУ ВО «ВГУВТ»)

603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5

ОБЛАСТЬ ПРИМЕНИМОСТИ АЛГОРИТМА УДЕРЖАНИЯ СУДНА С КОЛЕСНЫМ ДВИЖИТЕЛЬНО-РУЛЕВЫМ КОМПЛЕКСОМ НА КУРСЕ

Ключевые слова: судно, колесный движительно-рулевой комплекс, алгоритм удержания судна на курсе, качественные показатели системы управления.

Аннотация. Строящиеся в России суда с колесным приводом не имеют на борту традиционного руля, изменения направления движения осуществляется изменением частоты вращения гребных колес. Математическое моделирование процесса управления позволило выработать алгоритм для идеальных условий эксплуатации (отсутствие ветра, волны и т.д.). Внесение в модель возмущающих воздействий, а именно воздействия ветра разной силы и направления вносит ограничения в возможности управления удержанием судна на курсе.

В статье проводятся исследования по поиску коэффициентов для расширения области управляемости в условиях наличия возмущающих воздействий.

В настоящее время в России эксплуатируется 3 судна с колесным движительно-рулевым комплексом (КДРК), ведется строительство четвертого крупного пассажирского судна пассажировместимостью 180 человек с размерами 81,6 * 13,8 * 9,5 м, имеющего осадку всего 1,2 м [1, 2, 3]. У судов данного типа отсутствует руль, управление осуществляется за счет выбора соотношения частот вращения двух гребных колес, расположенных в кормовой части. Использование частотных приводов и асинхронных приводных электродвигателей гребных колес позволяет регулировать соотношение частот вращения колес практически с любой заданной точностью во всем возможном диапазоне изменения частот вращения (от нуля до максимальной частоты вращения вперед, назад или враздрай). Судно с КДРК остро реагирует на изменение соотношения частот вращения гребных колес, что при ручном управлении требует высокой квалификации судоводителя (управление частотами вращения гребных колес производится двумя независимыми джойстиками). Эта проблема решается при автоматизации процесса управления. На эксплуатируемых судах с КДРК установлены компьютеризированные системы управления (рис. 1), разработанные ВГАВТ [4].



Рис. 1. Компьютеризированная система управления судна с КДРК

Судоводитель одним джойстиком задает скорость движения судна, вторым – направление движения. Система автоматически подбирает соотношение частот вращения гребных колес для реализации заданного режима движения. Высокие качественные показатели системы управления подтверждены опытом эксплуатации судов с КДРК.

Наличие двух независимых каналов управления гребными колесами позволяет реализовывать различные варианты формирования управляющих воздействий на них при изменении курса:

- поочередное управление гребными колесами (управление формируется для первого колеса, после его отработки формируется и отрабатывается управление для второго колеса, затем цикл повторяется);

- одновременное формирование и отработка управления двумя гребными колесами (увеличение частоты вращения одного колеса и уменьшение частоты вращения другого колеса на одну и ту же величину);

- одновременное формирование и отработка управления двумя гребными колесами (увеличение частоты вращения одного колеса и уменьшение частоты вращения другого колеса на разные величины) и другие варианты.

В работах [5,6] предлагалось использовать алгоритм, основанный на первом варианте управления. «В алгоритме применялась вспомогательная функция, позволяющая оценить степень отклонения судна от курса:

$$R = k_a \cdot (a - a_z) + k_\omega \cdot \omega + k_o \cdot (y - y_z), \quad (1)$$

где: a, a_z – угол курса и заданный угол;

ω – угловая скорость поворота судна;

$y - y_z$ – отклонение судна от заданной траектории $y_z = f(x)$;

k_a, k_ω, k_o – коэффициенты пропорциональности.

Управление на приводы гребных колес формируется следующим образом:

$$\begin{aligned} U_{1н} &= \begin{cases} U_{1с} + R \cdot (U_{1max} - U_{1с}) & \text{при } R > 0; \\ U_{1ход} & \text{при } R \leq 0; \end{cases} \\ U_{2н} &= \begin{cases} U_{2с} - R \cdot (U_{2max} - U_{2с}) & \text{при } R < 0; \\ U_{2ход} & \text{при } R \geq 0, \end{cases} \end{aligned} \quad (2)$$

где $U_{1,2ход}$ – заданное судоводителем управляющее воздействие, обеспечивающее требуемую скорость движения судна (индексы «с» и «н» обозначают текущее значение параметров и вновь формируемое),

$U_{1,2max}$ – максимальное значение управляющего воздействия.

Такое управление обеспечивает поворот судна за счет увеличения частоты вращения одного из гребных колес, при этом скорость движения судна при маневрировании не снижается (может даже увеличиваться). При скоростях близких к максимальному значению время переходного процесса затягивается (из-за невозможности значительного увеличения частоты вращения одного из гребных колес). В этом случае маневр выполняется за счет снижения частоты вращения другого гребного колеса, при этом скорость судна может снижаться» [5, 6].

Цель данной статьи:

- разработка алгоритма, обеспечивающего движение судна с КДРК по заданной траектории, использующего одновременное формирование и отработку управления двумя гребными колесами (увеличение частоты вращения одного колеса и уменьшение частоты вращения другого колеса на разные величины);

- определение области применимости указанного алгоритма в реальных условиях с учетом ветровых воздействий.

В этом случае управление на приводы гребных колес будет формироваться следующим образом:

$$\begin{aligned} U_{1н} &= \begin{cases} U_{1с} + R \cdot K \cdot (U_{1max} - U_{1с}) & \text{при } R > 0; \\ U_{1с} - R \cdot U_{1с} \cdot (1 - K) & \text{при } R \leq 0; \\ U_{ход} & \text{при } R \cdot R_c \leq 0; \end{cases} \\ U_{2н} &= \begin{cases} U_{2с} - R \cdot K \cdot (U_{2max} - U_{2с}) & \text{при } R < 0; \\ U_{2с} - R \cdot U_{2с} \cdot (1 - K) & \text{при } R \geq 0, \\ U_{ход} & \text{при } R \cdot R_c \leq 0; \end{cases} \end{aligned} \quad (3)$$

где K – коэффициент распределения управления между колесами.

Результаты моделирования движения судна при реализации (3) представлены на рис. 2 (в момент времени t появляется боковой ветер в правый борт $v = 7$ м/с или 25,2 км/ч).

При появлении ветрового воздействия переходный процесс заканчивается примерно через 320 с, отклонение судна от заданной траектории не более 0,3 м, угол дрейфа составляет 2–3°. Это вполне приемлемо для практического применения, учитывая значительное влияние ветра на управляемость судна (это свойственно судам любого типа имеющим большую длину [7,8,9]).

Судно сохраняет скорость, близкую к заданной ходовой $U_{ход} = 10,5$ км/ч. Изменение частот вращения гребных колес при этом не превышает 30% от максимального значения.

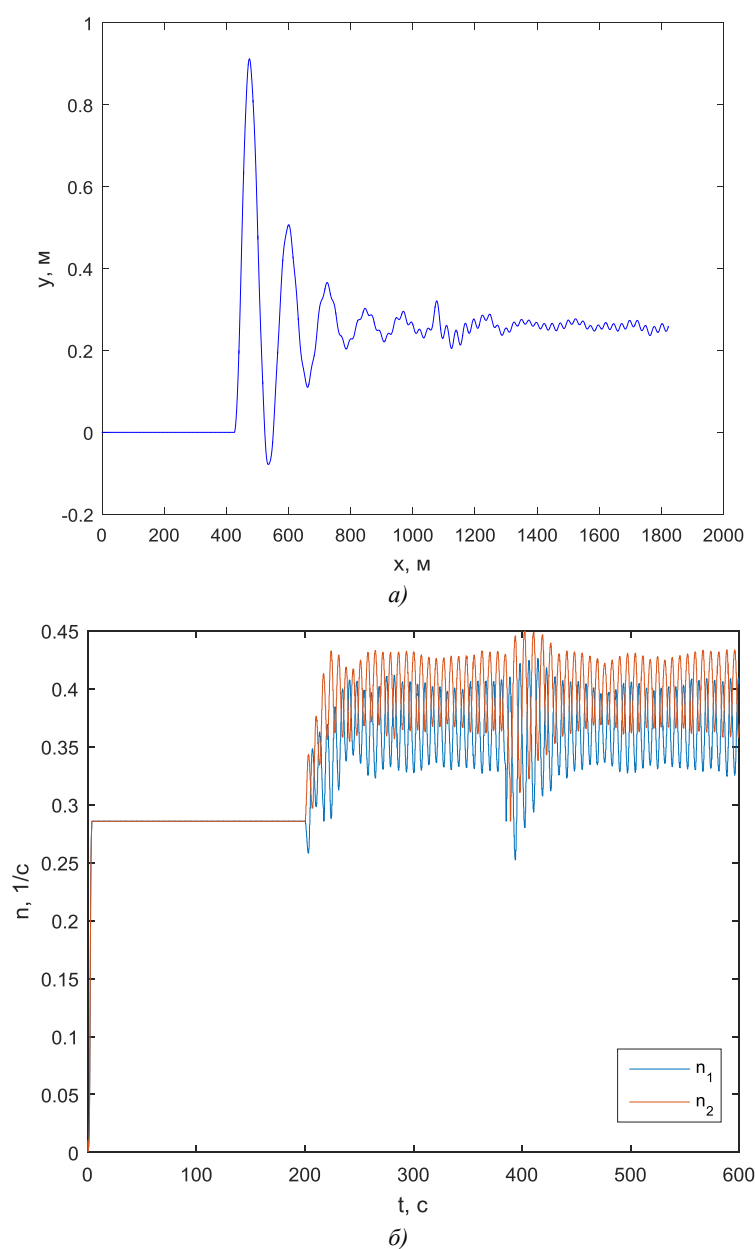


Рис. 2. Траектория движения судна (а) и частоты вращения гребных колес n_1 и n_2 (б) при ветровом воздействии

Представляет практический интерес поиск оптимального значения коэффициента K в (3). Были проведены исследования динамики судна при изменении эксплуатационных параметров в пределах:

- скорость судна v до 17,5 км/ч (максимальное проектное значение для судна);
- коэффициент K от 0 до 1;
- скорость ветра v от 0 до 36 км/ч (в правый борт).

Зависимости отклонения судна Δ от заданной траектории при изменении указанных параметров и коэффициента K представлены на рис. 3.

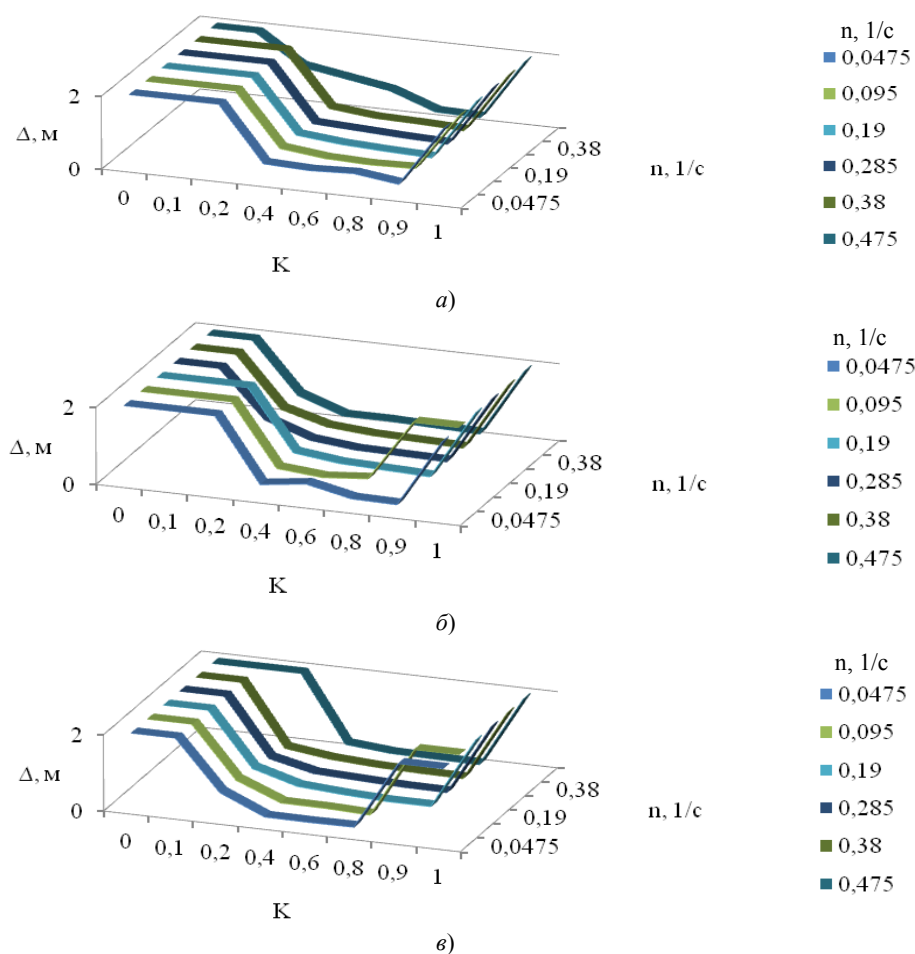


Рис. 3. Зависимости отклонения судна от заданной траектории при изменении v , v и K (а) $v = 10$ м/с, б) 7 м/с, в) 4 м/с)

Аналогичные исследования были проведены для направления ветра в корму (справа). Результаты представлены на рис. 4.

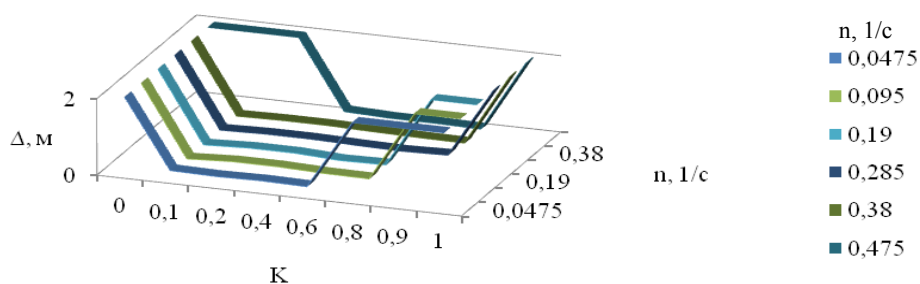


Рис. 4. Зависимости отклонения судна от заданной траектории при изменении v и K ($v = 7$ м/с)

Полученные результаты позволяют выбрать значение K для алгоритма управления, обеспечивающего удержание судна на курсе в заданных пределах при изменении скорости судна и скорости ветра в широком диапазоне.

Была проверена возможность снижения механических нагрузок в приводах гребных колес за счет уменьшения числа переключения приводов (снижение частоты формирования управляющих воздействий). Результаты моделирования при снижении частоты выдачи управляющих воздействий в 3 раза представлены на рисунке 5.

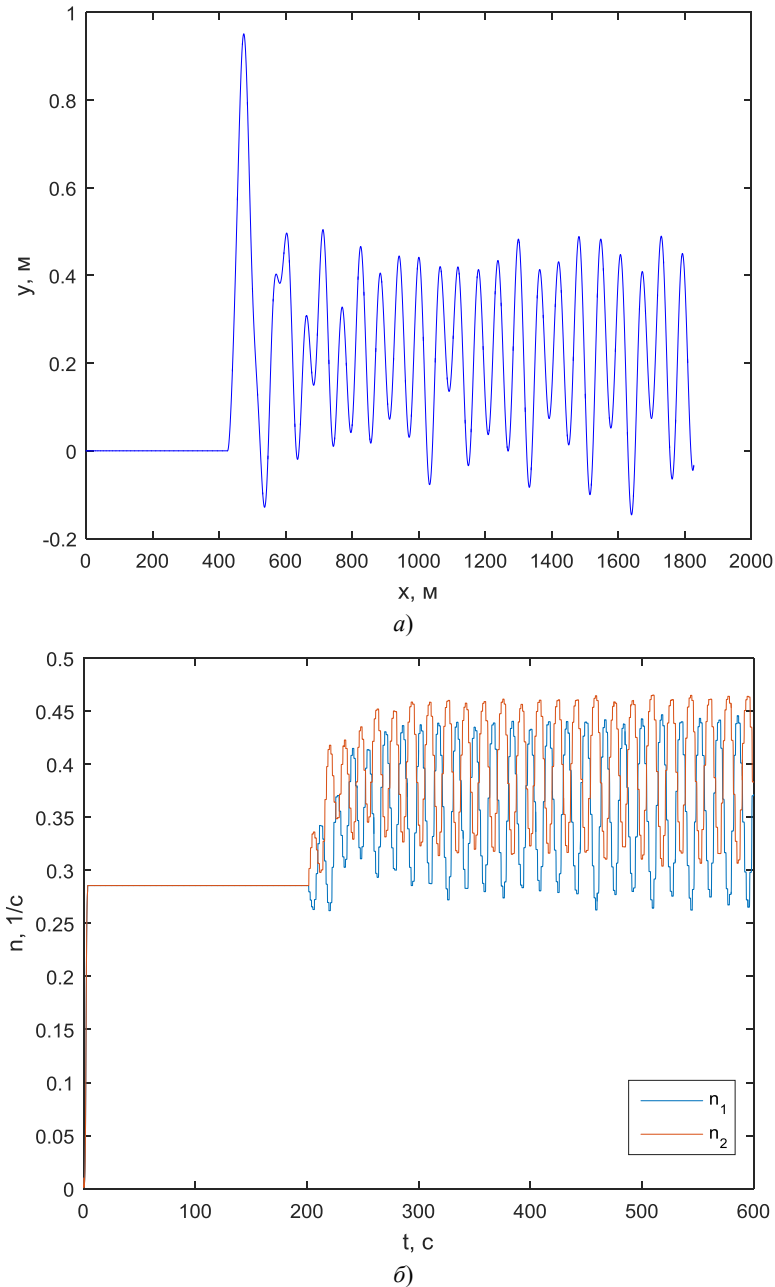


Рис. 5. а) Траектория движения судна при ветровом воздействии и при снижении частоты выдачи управляющих воздействий
б) Частоты вращения гребных колес n_1 и n_2 при ветровом воздействии и при снижении частоты выдачи управляющих воздействий

Отклонение от траектории увеличилось до 0,5 м (на рис. 2а оно составляет 0,3 м), но при этом частоты переключений приводов уменьшалась более чем в 2 раза (в сравнении с результатами, представленными на рис. 2б). Таким образом, возможно подобрать оптимальную величину частоты выдачи управляющих воздействий при сохранении допустимой величины отклонения от траектории при значительном уменьшении нагрузки на механические приводы.

Таким образом, предложенный алгоритм управления гребными колесами, обеспечивающий удержание судна на курсе при внешних воздействиях и использующий одновременное формирование и отработку управления двумя гребными колесами (увеличение частоты вращения одного колеса и уменьшение частоты вращения другого колеса), обладает высокими качественными показателями и может быть рекомендован для реализации в составе компьютеризированной системы управления судна с КДРК.

Список литературы:

- [1] Российский патент № 2225327 от 30.11.2001.
- [2] Галкин Д.Н. и др. Уникальный туристический теплоход, или как развивать отрасль в современных условиях. // Речной транспорт (XXI век). 2016. – № 2(78). – с. 21–23.
- [3] Галкин Д.А., Малый Ю.А. От «Суры» к «Золотому кольцу». // Речной транспорт (XXI век). 2015. – №2(73). – с. 32–33.
- [4] Галкин Д.Н., Итальянцев С.А., Плющаев В.И. Компьютеризованная система управления пассажирским колесным теплоходом. Речной транспорт (XXI век). Москва. №6. 2014 – с. 29–31.
- [5] Грошева Л.С., Мерзляков В.И., Плющаев В.И. Синтез алгоритма управления движением судна с колесным движительно-рулевым комплексом // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. – 2012. – №2. – С. 34–39.
- [6] Грошева Л.С., Плющаев В.И. Адаптивный алгоритм удержания судна с колесным движителем на курсе. // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. Выпуск 43. – Н. Новгород: Изд-во ФГБОУ ВО «ВГУВТ», 2015. – С.48–55.
- [7] Szlangiewicz T., Wiśniewski B., Zelazny K. The influence of wind, wave and loading condition on total resistance and speed of the vessel. polish maritime research 3(83) 2014 Vol. 21; pp. 61–67.
- [8] Fossen, T. I., Perez T. Ship Motion Control and Models // One-day Tutorial, CAMS'07, Bol, Croatia, 2007. – 27 c.
- [9] Andersen I. M. V. Wind Forces on Container Ships Fluid Mechanics, Coastal and Maritime Engineering, Department of Mechanical Engineering, Technical University of Denmark, Nils Koppels Allé, 2800, Kgs. Lyngby, Denmark – 12 c.

THE FIELD OF APPLICABILITY OF THE ALGORITHM KEEP THE VESSEL WITH WHEELED PROPULSION-STEERING COMPLEX ON THE COURSE

Bychkov Vladislav Y., *engineer of the Department of Radioelectronics*

Volga State University of Water Transport

Grosheva Lyudmila S., *candidate of technical Sciences, associate Professor*

of the Department of Radioelectronics Volga State University of Water Transport

Plyushchaev Valery I., *head of the Department, doctor of technical Sciences,*

Professor of the Department of Radioelectronics

Volga State University of Water Transport

5, Nesterov st, Nizhniy Novgorod, 603951

Keywords: vessel, wheel propulsion and steering complex, the algorithm of keeping the vessel on the course, quality indicators of the control system.

In Russia, ships with a wheeled propulsion-steering complex are being built, which do not have a traditional steering wheel. Control of the vessel is carried out by changing the ratio of the frequency of rotation wheels located on the sides in the aft of the vessel. The article discusses the applicability of the algorithm to keep the ship on course, implementing simultaneous control of two propeller wheels, taking into account external influences.

References:

- [1] Rossiyskiy patent № 2225327 ot 30.11.2001.
- [2] Galkin D.N. i dr. Unikal'nyy turisticheskiy teplokhod, ili kak razvivat' otrasl' v sovremennykh usloviyakh. //Rechnoy transport (KhKhI vek). 2016. – № 2(78). – s. 21–23.
- [3] Galkin D.A., Malyy Yu.A. Ot «Sury» k «Zolotomu kol'tsu». //Rechnoy transport (KhKhI vek). 2015. – №2(73). – s. 32–33.
- [4] Galkin D.N., Ital'yantsev S.A., Plyushchaev V.I. Komp'yuterizovannaya sistema upravleniya passazhirskim kolesnym teplokhodom. Rechnoy transport (XXI vek). Moskva. № 6.2014 – s. 29–31.
- [5] Grosheva L.S., Merzlyakov V.I., Plyushchaev V.I. Sintez algoritma upravleniya dvizheniem sudna s kolesnym dvizhitel'no-rulevym kompleksom // Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universitet. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika. – 2012. – №2. – S. 34–39.
- [6] Grosheva L.S., Plyushchaev V.I. Adaptivnyy algoritm uderzhaniya sudna s kolesnym dvizhitelem na kurse. // Vestnik Volzhskoy gosudarstvennoy akademii vodnogo transporta. Vypusk 43. – N. Novgorod: Izd-vo FGBOU VO «VGUVT», 2015. – S. 48–55.
- [7] Szelangiewicz T., Wiśniewski B., Zelazny K. The influence of wind, wave and loading condition on total resistance and speed of the vessel. polish maritime research 3(83) 2014 Vol. 21; pp. 61–67.
- [8] Fossen, T. I., Perez T. Ship Motion Control and Models // One-day Tutorial, CAMS'07, Bol, Croatia, 2007. – 27 c.
- [9] Andersen I. M. V. Wind Forces on Container Ships Fluid Mechanics, Coastal and Maritime Engineering, Department of Mechanical Engineering, Technical University of Denmark, Nils Koppels Allé, 2800, Kgs. Lyngby, Denmark – 12 c.

Статья поступила в редакцию 28.06.2019 г.

УДК 629.5.06:[628.3:502.3]

Васькин Сергей Владимирович, к.т.н., доцент кафедры гидродинамики, теории корабля и экологической безопасности судов

ФГБОУ ВО «ВГУВТ», e-mail: tkebs@vgavt-nn.ru

Леушова Ирина Евгеньевна, магистрант ФГБОУ ВО «ВГУВТ»

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Волжский государственный университет водного транспорта» (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»)

603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5

ВЫБОР ТИПА И ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ СУДОВЫХ УСТАНОВОК ДЛЯ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ И НЕФТЕСОДЕРЖАЩИХ ВОД ТАНКЕРА-БУНКЕРОВЩИКА ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СУДНА, ЭКСПЛУАТИРУЕМОГО НА ОЗЕРЕ БАЙКАЛ

Ключевые слова: озеро Байкал, сбор отходов с судов, танкер-бункеровщик экологического судно, содержание вредных веществ при сбросе стоков в водные объекты, нормы накопления сточных и нефтесодержащих вод, степень очистки сточных вод, судовые установки для очистки сточных и нефтесодержащих вод, вместимость приемных цистерн для сточных и нефтесодержащих вод, удельные характеристики оборудования для очистки сточных и нефтесодержащих вод.

Аннотация. В данной статье рассматривается вопрос предотвращения загрязнения озера Байкал судовыми сточными и нефтесодержащими водами. С этой целью определяется количество и состав этих вод на судах ПАО «ВСПИ». Для обеспечения экологической безопасности судов предлагается использование судна-сборщика сточных и нефтесодержащих вод с судов, оснащенного водоочистным оборудованием. В результате обработки данных по обслуживаемым сборщиком судам рассчитываются производительность установок для очистки сточных и нефтесодержащих вод сборщика, а также вместимость его цистерн для приема этих отходов. На основании анализа характеристик судового природоохранного оборудования даются рекомендации по выбору конкретных типов систем для очистки сточных и нефтесодержащих вод.

Байкал – озеро тектонического происхождения в южной части Восточной Сибири, самое глубокое озеро на планете, крупнейший природный резервуар пресной воды и самое большое пресноводное озеро по площади на континенте. В 1996 году Байкал был внесён в Список объектов всемирного наследия ЮНЕСКО.

Озеро Байкал является уникальной экологической системой, правовые основы охраны которой регулируются принятым в 1999 году Федеральным законом «Об охране озера Байкал» № 94–ФЗ от 01.05.99 [1]. В соответствии с данным федеральным законом на Байкальской природной территории установлен особый режим хозяйственной и иной деятельности, а утверждение перечня запрещённых видов деятельности делегировано правительству Российской Федерации. В соответствии с законом «Об охране озера Байкал» и постановлению правительства РФ № 643 от 30.08.01 «Об утверждении перечня видов деятельности, запрещенных в центральной экологической зоне байкальской природной территории» [2] запрещен сброс в водные объекты мусора, неочищенных сточных и нефтесодержащих вод с плавучих средств.

Целью выполненной работы являлось определение характеристик и типа оборудования экологического назначения танкера-бункеровщика-экологического судна, эксплуатируемого на озере Байкал и осуществляющего сбор с судов сточных (СВ),

нефтедержащих (НВ) вод и мусора. Для достижения этой цели было необходимо решить следующие задачи:

- установить условия сброса сточных и нефтедержащих вод с судов в озеро Байкал или условия сдачи этих вод на береговые приемные сооружения;
- определить количество и степень загрязнения такого вида отходов, образующихся на обслуживаемых сборщиком судах;
- рассчитать для наиболее характерных примесей, содержащихся в СВ и НВ, требуемые степени очистки при условии их сброса в водоем или передачи на береговые очистные сооружения;
- определить вместимость цистерн судна-сборщика для приема с судов сточных и нефтедержащих вод с учетом случайного характера их образования;
- определить производительность оборудования для обработки СВ и НВ судна-сборщика;
- выполнить анализ типовых установок для очистки нефтедержащих вод (ОНВ) и очистки и обеззараживания сточных вод (ООСВ) подходящей производительности, на основе которого предложить наиболее приемлемые варианты таких установок для оснащения ими судна-сборщика.

Существует два решения по сбору СВ, НВ и мусора с судов, находящихся в районе оз. Байкал:

- сдача отходов на судно-сборщик или в приемные пункты, организованные на причалах, и в последующем, очистка на существующих городских (поселковых) очистных сооружениях;
- сдача отходов с последующей очисткой на суда комплексной переработки отходов (СКПО).

Допустимые показатели вредных веществ в сточных водах при сбросе в оз. Байкал установлены в соответствии со статьей 13 Федерального закона № 94-ФЗ, а также с пунктами 5.2.36 и 5.2.37 Положения о Министерстве природных ресурсов и экологии Российской Федерации, утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 29 мая 2008 г. № 404 [3]. Некоторые из этих показателей приведены в таблице 1. В этой же таблице для сравнения показаны аналогичные показатели качества в водах водных объектов рыбохозяйственного значения, утвержденные приказом Минсельхоза РФ от 13.12.2016 г. № 552 [4].

Таблица 1

Допустимое содержание примесей в водных объектах рыбохозяйственного назначения и в стоках, сбрасываемых в оз. Байкал

Показатель	Допустимое содержание в водных объектах рыбохозяйственного назначения мг/дм ³	Допустимое содержание в стоках, сбрасываемых в оз. Байкал мг/дм ³
Взвешенные вещества	До 30,0	2,5
Сульфаты (SO ₄ ²⁻)	100,0	30,0
Хлориды (Cl ⁻)	300,0	28,0
Натрий (Na ⁺)	120,0	30,0
Калий (K ⁺)	До 50,0	10,0
Нитраты (NO ₂)	9,0	2,5
Нитриты (NO ₃)	0,05	0,05
Аммоний (NH ₄ ⁺)	0,5	0,3
Алюминий (Al, суммарно)	0,2	0,2
Железо (Fe, суммарно)	0,25	0,2
Медь (Cu, суммарно)	0,002	0,002

Показатель	Допустимое содержание в водных объектах рыбохозяйственного назначения мг/дм ³	Допустимое содержание в стоках, сбрасываемых в оз. Байкал мг/дм ³
Никель (Ni, суммарно)	0,014	0,014
Хром (Cr, суммарно)	0,09	0,013
Свинец (Pb, суммарно)	0,022	0,015
Ртуть (Hg, суммарно)	0,0001	0,0001
Нефтепродукты (суммарно)	0,05	0,022
Синтетические поверхностно-активные вещества (СПАВ)	0,01	0,01
БПК ₅	2,1	1,0

Кроме того, ограничивается максимально допустимая численность различных видов бактерий в сточных водах, сбрасываемых в озеро Байкал, а именно:

- термотолерантных колиформных бактерий – не более 100 КОЕ/100 мл;
- общих колиформных бактерий – не более 500 КОЕ/100 мл;
- колифагов – не более 10 КОЕ/10 мл.

Содержание возбудителей кишечных инфекций и паразитарных заболеваний людей (жизнеспособных яиц гельминтов – аскарид, власоглав, токсокар, фасциол, онкосферы тенид и жизнеспособных цист патогенных кишечных простейших) не допускается.

Из сравнения представленных показателей видно, что допустимое содержание вредных веществ в разрешенных к сбросу в озеро Байкал стоках значительно ниже предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения. Концентрации примесей в сточных водах, разрешенных к сбросу на внутренних водных путях в соответствии с Правилами предотвращения загрязнения с судов Российского Речного Регистра [5], оказываются еще более высокими. Таким образом, типовое оборудование для обработки судовых сточных и нефтесодержащих вод не обладает эффективностью очистки, необходимой для сброса этих видов судовых отходов непосредственного в озеро Байкал.

Для определения необходимой степени очистки судовых сточных и нефтесодержащих вод были рассмотрены характеристики судов ПАО «ВСПП», обслуживаемых судном-сборщиком. Список таких судов представлен в таблице 2, характеристики их указаны в соответствии с [6–8]. Среднесуточный объем образующихся на судах НВ $V_{НВ}$ определялся в соответствии с рекомендациями [5]. Суточный объем судовых СВ $V_{СВ}$ рассчитывался на основании указанных в [5] удельных норм накопления стоков в зависимости от типа судна. Минимальное значение среднесуточного количества СВ вычислялось при условии нахождения на судне только членов экипажа, максимальное – при полной загрузке судна пассажирами.

Таблица 2

**Список и характеристики судов ПАО «ВСПП»,
обслуживаемых судном-сборщиком отходов**

Наименование судна	Проект	Мощность главных двигателей, кВт	Экипаж, чел.	Пассажировместимость, чел.	Среднесуточный $V_{НВ}$, м ³	Среднесуточный $V_{СВ}$, м ³	
						При max загрузке	При min загрузке
Иван Бабушкин	331	224	16	100	0,14	0,39	0,05
Восход	352	736	4	71	0,27	0,25	0,013
Баргузин	19591	736	4	130	0,27	0,45	0,013

Наименование судна	Проект	Мощность главных двигателей, кВт	Экипаж, чел.	Пассажи- ровмести- мость, чел.	Средне- суточный $V_{\text{НВ}}, \text{ м}^3$	Среднесуточный $V_{\text{СВ}}, \text{ м}^3$	
						При max загрузке	При min загрузке
Метеор	342Э	1250	4	123	0,36	0,42	0,013
Комета	342М	1250	4	102	0,36	0,35	0,013
Святой Лука	РН-376	204	3	100	0,035	0,345	0,01
Дорожник	70240	958	3	-	0,32	0,4	0,4
Москва	Р-51Э	220	3	225	0,135	0,76	0,01
Семён Батаев	603А	224	6	-	0,12	0,466	0,466
Ольхонские ворота	603А	224	6	-	0,12	0,466	0,466
Аквилон	Р376У	110	4	12	0,034	2,134	0,53
Сокол	РН376У	110	4	12	0,034	2,134	0,53
Лебедь	РН376У	110	4	12	0,034	2,134	0,53
Николай Еро- шенко	Р-18А	882	18	42	0,27	8,0	2,4
Империя	PV01M	588	18	45	0,2	8,4	2,44
Александр Ве- ликий	ПТ258	588	15	30	0,2	6,0	1,97
Экологическое судно			9	-	0,18	0,81	0,81
Всего					3,1	33,91	10,66

С целью определения требуемой степени очистки судовых сточных и нефтесодержащих вод при условии сброса их в озеро, была выполнена оценка степени загрязнения этих вод нефтепродуктами и другими вредными веществами. Концентрация нефтепродуктов в судовых льяльных водах принималась в пределах от 0,5 до 10 г/л [9], концентрации загрязняющих веществ C_i , мг/л, в сточных водах определялись по выражению:

$$C_i = \frac{1000g_i}{q_i}, \quad (1)$$

где g_i – удельное количество загрязнений, попадающих в сточные воды от одного человека, г/(чел. · сутки);

q_i – удельное водопотребление, зависящее от типа судна, л/(чел. · сутки).

Необходимая степень очистки воды рассчитывалась по выражению:

$$\Xi = \left(\frac{C_{0i} - C_{1i}}{C_{0i}} \right) \cdot 100\%, \quad (2)$$

где C_{0i} и C_{1i} – концентрации примесей соответственно в исходной и очищенной воде, мг/л.

В результате были получены диапазоны и средние значения концентраций нефтепродуктов в НВ и некоторых вредных веществ в СВ судов, обслуживаемых сборщиком. Результаты расчета сведены в таблицу 3.

Таблица 3

**Концентрации загрязнений и требуемая степень очистки судовых НВ и СВ
при условии сброса их в оз. Байкал**

Показатели	Начальная концентрация, мг/л			Концентрация после очистки, мг/л	Степень очистки Э, %
	мин.	макс.	средняя		
Взвешенные вещества (ВВ)	514,3	24000	12257,15	2,5	99,60
БПК ₅	321,4	15000	7660,7	1,0	99,75
Азот аммонийных солей (NH ₄ ⁺)	53,6	2500	233,2	0,3	99,55
Синтетические поверхностно-активные вещества (СПАВ)	13,6	633,3	9,85	0,01	99,90
Нефтепродукты	500	10000	5250	0,022	99,99

Из представленной таблицы видно, что по всем рассмотренным показателям качества необходимо обеспечить степень очистки практически равную 100% для осуществления возможности сброса судовых НВ и СВ в оз. Байкал. Столь глубокая очистка стоков не может быть достигнута с использованием типовых судовых станций ОНВ и ООСВ и требует применения сложных технологий и оборудования, установка которого на судах затруднительна и экономически нецелесообразна ввиду малых объемов обрабатываемой воды. Поэтому для предотвращения загрязнения байкальской воды предлагается прием загрязненной воды с судов и ее предварительная очистка на оборудовании специального судна-сборщика и последующая сдача этой воды на береговые очистные сооружения.

В соответствии с решением «Об утверждении Правил приема производственных сточных вод в систему канализации г. Иркутска» от 10 июня 1991 года № 37/368 [10], допустимые концентрации химических веществ, содержащихся в сточных водах, поступающих на очистные сооружения г. Иркутска, не должны превышать значений, указанных в таблице 4.

Таблица 4

**Максимальные значения некоторых показателей качества сточной воды
при сдаче ее в канализационные сооружения г. Иркутска**

Показатель	Допустимое значение, мг/дм ³
Взвешенные вещества	60
БПК ₅	24
Аммоний (NH ₄ ⁺)	0,5
Синтетические поверхностно-активные вещества (СПАВ)	0,5
Нефтепродукты	0,6

Таким образом, концентрации примесей в стоках при сдаче их в береговые приемные сооружения значительно выше, чем при непосредственном сбросе в оз. Байкал, и они могут быть достигнуты путем обработки воды в судовых системах очистки.

К основным технологическим параметрам природоохранного оборудования судна-сборщика помимо требуемых показателей качества очищенной воды можно отнести производительность систем ОНВ и ООСВ, а также вместимость сборных цистерн для приема и временного хранения нефтесодержащих и сточных вод с судов.

На процесс образования судовых сточных вод влияет ряд случайных факторов. К ним относятся погодные условия (температура окружающего воздуха), количество людей на борту и физиологические особенности отдельных людей, давление в системе водоснабжения, состояние и регулировка водоразборной арматуры и др. Поскольку эти факторы являются независимыми, то можно сделать предположение о том, что распределение суточной величины водопотребления и, соответственно, объема образующихся сточных вод подчиняется нормальному закону [11–13]. Функция плотности распределения вероятности в этом случае будет иметь вид:

$$f(V_{\text{сут}}) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \left\{ -\frac{(V_{\text{сут}} - \bar{V}_{\text{сут}})^2}{2\sigma^2} \right\}, \quad (3)$$

где $\bar{V}_{\text{сут}}$ – среднее количество сточных вод, образующихся за сутки на обслуживаемых сборщиком судах, м³/сут;

σ – среднеквадратическое отклонение в функции распределения, м³/сут.

Так как функция плотности вероятности для нормального распределения является симметричной относительно ее среднего значения, то среднесуточное количество принимаемых сборщиком сточных вод можно вычислить по формуле

$$\bar{V}_{\text{сут}} = \frac{V_{\text{сут}}^{\min} + V_{\text{сут}}^{\max}}{2}, \quad (4)$$

где $V_{\text{сут}}^{\min}$ и $V_{\text{сут}}^{\max}$ – соответственно минимальный и максимальный объемы образующихся на судах сточных вод в соответствии с табл. 2.

Величина среднеквадратического отклонения случайной величины при нормальном ее распределении может быть получена на основании известного из теории вероятностей правила «трех сигм» [12, 13], гласящего, что если случайная величина распределена нормально, то модуль ее отклонения от среднего значения не превосходит 3σ . Это значит, что практически все значения случайной величины, распределенной по нормальному закону, укладываются в интервал $\bar{V}_{\text{сут}} \pm 3\sigma$. Следовательно, значение σ для сточных вод может быть достаточно точно найдено по выражению

$$\sigma = \frac{V_{\text{сут}}^{\max} - \bar{V}_{\text{сут}}}{3} = \frac{\bar{V}_{\text{сут}} - V_{\text{сут}}^{\min}}{3}. \quad (5)$$

На основании данных табл. 2 по формулам (4) и (5) были рассчитаны характеристики случайной величины суточного накопления на судах сточных вод:

- среднее значение $\bar{V}_{\text{сут}} = 22,39$ м³/сут;
- среднеквадратическое отклонение $\sigma = 3,88$ м³/сут.

На количество образующихся на обслуживаемых судах нефтесодержащих вод также оказывает влияние большое количество независимых случайных факторов, таких как техническое состояние общесудовых систем и систем энергетических установок, водотечность корпуса, конструктивные особенности судовых устройств и механизмов, проведение экипажем профилактического обслуживания и ремонта оборудования и т.д. В связи с этим, случайная величина суточного образования НВ на судах также будет описываться нормальной функцией распределения. При идеальном техническом состоянии судовых систем, устройств и механизмов, грамотной их эксплуатации и техническом обслуживании, образование льяльных вод на судне сводится практически к нулю. И наоборот, при плохом техническом состоянии судна и судово-

го оборудования, небрежной или неграмотной его эксплуатации, количество льяльных вод многократно возрастает.

В качестве средней величины количества образующихся на судах НВ было принято их суммарное значение в соответствии с табл. 1, в качестве минимального $V_{\text{сут}}^{\min} = 0$. Значение среднеквадратического отклонения также было определено по формуле (5). В результате были рассчитаны характеристики случайной величины суточного накопления на судах нефтесодержащих вод:

– среднее значение $\bar{V}_{\text{сут}} = 3,1 \text{ м}^3/\text{сут}$;

– среднеквадратическое отклонение $\sigma = 1,033 \text{ м}^3/\text{сут}$.

Вид функций плотности распределения случайных величин суточного объема сточных и нефтесодержащих вод показан на рис. 1 и 2.



Рис. 1. Плотность распределения образующихся за сутки сточных вод

Полученные значения случайных величин суточных объемов СВ и НВ, принимаемых сборщиком с судов ПАО «ВСП», позволяют определить вместимость соответствующих его цистерн для сбора и временного хранения этих отходов. В качестве этой вместимости были приняты суточные объемы сточных и нефтесодержащих вод, которые не будут превышены с вероятностью 95%. Эти объемы могут быть вычислены по известным формулам вероятности нахождения непрерывной случайной величины x в заданном интервале $[a, b]$:

$$P(a < x < b) = \int_a^b f(x) dx = F(b) - F(a),$$

где $F(x)$ – функция распределения случайной величины x .



Рис. 2. Плотность распределения образующихся за сутки нефтесодержащих вод

В нашем случае $a = V_{\min}$ – минимальное количество СВ или НВ, образующихся на обслуживаемых судах в течение суток; $b = V_{0,95}$ – суточное количество указанных отходов, которое не будет превышено с вероятностью 95%. Искомый объем $V_{0,95}$ может быть получен с помощью функции Лапласа из следующего выражения:

$$P(V_{\min} < V < V_{0,95}) = F(V_{0,95}) - F(V_{\min}) = \Phi\left(\frac{V_{0,95} - \bar{V}_{\text{сут}}}{\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{V_{\min} - \bar{V}_{\text{сут}}}{\sigma}\right). \quad (6)$$

После подстановки в выражение (6) значений минимальных и среднесуточных объемов, а также среднеквадратических отклонений соответственно для сточных и нефтесодержащих вод, были определены объемы этих вод, которые не будут превышены с вероятностью 95%. Полученные объемы составили:

- по сточным водам $V_{0,95} = 28,7 \text{ м}^3/\text{сут}$;
- по нефтесодержащим водам $V_{0,95} = 4,8 \text{ м}^3/\text{сут}$.

С учетом того, что полезный объем приемных цистерн судна-сборщика в процессе эксплуатации может уменьшаться за счет образования в них осадков, полную вместимость цистерн целесообразно увеличить примерно на 10% [9]. Поэтому полный объем приемных цистерн для проектируемого сборщика был принят равным $31,5 \text{ м}^3$ для сточных вод и $5,3 \text{ м}^3$ для нефтесодержащих вод.

Минимально необходимая производительность систем очистки как по нефтесодержащим, так и по сточным водам должна быть не менее среднесуточного количества этих вод, образующихся на обслуживаемых сборщиком судах. Фактическую их производительность следует увеличить на 10...20% по сравнению с минимальной для учета как запланированных, так и вынужденных перерывов в работе систем. Плановые остановки связаны с проведением работ по техническому обслуживанию, наладке водоочистного оборудования, замене расходных материалов и т.п. Внеплановые перерывы в работе могут быть вызваны различными неисправностями, приводящими к нарушению работоспособности оборудования и необходимости его ремонта.

На основе проведенных расчетов был выполнен анализ судовых установок ООСВ и ОНВ, имеющих свидетельства об одобрении Российского Речного Регистра [14], производительность которых удовлетворяют необходимым требованиям. Марки рассмотренных установок и их характеристики [15–21] приведены в табл. 5.

Таблица 5

Характеристики судовых установок для обработки сточных и нефтесодержащих вод

№ п/п	Марка установки	Производительность, м³/сут	Потребляемая мощность, кВт	Габаритные размеры L×B×H, м	Масса сухая/в рабочем состоянии, т
Установки для очистки и обеззараживания сточных вод					
1	Сток-30М	30,0	6,5	2,3×1,9×1,8	1,05/5,5
2	HAMANN HL-CONT PLUS 10	24,0	3,5	1,2×1,6×1,8	0,82/3,8
3	ACO Marine Clarimar MF-16	28,3	н/д	3,1×5,2×2,1	2,5/19,0
4	Evac ORCA IV 300	27,0	н/д	3,4×1,83×1,82	2,05/6,7
5	Evac MBR 30K	30,0	н/д	2,86×4,26×2,2	5,6/22,0
Установки для очистки нефтесодержащих вод					
1	RWO SKIT/S-DEB 0,25	6,0	2,0	1,05×0,77×1,12	0,185/0,265
2	RWO OWS-COM 0,25	6,0	2,6	0,97×0,75×1,01	0,18/н/д
3	YWC-0,25	6,0	3,4	1,0×0,6×1,25	0,3/0,45
4	Victor Marine CS0250	6,0	2,0	1,04×0,66×1,47	0,27/0,42

Примечание: «н/д» – нет данных.

Для выбора конкретной марки оборудования, рекомендуемой к установке на судне-сборщике отходов, был проведен расчет и анализ их удельных характеристик. В качестве таких характеристик были выбраны отношения к производительности установок потребляемой ими мощности, занимаемому ими объему и к их массе. В результате были получены удельные мощности, объемы и массы водоочистного оборудования, представленные на рис. 3 и 4.

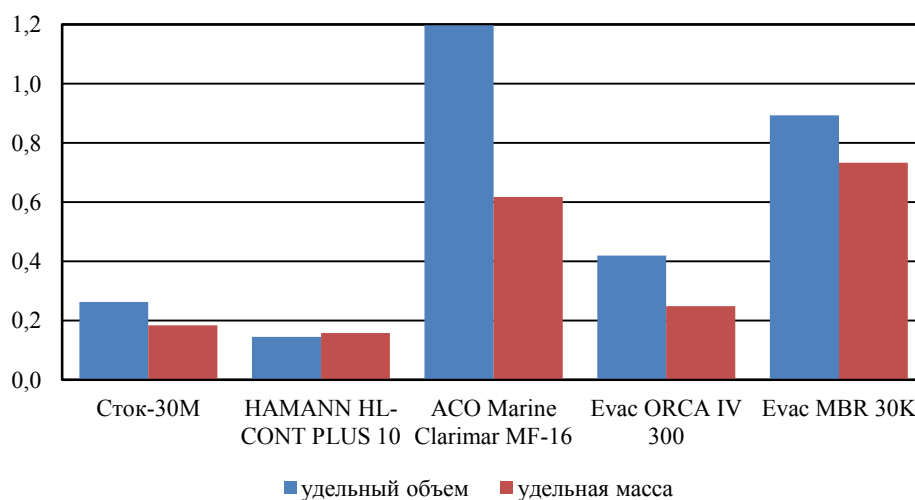


Рис. 3. Удельные характеристики судовых установок для обработки сточных вод

Поскольку для большинства рассматриваемых установок для очистки сточных вод отсутствовали данные по потребляемой мощности, расчет удельной мощности для этих установок не проводился. Сравнение удельных массогабаритных характеристик оборудования показывает, что наиболее предпочтительным является оснащение

судна-сборщика системой марки «HAMANN HL-CONT PLUS 10» немецкого производителя HAMANN AG. Несколько уступает ей отечественная система «Сток-30М», производимая компанией «Экос» из Санкт-Петербурга. Окончательный выбор может быть сделан на основе экономических расчетов, учитывающих как стоимость самих установок, так и стоимость их эксплуатации.

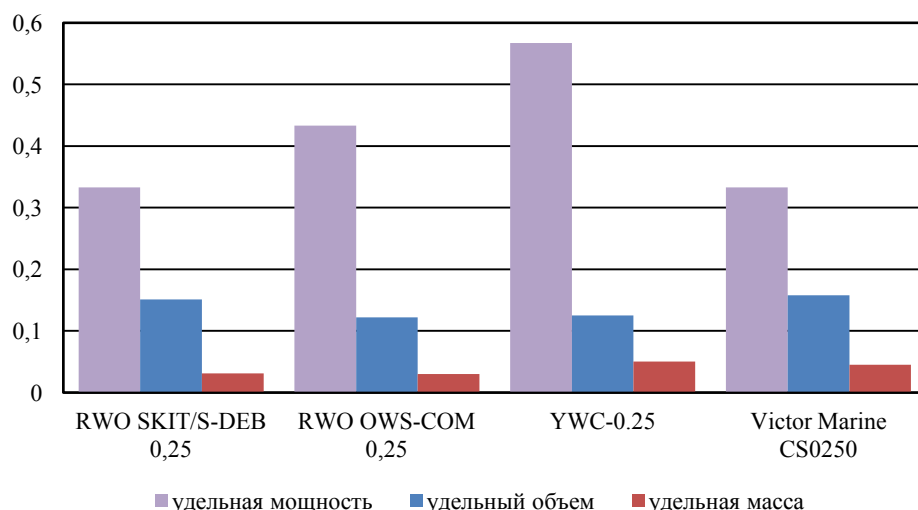


Рис. 4. Удельные характеристики судовых установок для очистки нефтесодержащих вод

Анализ характеристик, приведенных на рис. 4, говорит об отсутствии явных преимуществ у какой-либо системы. Оборудование компаний RWO и Victor Marine обладает сравнимыми удельными показателями. По совокупности характеристик наиболее предпочтительной для установки на судне является система SKIT/S-DEB 0,25 компании RWO (Германия). Однако окончательное решение необходимо принимать с учетом экономических показателей рассмотренных систем.

Таким образом, в результате выполненной работы был предложен способ предотвращения загрязнения оз. Байкал судовыми сточными и нефтесодержащими водами, заключающийся в приеме этих вод специализированным судном-сборщиком, их частичной очистке и последующей сдаче на береговые очистные сооружения г. Иркутска. Для рассматриваемого в работе судна-сборщика были определены необходимые емкости цистерн для приема СВ и НВ с судов, производительность оборудования ОНВ и ООСВ, а также даны рекомендации по выбору производителей и конкретных марок природоохранного оборудования.

Список литературы:

- [1] Федеральный закон «Об охране озера Байкал» от 01.05.1999 г. № 94-ФЗ. http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_22964/.
- [2] Постановление Правительства РФ от 30.08.2001 № 643 (ред. от 26.03.2018) «Об утверждении перечня видов деятельности, запрещенных в центральной экологической зоне Байкальской природной территории». http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_33195/.
- [3] Постановление Правительства РФ от 29.05.2008 № 404 (ред. от 13.03.2019) «О Министерстве природных ресурсов и экологии Российской Федерации». http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_77314/.
- [4] Приказ Министерства сельского хозяйства РФ от 13 декабря 2016 г. № 552 «Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов».

- рыбохозяйственного значения» (с изменениями и дополнениями). <https://base.garant.ru/71586774/>
- [5] Правила предотвращения загрязнения с судов Российского Речного Регистра. <https://www.rivreg.ru/docs/pravila2015/>.
- [6] ЦБНТИ Минречфлота. Справочник по серийным речным судам. Том 7. – М.: Транспорт, 1981. – 232 с.
- [7] ЦБНТИ Минречфлота. Справочник по серийным речным судам. Том 9. – М.: Транспорт, 1993. – 202 с.
- [8] ЦБНТИ Минречфлота. Справочник по серийным речным судам. Том 10. АО «Минибот». – М.: [б. и.], 1994. – 135 с.
- [9] Этин В.Л. Экология судоходства: конспект лекций: ч. 1,2. – Н. Новгород: «ВГАВТ», 2006. – 289 с.
- [10] Исполнительный комитет Иркутского городского совета народных депутатов Иркутской области. Решение «Об утверждении Правил приема производственных сточных вод в систему канализации г. Иркутска» от 10 июня 1991 года № 37/368. <http://docs.cntd.ru/document/801400250>.
- [11] Баврин И. И. Теория вероятностей и математическая статистика: Учебник / И.И. Баврин. – М.: Высш. шк., 2005. – 160 с.
- [12] Кибзун А.И., Горяинова Е.Р., Наумов А.В., Сиротин А.Н. Теория вероятностей и математическая статистика: Базовый курс с примерами и задачами. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. – 224 с.
- [13] Вадзинский Р.Н. Справочник по вероятностным распределениям. – СПб.: Наука, 2001. – 295 с.
- [14] Российский Речной Регистр. Свидетельства одобрения типовых изделий и материалов. <https://www.rivreg.ru/activities/sertizdmat/>.
- [15] Официальный сайт компании «Экос». <http://www.ekos.su/stok.html>.
- [16] Официальный сайт компании «Haman AG». <https://www.hamannag.com/sewage-treatment-plants/>.
- [17] ACO Clarimar® MF Sewage Treatment Plants. <http://www.acomarine.com/wp-content/uploads/ACO-Data-Sheet-Clarimar-MF-2016.pdf>.
- [18] EVAC wastewater treatment. <https://evac.com/solutions/wastewatertreatment/#tab-marine>.
- [19] Rwo DEB 0.25 Manuals. <https://www.manualslib.com/products/Rwo-Deb-0-25-8847421.html>.
- [20] OWS-COM Oily Water Separator. http://www.rwo.de/rwo/ressources/files/1/44523-RWO-Veolia-OWS_COM_8_2016_WEB.pdf.
- [21] Victor Marine CS0250. <https://www.victormarine.com/portfolio/cs0250/>.

SELECTION OF TYPE AND CAPACITY OF SHIP PLANTS FOR TREATMENT OF WASTE AND OILY WATER TANKER-BUNKER-ENVIRONMENTAL VESSEL, OPERATED ON LAKE BAIKAL

Vas'kin Sergey V., *Candidate of Engineering Science, of the Department
of Hydrodynamics, Ship Theory and Environmental Safety of Ships
Volga State University of Water Transport*

Leushova Irina E., *master student
Volga State University of Water Transport
5, Nesterov st, Nizhniy Novgorod, 603951*

Key words: lake Baikal, collecting of waste from vessels, tanker-bunker-ecological vessel, the content of harmful substances when discharging effluents into water bodies, the norms of accumulation of waste and oily water, the quality of wastewater treatment, ship plants for the treatment of waste and oily water, the capacity of receiving tanks for waste and oily water, the specific characteristics of equipment for the treatment of waste and oily water.

Annotation. This article addresses the issue of preventing pollution of Lake Baikal by ship waste and oily waters. For this purpose, the quantity and composition of these waters on the ships of PJSC «ESINC» is determined. To ensure the environmental safety of vessels, it is proposed to use the vessel collecting wastewater and oily water from vessels equipped with

water treatment equipment. As a result of processing the data for the vessels serviced by the collector, the productivity of installations for the treatment of waste and oily water of the collector, as well as the capacity of its tanks for receiving these wastes, are calculated. Based on the analysis of the characteristics of the ship's environmental equipment, recommendations are given on the choice of specific types of systems for the treatment of waste and oily water.

References:

- [1] Federal'nyj zakon «Ob ohrane ozera Bajkal» ot 01.05.1999 g. № 94-FZ. http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_22964/.
- [2] Postanovlenie Pravitel'stva RF ot 30.08.2001 № 643 (red. ot 26.03.2018) «Ob utver-zhdenii perechnya vidov deyatel'nosti, zapreshchennyh v central'noj ekologicheskoy zone Bajkal'skoj prirodnoj territorii». http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_33195/.
- [3] Postanovlenie Pravitel'stva RF ot 29.05.2008 № 404 (red. ot 13.03.2019) «O Minister-stve prirodnih resursov i ekologii Rossijskoj Federacii». http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_77314/.
- [4] Prikaz Ministerstva sel'skogo hozyajstva RF ot 13 dekabrya 2016 g. № 552 «Ob utver-zhdenii normativov kachestva vody vodnyh ob'ektov rybohozyajstvennogo znacheniya, v tom chisle normativov predel'no dopustimyh koncentracij vrednyh veshchestv v vodah vod-nyh ob'ektov rybohozyajstvennogo znacheniya» (s izmeneniyami i dopolneniyami). <https://base.garant.ru/71586774/>.
- [5] Pravila predotvrashcheniya zagryazneniya s sudov Rossijskogo Rechnogo Registra. <https://www.rivreg.ru/docs/pravila2015/>.
- [6] CBNTI Minrechflota. Spravochnik po serijnym rechnym sudam. Tom 7. – M.: Transport, 1981. – 232 s.
- [7] CBNTI Minrechflota. Spravochnik po serijnym rechnym sudam. Tom 9. – M.: Transport, 1993. – 202 s.
- [8] CBNTI Minrechflota. Spravochnik po serijnym rechnym sudam. Tom 10. AO «Minibot». – M.: [b. i.], 1994. – 135 s.
- [9] Etin V.L. Ekologiya sudohodstva: konspekt lekcij: ch. 1,2. – N. Novgorod: «VGAVT», 2006. – 289 s.
- [10] Ispolnitel'nyj komitet Irkutskogo gorodskogo soveta narodnyh deputatov Irkutskoj oblasti. Reshenie «Ob utverzhdenii Pravil priema proizvodstvennyh stochnyh vod v si-stemu kanalizacii g. Irkutsk» ot 10 iyunya 1991 goda № 37/368. <http://docs.cntd.ru/document/801400250>.
- [11] Bavrin I. I. Teoriya veroyatnostej i matematicheskaya statistika: Uchebnik / I.I. Bavrin. – M.: Vyssh. shk., 2005. – 160 s.
- [12] Kibzun A.I., Goryainova E.R., Naumov A.V., Sirotin A.N. Teoriya veroyatnostej i matematika-ticheskaya statistika: Bazovyy kurs s primerami i zadachami. M.: FIZMATLIT, 2002. – 224 s.
- [13] Vadzinskij R.N. Spravochnik po veroyatnostnym raspredeleniyam. – SPb.: Nauka, 2001. – 295 s.
- [14] Rossijskij Rechnoj Registr. Svidetel'stva odobreniya tipovyh izdelij i materialov. <https://www.rivreg.ru/activities/sertizdmat/>.
- [15] Official website of the company «Ecos». <http://www.ekos.su/stok.html>
- [16] Official website of the company «Haman AG». <https://www.hamannag.com/sewage-treatment-plants/>.
- [17] ACO Clarimar® MF Sewage Treatment Plants. <http://www.acomarine.com/wp-content/uploads/ACO-Data-Sheet-Clarimar-MF-2016.pdf>.
- [18] EVAC wastewater treatment. <https://evac.com/solutions/wastewatertreatment/#tab-marine>.
- [19] Rwo DEB 0.25 Manuals. <https://www.manualslib.com/products/Rwo-Deb-0-25-8847421.html>.
- [20] OWS-COM Oily Water Separator. http://www.rwo.de/rwo/ressources/files/1/44523-RWO-Veolia-OWS_COM_8_2016_WEB.pdf.
- [21] Victor Marine CS0250. <https://www.victormarine.com/portfolio/cs0250/>.

Статья поступила в редакцию 21.07.2019 г.

УДК 669.14.018.54

Глебов Владимир Васильевич, доцент, к.ф.м.н., ФГБОУ ВО «ВГУВТ»

Блинов Виктор Михайлович, профессор, д.т.н., ИМЕТ РАН

119334, г. Москва, пр. Ленинский, 49

Репин Федор Федорович, профессор, к.т.н., ФГБОУ ВО «ВГУВТ»

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Волжский государственный университет водного транспорта»

603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5.

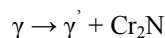
ВЛИЯНИЕ ГОРЯЧЕЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ И ТЕРМООБРАБОТКИ НА ОБРАЗОВАНИЕ НИТРИДОВ ХРОМА В СТАЛИ 05X22AG14H7M

Ключевые слова: нитриды хрома, прерывистый распад, высоко-азотистые стали, механические свойства, межкристаллитная коррозия.

Аннотация. Исследовано влияние режима горячей пластической деформации (ковки, прокатки) и термообработки на прерывистый распад аустенита с образованием нитридов хрома в стали 05X22AG14H7M. Методом трансмиссионной электронной микроскопии показано, что термомеханическая обработка стали 05X22AG14H7M приводит к формированию полигональной структуры, обеспечивающей сочетание высоких прочностных и пластических свойств. Термомеханическая обработка стали и ускоренное охлаждение с температуры окончания горячей пластической деформации позволяют предотвратить процесс формирования хрупких частиц нитрида хрома.

Аустенитные (немагнитные) азотсодержащие стали характеризуются сочетанием высокой прочности, повышенной пластичности и коррозионной стойкости, что позволяет рассматривать их как перспективный класс конструкционных материалов для изготовления ответственных деталей энергомашиностроения, судостроения и т.д. Однако при ковке или термообработке в структуре этих сталей с твердорастворным механизмом упрочнения при содержании азота ($> 0,4\%$) появляются характерные пластинчатые выделения нитридов хрома Cr_2N (так называемого «азотистого псевдоперлита») [1], которые образуются в результате прерывистого распада, происходящего путем миграции границ зерен. Кривые выделения нитридов хрома имеют С-образную форму (рис. 1), причем максимальная скорость процесса наблюдается при температуре $\sim 900\text{--}950^\circ\text{C}$, а верхняя часть кривой доходит до $t^\circ=1100^\circ\text{C}$.

Прерывистый распад в аустенитных азотсодержащих сталях происходит по реакции [3]



где γ – исходный (непревращенный) аустенит;

γ' – межпластинчатый (превращенный) аустенит; с образованием на границах зерен пластинчатых частиц нитрида хрома (ГПУ) Cr_2N разделенных прослойками γ аустенита (ГЦК) (рис. 2).

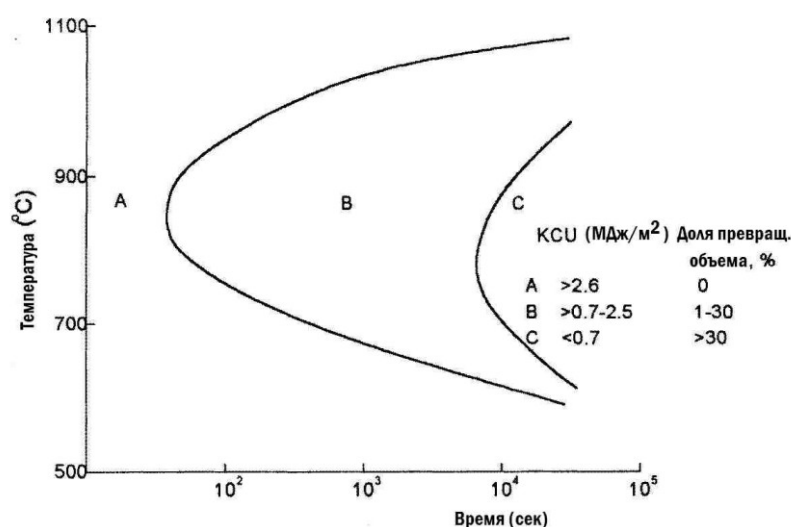


Рис. 1. Зависимость между ударной вязкостью и объемной долей ячеистой структуры в стали 05Х20Г14Н7МА70, после закалки от 1200°C и отжига при различных температурах. Области А, В и С соответствуют различным объемным долям перлитоподобной структуры, от которой зависят значения ударной вязкости [2].

Согласно [3] твердость ячеек, содержащих γ' и пластины Cr_2N в $\sim 1,5$ раза выше, чем исходной матрицы γ . Это приводит к существенному снижению пластичности, ударной вязкости, а также падению качества сварного соединения стали.

Для снижения отрицательного воздействия прерывистого распада на механические свойства стали, можно ввести в состав стали ванадий, который приводит к смене механизма прерывистого распада на непрерывный за счет эффекта дисперсионного твердения с образованием нитридов ванадия (VN) [4]. Также можно применить термомеханическую обработку стали, заканчивая её при температуре выше температуры начала реакции прерывистого распада, но ниже температуры рекристаллизации аустенита [5].

Целью данной работы было исследование влияния горячей пластической деформации и термообработки на структуру и свойства стали для выбора наиболее эффективного способа устранения последствий прерывистого распада на коррозионно-механические свойства [5].

Структура литой стали (без термообработки) характеризуется большим количеством выделений нитридов хрома по границам зерен. Наличие выделений Cr_2N обуславливает сильную склонность литой стали к межкристаллитной коррозии (МКК) и пониженную пластичность.

После закалки стали с 1050°C характер выделений изменяется: по границам зерен они в основном растворяются и становятся не такими интенсивными, но появляются обильные точечные выделения в объеме зерна.

Сталь, подвергнутая ковке в интервале 1200–1000°C обладает аустенитной структурой с размером зерна 30–100 мкм. В теле зерна выделения Cr_2N практически отсутствуют, но на границах находятся скопления нитридов (рис. 2а), которые образовались при охлаждении стали с температурыковки в районе 950°C, и при этом сталь склонна к МКК. При охлаждении с температурыковки в воду выделения по границам зерен практически не образуются и их количество незначительно (рис. 2б), в результате сталь не склонна к МКК.

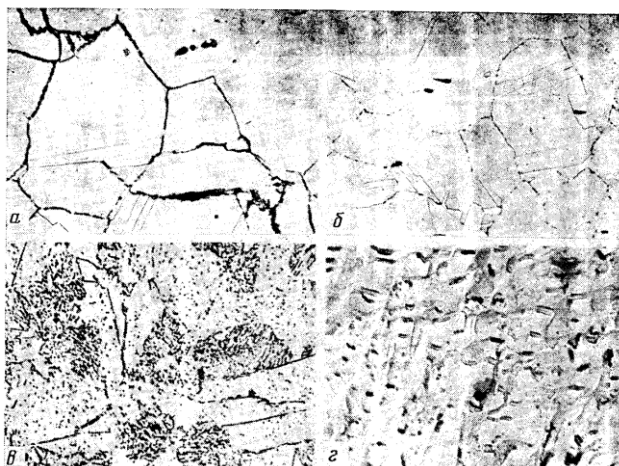


Рис. 2. Микроструктуры ($\times 300$) ковальной стали с содержанием азота 0,73%:
а – охлаждение с температуройковки на воздухе; б – то же, но в воде;
в – то же, что а, с последующей термообработкой при 1050 °С и охлаждением
в воде; г – нитридные выделения в изломе ($\times 4000$) после термообработки
при 1050 °С с охлаждением на воздухе, KCV = 0,55 МДж/м² [1]

В зависимости от температуры закалки существенно изменяется как характер распределения, так и размеры нитридов хрома. После закалки с 1050°С количество нитридов уменьшается, наблюдаются точечные выделения нитридов в теле зерна и редкие колонии азотистого псевдоперлита, растущие от границ зерен (рис. 2в). Практически так же выглядит структура стали, закаленной с 1100°С, и только после закалки с 1150°С в воду нитриды хрома растворяются полностью и при этом ударная вязкость существенно возрастает. После охлаждения на воздухе независимо от температуры нагрева под закалку в структуре стали наблюдаются выделения нитридов по границам зерен, что снижает ударную вязкость стали (рис. 2г).

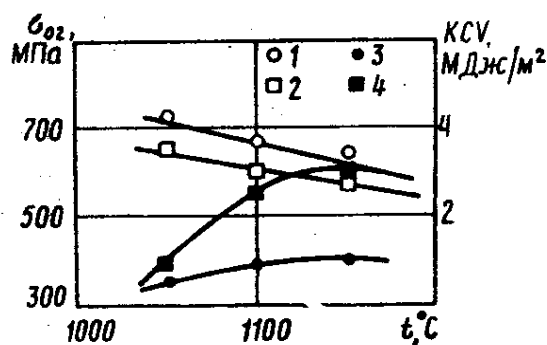


Рис. 3. Зависимость предела текучести (1, 2) и ударной вязкости (3, 4) ковальной стали от температуры термообработки:
1, 3 – охлаждение на воздухе; 2, 4 – охлаждение в воде [1].

На рис. 3 приведены значения механических свойств стали в зависимости от температуры закалки при охлаждении в воде и на воздухе. Повышение температуры закалки позволяет существенно увеличить ударную вязкость, но при этом снижается предел текучести.

Механические свойства после термообработки для сталей ряда плавов приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Механические свойства опытных плавов сталей
типа 05X22AG14H7M**

Номер плавки	N, масс. %	Режим термообработки	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %	KCV, МДж/м ²
5	0,64	а	1013	612	46,8	63,0	2,28
7	0,74	а	1047	646	41,4	44,8	0,96
8	0,38	а	876	515	50,5	70,4	3,22
9	0,57	а	1015	617	41,5	58,6	2,02
10	0,55	а	969	693	38,0	63,5	2,10
11	0,73	а	1001	692	36,1	53,8	1,18
11	0,73	б	943	637	59,4	50,9	0,91
11	0,73	б+а	953	588	52,6	55,3	1,52
12	0,61	в+а	998	625	46,0	54,5	0,99
12	0,61	в	990	669	50,3	67,8	2,65

а – закл. 1050°C, 2 ч., вода;

б – охлажд. послековки на воздухе;

в – охлажд. послековки в воде.

Из приведенных данных видно, что для плавов, содержащих более 0,7% N, уровень свойств близок к уровню свойств нержавеющей стали аустенито-мартенситного класса 08X17H6T [6,7], применяемой для изготовления тяжелонагруженных деталей (например, крыльевых устройств и гребных валов СПК).

Таблица 2

Влияние режима термообработки на механические свойства стали 08X17H6T

Обозначение	Режим термообработки	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %
1.1	Закл. 1150°C, 5 ч, вода	1050	810	17,3	49,4
1.2	Закл. 950°C, 5 ч, вода	1100	850	17,0	48,8

При температурах закалки 1150°C и выше (рис. 3) уровень ударной вязкости азотсодержащих сталей приближается к уровню аустенитных нержавеющей сталей без азота (> 2 МДж/мм²), однако при этом значения предела текучести у азотсодержащих сталей превышают 550 МПа, что в 2–2,5 раза больше, чем у стали типа X18H10T.

Проведенные исследования позволяют сделать вывод о том, что устранить отрицательное влияние прерывистого распада на механические свойства стали можно, обеспечив окончание термомеханической обработки при температуре выше температуры начала реакции прерывистого распада (~ 1050 – 1100°C), но ниже температуры рекристаллизации аустенита ($\sim 1150^\circ\text{C}$), при этом охлаждение заготовки рекомендуется проводить в воде [1,5].

В результате горячей прокатки при 1100°C с суммарной степенью обжатия $\sim 60\%$ в структуре высоко-азотистой аустенитной стали 05X22AG14H7M происходит фор-

мирование развитой полигональной структуры со средним размером полигона 0,5–0,7 мкм, которые занимают практически весь объем зерен (рис. 4) [8].

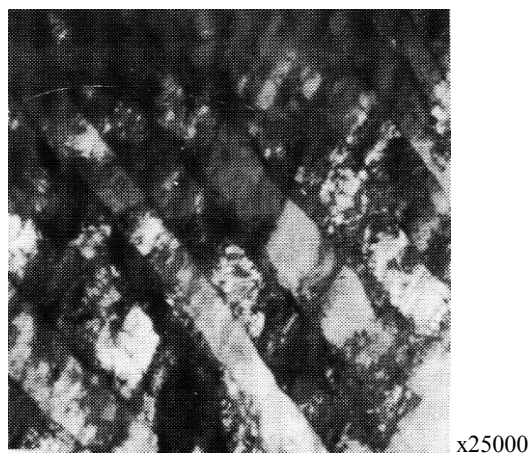


Рис. 4. Полигональная структура в стали 05X22AG14N7M [8], сформированная прокаткой при 1100°C.

Образование такой полигонизованной структуры высокоазотистой стали обеспечивает хорошее сочетание повышенной прочности и пластичности, а также ударной вязкости [8]. Легирование стали ванадием часто приводит к охрупчиванию стали в околошовной зоне сварного соединения из-за образования крупных частиц VN и снижению коррозионных характеристик [9].

Список литературы:

- [1] Глебов В.В., Тюсина Н.М., Каленихин Ю.Н., Пойменов И.Л., Блинов В.М., Пермитин В.Е. «Высокопрочная немагнитная сталь для тяжело нагруженных деталей транспортного машиностроения», Известия АН СССР, сер. Металлы, №1, 1989, с.157-163.
- [2] Valentin G. Gavriljuk, Hans Berns, «High Nitrogen Steels: structure, properties, manufacture, applications», Springer, 1999.
- [3] F. Vanderschaeve, R. Taillard, J. Fost, «Discontinuous precipitation of Cr₂N in a high nitrogen, chromium-manganese austenitic stainless steel», Journal of materials science, 30 (1995), p. 6035–6046.
- [4] Банных О.А., Блинов В.М., Костина М.В., Блинов Е.В., Калинин Г.Ю., «Влияние режимов горячей прокатки и термической обработки на структуру, механические и технологические свойства аустенитной азотосодержащей стали 05X22AG15N8M2Ф-Ш», //Металлы, №4, 2006, с. 1–14.
- [5] Березовская В.В., Меркушкин Е.А. «Особенности распада пересыщенного γ-твердого раствора в Cr-Mn высокоазотистых аустенитных сталях при нагреве», Вестник Тамбовского университета. Серия Естественные и технические науки, 2016. Т. 21, вып. 3. Физика, с. 897–900.
- [6] ГОСТ 5632-2014 «Легированные нержавеющие стали и сплавы коррозионно-стойкие, жаро-стойкие и жаропрочные. Марки», М.,Стандартинформ, 2015.
- [7] Глебов В.В., Пушин В.Г., Блинов В.М. «Влияние термообработки на структуру и свойства стали 08X17H6Т», Труды международного конгресса «Великие Реки-2015», секция XI, с. 39–46.
- [8] Блинов В.М., Пойменов И.Л., Куликова О.И., Карелин Ф.Р., Шурыгина И.А., Глебов В.В., Каленихин Ю.Н. «Влияние горячей деформации на структуру и механические свойства высокоазотистых немагнитных сталей», Структура и физико-механические свойства немагнитных сталей, «Наука», М., 1986, с.30-33.
- [9] Банных О.А., Блинов В.М. «Дисперсионно-твердеющие немагнитные ванадийсодержащий стали», «Наука». М., 1980, 190 с.

EFFECT OF HOT PLASTIC DEFORMATION AND HEAT TREATMENT ON THE PROCESS OF FORMATION OF CHROMIUM NITRID IN STEEL 05H22AG14N7M

Glebov Vladimir V., Candidate of Engineering Science, Associate Professor
Volga State University of Water Transport

Blinov Victor M., doctor of Engineering Science, Professor IMET RAS
49, Lenin av., Moscow, 119334

Repin Fedor F., Candidate of Engineering Science, Professor
Volga State University of Water Transport
5, Nesterov st, Nizhniy Novgorod, 603951

Keywords: chromium nitrides, discontinuous decomposition, high-nitrogen steels, mechanical properties, intergranular corrosion.

The effect of heat treatment and hot plastic deformation on the formation of chromium nitrides in steel 05H22AG14N7M was investigated.

References

- [1] Glebov V.V., Tusina N.M., Kalenikhin Yu.N., Poymenov I.L., Blinov V.M., Permitin V.E. «High-strength non-magnetic steel for heavily loaded parts of transport engineering», Izvestiya AN SSSR, ser. Metals, No. 1, 1989, pp.157-163.
- [2] Valentin G. Gavriljuk, Hans Berns, «High Nitrogen Steels: structure, properties, manufacture, applications», Springer, 1999.
- [3] F. Vanderschaeve, R. Taillard, J. Fost, «Discontinuous precipitation of Cr 2N in a high nitrogen, chromium-manganese austenitic stainless steel», Journal of Materials Science, 30 (1995), p. 6035–6046.
- [4] O.A. Banniy, V.M. Blinov, M.V. Kostina, E.V. Blinov, G.Yu., Kalinin. «The influence of hot rolling and heat treatment on the structure, mechanical and technological properties of austenitic nitrogen-containing steel 05H22AG15N8M2F-Sh», // Metals, No. 4, 2006, p. 1–14.
- [5] V.V. Berezovskaya, E.A. Merkushev, «Features of the decomposition of supersaturated γ -solid solution in Cr-Mn high-nitrogen austenitic steels when heated», Tambov University Bulletin. Series of Natural and Technical Sciences, 2016. Vol. 21, no. 3. Physics, p. 897–900.
- [6] GOST 5632-2014 «Alloyed stainless steels and alloys corrosion-resistant, heat-resistant and heat-resistant. Stamps, M., Standardinform, 2015.
- [7] Glebov V.V., Pushin V.G., Blinov V.M. «The influence of heat treatment on the structure and properties of steel 08X17H6T», Proceedings of the international congress «Great Rivers 2015», section XI, pp. 39–46.
- [8] Blinov V.M., Poymenov I.L., Kulikova O.I., Karelin F.R., Shurygina I.A., Glebov V.V., Kalenikhin Yu.N. «The effect of hot deformation on the structure and mechanical properties of high-nitrogen nonmagnetic steels», Structure and physico-mechanical properties of non-magnetic steels, «Nauka», M., 1986, p.30–33.
- [9] Banniy O.A., Blinov V.M. «Dispersion-hardening non-magnetic vanadium-containing steel», «Science». M., 1980, 190 p.

Статья поступила в редакцию 20.06.2019 г.

УДК 629.124.791

Калинина Надежда Викторовна, к.т.н., доцент кафедры «Кораблестроение и авиационная техника» ФГБОУ ВО «НГТУ»

e-mail: nvk5133@mail.ru

Солдаткин Олег Борисович, к.т.н., доцент кафедры «Атомные и тепловые станции» ФГБОУ ВО «НГТУ»

e-mail: gdanovet@yandex.ru

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева» (ФГБОУ ВО «НГТУ»),
603950, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24

ТЕОРЕТИКО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ СОСТОЯНИЯ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА НА ХОДКОСТЬ СУДОВ В УСЛОВИЯХ ПРОДЛЕННОЙ НАВИГАЦИИ

Ключевые слова: натурные испытания ледокола, измерительный комплекс, коэффициент трения корпуса судна о лед, состояние ледяного покрова, ледовая ходкость, кривая ледопроеходимости.

Аннотация. Представлены результаты натурных экспериментов, проводимых на ледоколе «Капитан Зарубин», по определению коэффициента трения корпуса судна о пресноводный ледяной покров для различных условий эксплуатации на реке Волга. Описана методика проведения эксперимента и измерительный комплекс. Выполнены расчеты ледовой ходкости для ледокола проекта 1105 с использованием полученных данных экспериментальных исследований по существующим полумпирическим моделям при движении непрерывным ходом и набегам. Продемонстрировано, что состояние ледяного покрова сильно влияет на ледовую ходкость судов при движении непрерывным ходом, ведет к снижению предельной ледопроеходимости и незначительно при движении набегам. Результаты экспериментальных исследований можно использовать для прогнозирования ледовой ходкости как существующих, так и проектируемых судов.

Введение

В России, имеющей замерзающие внутренние водные пути, всегда уделялось большое внимание проблеме продления навигации. Необходимость продления навигации ставит задачу разрушения ледяного покрова в замерзающих портах, заливах и бухтах, при прокладке каналов во льду, для более раннего вскрытия рек и водохранилищ. В периоды ледохода и ледостава для предотвращения опасности наводнений иногда приходится разрушать ледяные заторы и зажоры. Вопросы ледовой ходкости судов в настоящее время вызывают все больший и обоснованный интерес в связи с началом реализации программы обеспечения круглогодичной навигации Северного морского пути с заходом в устья рек, впадающих в Северный ледовитый океан.

Но плавание во льдах характеризуется существенными отличиями в методах управления судном по сравнению с плаванием по чистой воде и требует от судоводителя специальных знаний. Для успешного ледового плавания судоводитель должен иметь по возможности более обширную информацию о ледовых условиях [1, 2], так как ледопроеимость судна будет зависеть от конкретных навигационных характеристик ледяного покрова, условий его формирования. Поэтому экспериментальные исследования ледовой ходкости являются актуальными [3, 4].

1. Методика проведения эксперимента и измерительный комплекс

Одной из важных навигационных характеристик льда является заснеженность [3] – степень покрытия поверхности льда снегом. Наличие снега на поверхности льда как бы увеличивает его толщину, изменяет коэффициент трения льда о корпус ледокола и неблагоприятно сказывается на ледопроеходимости [6].

В реальных условиях эксплуатации бесснежный ровный лед встречается крайне редко, поэтому для прогнозирования ледовой ходкости в заданных ледовых условиях необходимо учитывать взаимодействие корпуса судна со льдом [7, 8]. Это можно оценить при помощи коэффициента трения наружной обшивки корпуса судна со льдом, который колеблется в достаточно широких пределах и обусловлен не только состоянием поверхности корпуса [9], но и состоянием ледовой среды [1].

Экспериментальные натурные исследования по определению коэффициента трения наружной обшивки корпуса судна об лед были проведены с участием сотрудников Нижегородского государственного технического университета весной на борту ледокола проекта 1105 «Капитан Зарубин» во время эксплуатации на реке Волга.

Ледокол «Капитан Зарубин» (рис. 1) является последним линейным ледоколом в серии из шести ледоколов проекта 1105, которая была построена по заказу СССР на верфи Wärtsilä (с 2012 года Arctech Helsinki Shipyard), Хельсинки, Финляндия. Суда серии названы в честь выдающихся советских капитанов. В данную серию также входят ледоколы: «Капитан Чечкин», «Капитан Плахин», «Капитан Букаев», «Капитан Чадаев», «Капитан Крутов» [10].



Рис. 1. Ледокол «Капитан Зарубин»

Линейные ледоколы проекта 1105 относятся к типу «река-море», способны работать во льду толщиной до 1 метра, оборудованы буксирным гаком. Суда предназначены для работы в морских портах юга, запада и севера России. Они эксплуатируются на Волге, Неве, на Азовском море, в Финском заливе Балтийского моря.

Ледоколы проекта 1105 используются для осуществления проводки караванов судов в условиях сложной ледовой обстановки, а также в качестве портовых ледоколов. Все шесть ледоколов в настоящее время находятся в эксплуатации.

Основные характеристики ледокола проекта 1105 «Капитан Зарубин» приведены в табл. 1 [10].

Для определения коэффициента трения было разработано, изготовлено и установлено на ледоколе устройство в виде ферменной конструкции со стальной «лыжей» на конце. Устройство и схема его крепления показаны на рис. 2. Ферменная облегченная конструкция 1, длина которой 5,3 м, изготовлена из алюминиевого профиля, прикреплена к фальшборту в районе мидель-шпангоута при помощи специального шарнирного соединения 3 тремя струбинами. Для осуществления измерений во время движения ледокола ферма 1 при помощи фала 2 поднималась и опускалась на лед за счет шарнирной конструкции 3. На другом конце ферменной конструкции 1 при помощи

шарнира 4 крепилась стальная «лыжа» 6, оснащенная силоизмерительной пружиной повышенной жесткости 5. «Лыжа» представляет собой стальной лист толщиной 2 мм размерами 500×700 мм с одним подогнутым краем. Прилегающая ко льду и снегу сторона «лыжи» была выкрашена судовой нитроэмалью в два слоя для имитации элемента судовой поверхности.

Таблица 1

Основные характеристики ледокола проекта 1105 «Капитан Зарубин»

№ п/п	Характеристика	Значение
	Класс судна по Российскому Речному Регистру	✱М-СП 3,5 (ледокол)
	Длина по КВЛ $L_{\text{КВЛ}}$, м	71,00
	Ширина судна B , м	16,00
	Высота борта H , м	4,8
	Максимальная осадка T , м	3,50
	Минимальная осадка без дифферента, м	3,25
	Водоизмещение D , т	2240
	Коэффициент общей полноты δ	0,610
	Мощность главных двигателей N , кВт	4650
	Скорость на чистой воде v , км/ч / м/с	25,7 / 7,10
	Тяга на швартовах, кН	414
	Предельная ледопроходимость, м	0,75
	Автономность, сутки	20
	Двигатель	3 ВФШ
	Площадь зоны облегаия льдом, м ²	510

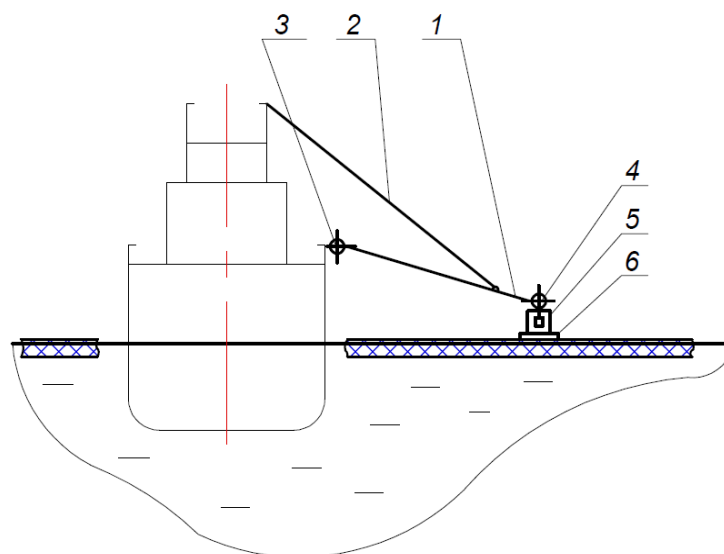


Рис. 2. Устройство для определения коэффициента трения и схема его крепления на судне: 1 – ферменная конструкция; 2 – фал; 3 – шарнирное устройство; 4 – шарнир; 5 – силоизмерительная пружина повышенной жесткости; 6 – стальная «лыжа»

Силоизмерительная пружина повышенной жесткости 5 снабжена датчиком ДУ-5С, реагирующим на ее деформацию. Сигнал с обмоток датчика ДУ-5С поступал на аппаратуру ВИ6-6ТН и после усиления регистрировался на фотобумаге осциллографа К12-22. Определение силы тяжести, действующей на спускаемую конструкцию и градуировка силоизмерительного датчика производились образцовым динамометром.

Методика проведения измерений заключалась в следующем:

- во время остановки ледокола производилась градуировка датчика усилий;
- во время движения ледокола выбирался ровный участок на поверхности льда и на него опускалась ферменная конструкция с «лыжей»;
- во время опускания «лыжи» и ее движения по поверхности льда или снега производилась запись силы сопротивления на осциллограф К12-22 и скорости движения;
- при появлении на поверхности льда неровных или заторошенных участков «лыжа» поднималась над ледовой поверхностью.

Далее цикл повторялся.

В результате обработки экспериментальных данных, полученных с осциллограмм, определялась горизонтальная сила $F_{тр}$, принимаемая за силу трения. Коэффициент трения f определялся с использованием следующей зависимости:

$$f = \frac{F}{F_{тр}},$$

где f – коэффициент трения стали о лед;

F – вертикальная сила;

$F_{тр}$ – сила трения стали о лед.

2. Результаты натурных экспериментальных исследований

Определение коэффициента трения по указанной методике производилось для различных состояний ледовой поверхности.

В период натурных наблюдений и проведения экспериментов на реке Волга были зафиксированы следующие разновидности состояния ледяной поверхности:

- лед со снегом с тонкой прослойкой воды;
- свежеснеженный сухой снег на ледяном покрове при отрицательных температурах;
- свежая сухая наледь после ночного мороза на ледяном покрове;
- лед с сырым свежим снегом;
- талый снег на поверхности льда;
- гладкий лед с прослойкой воды.

Необходимо отметить, что чистого льда в процессе эксперимента практически не наблюдалось.

Чаще всего зимой наблюдался лед, покрытый снегом, а также ледяной покров композитной структуры: лед, прослойка смерзшегося снега и свежий снег. Наиболее вероятные для весны толщины композитного ледяного покрова следующие: лед – 60%; смерзшийся снег – 25%; свежий снег – 15%. Под смерзшимся снегом понимается мокрый снег, который при отрицательных температурах превратился в «рыхлый» лед, меньшей плотностью и с большим коэффициентом трения, чем обычный лед. Причем смерзшийся снег «припавается» к основному льду, но при разрушении, во время взаимодействия с корпусом ледокола, легко отслаивается и в канале присутствуют обломки как льда, так и смерзшегося снега.

Результаты экспериментальных исследований получены в ходе сопутствующего натурного эксперимента для описанных выше условий при движении ледокола с разными скоростями; они систематизированы и приведены в табл. 2.

По результатам экспериментальных исследований можно сделать следующие выводы.

Ледяной покров в различном состоянии имеет различные коэффициенты трения с корпусом судна. Наличие снега на льду увеличивает коэффициент трения. Скорость движения судна также влияет на коэффициент трения. Чем больше скорость, тем больше коэффициент трения. Практически бесснежный лед имеет коэффициент трения 0,149; лед со свежавывавшим снегом – 0,172; лед с сырым свежим снегом – 0,297.

Таблица 2

Результаты экспериментальных исследований коэффициента трения льда о корпус судна

№ п/п	Ледовые условия	Скорость движения ледокола, м/с	Коэффициент трения f , измеренный в ходе эксперимента	Средний коэффициент трения f
	Лед со снегом с тонкой прослойкой воды	1,2÷1,3	0,238; 0,262; 0,262; 0,240; 0,213; 0,213; 0,229; 0,221; 0,213;	0,232
	Свежавывавший сухой снег на ледяном покрове	1,2÷1,3	0,140; 0,100; 0,120; 0,100; 0,120	0,116
	Свежавывавший сухой снег на ледяном покрове	2,5÷2,7	0,170; 0,160; 0,200; 0,190; 0,140	0,172
	Свежая сухая наледь после ночного мороза на ледяном покрове	1,2÷1,3	0,140; 0,130; 0,130; 0,160; 0,150; 0,190; 0,120; 0,170	0,149
	Лед с сырым свежим снегом	1,0÷1,3	0,260; 0,280; 0,340; 0,300; 0,300; 0,300	0,297
	Талый снег на поверхности льда	1,0÷1,3	0,210; 0,200; 0,190; 0,190; 0,120; 0,150; 0,130	0,170
	Гладкий лед с прослойкой воды	1,3÷1,5	0,120; 0,150; 0,130	0,133

3. Теоретические исследования ледовой ходкости

Полученные результаты экспериментальных исследований использованы для расчета ледовой ходкости на примере ледокола проекта 1105 «Капитан Зарубин».

Расчеты проведены для различных режимов движения ледокола: установившееся движение носом во льдах, толщина которых меньше предельной; работа набегам при преодолении восторженных участков и ледовых перемычек с толщиной льда больше предельной.

Для оценки ходкости ледокола в таких условиях были использованы полуэмпирические модели чистого ледового сопротивления при движении непрерывным ходом с установившейся скоростью [11] и средней скорости движения набегам [12, 11], полученные с учетом реальной физико-механической картины разрушения ледяного покрова судами на основе теоретико-экспериментальных исследований в Нижегородском государственном техническом университете [12, 13, 14].

Указанные модели учитывают не только главные размерения судна (табл. 1), но и форму корпуса путем введения безразмерных функций геометрии [11], физико-механические характеристики льда и снега.

Тяга ледокола на гаке аппроксимирована выражением [11]:

$$P_r = P_{\text{ш}} \left[1 - 0,4 \left(\frac{v}{v_0} \right) - 0,6 \left(\frac{v}{v_0} \right)^2 \right],$$

где $P_{\text{ш}}$ – тяга ледокола на швартовых, кН; v – скорость ледокола в текущий момент времени, м/с;

v_0 – скорость движения на чистой воде при заданной мощности, м/с.

Достижимая скорость судна v определяется из совместного решения уравнений $P_r = R$, где $P_r = P_e - R_b$ – тяга на галке (называемая по аналогии с буксирами), определяется как разность между полезной тягой движителей P_e и сопротивлением воды R_b при данной скорости движения.

Все характеристики снега зависят от его плотности, но вместе с тем плотность снега в высшей степени изменчива от 0,100 до 0,700 т/м³. Плотность снега, находящегося на ледяном покрове, зависит от «истории» его образования, включая все метеорологические факторы, температуру, наличия воды и др. и составляет 0,100 т/м³ для рыхлого свежеснежавшего, 0,700 т/м³ для сырого лежалого. С течением времени плотность снега под влиянием собственного веса, давления вновь образующихся слоев и уплотняющего действия ветра постепенно увеличивается и достигает в среднем 0,300 т/м³.

В расчетах использованы среднестатистические характеристики однолетнего речного льда с характеристиками [15]: плотность льда $\rho_{\text{л}}=0,900$ т/м³; плотность воды $\rho=1,000$ т/м³; коэффициент Пуассона $\mu=0,33$; модуль упругости $E=5 \cdot 10^6$ кПа; коэффициент трения ледяной поверхности без снега о наружную обшивку корпуса судна $f=0,149$.

Снег на ледяном покрове учитывался толщиной 0,1 м со следующими характеристиками:

- свежеснежавший сухой плотностью $\rho_{\text{сн}}=0,100$ т/м³, коэффициент трения ледяной поверхности о наружную обшивку корпуса судна $f=0,172$;
- свежеснежавший сырой плотностью $\rho_{\text{сн}}=0,300$ т/м³, коэффициент трения ледяной поверхности о наружную обшивку корпуса судна $f=0,297$;

Результаты расчетов чистого ледового сопротивления для различных ледовых условий приведены на рис. 3, 4, 5.

Кривые ледопроеходимости при движении непрерывным ходом и набегам приведены на рис. 6.

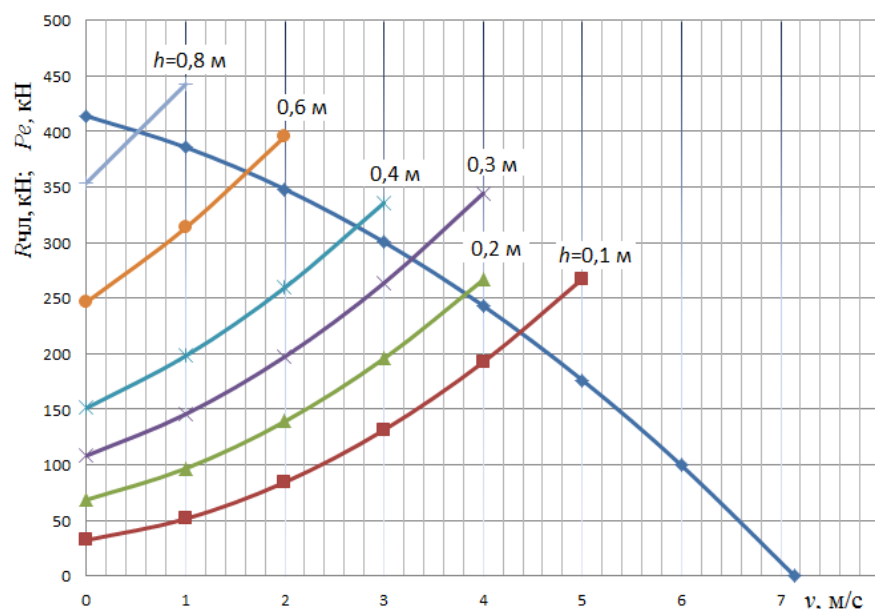


Рис. 3. Кривые чистого ледового сопротивления в бесснежном льду различной толщины для ледокола проекта 1105 «Капитан Зарубин» ($f=0,149$)

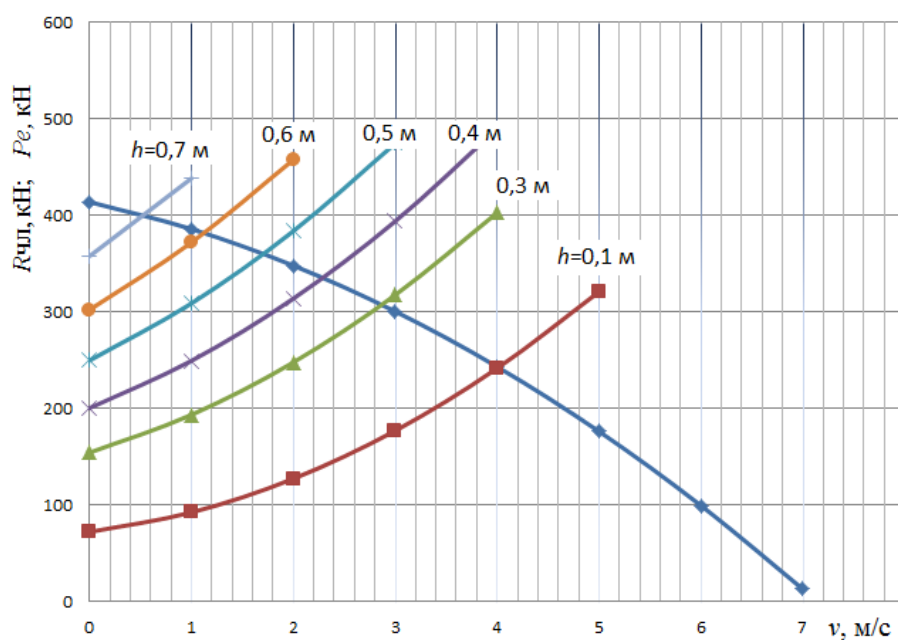


Рис. 4. Кривые чистого ледового сопротивления при наличии свежесыпавшего сухого снега толщиной 0,1 м для ледокола проекта 1105 «Капитан Зарубин» ($\rho_{сн}=0,1$ т/м³, $f=0,172$)

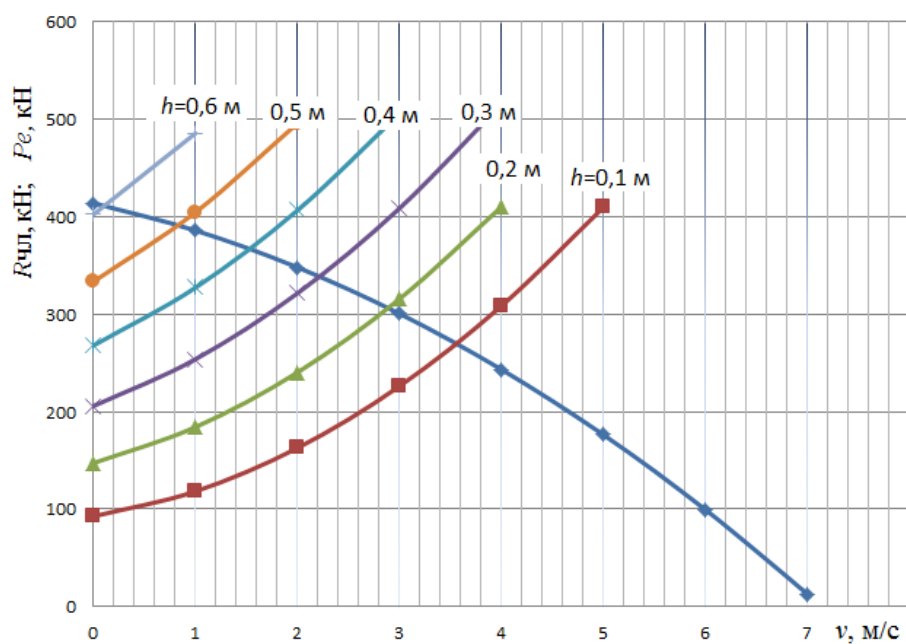


Рис. 5. Кривые чистого ледового сопротивления при наличии свежесыпавшего сырого снега толщиной 0,1 м для ледокола проекта 1105 «Капитан Зарубин» ($\rho_{сн}=0,3$ т/м³, $f=0,297$)

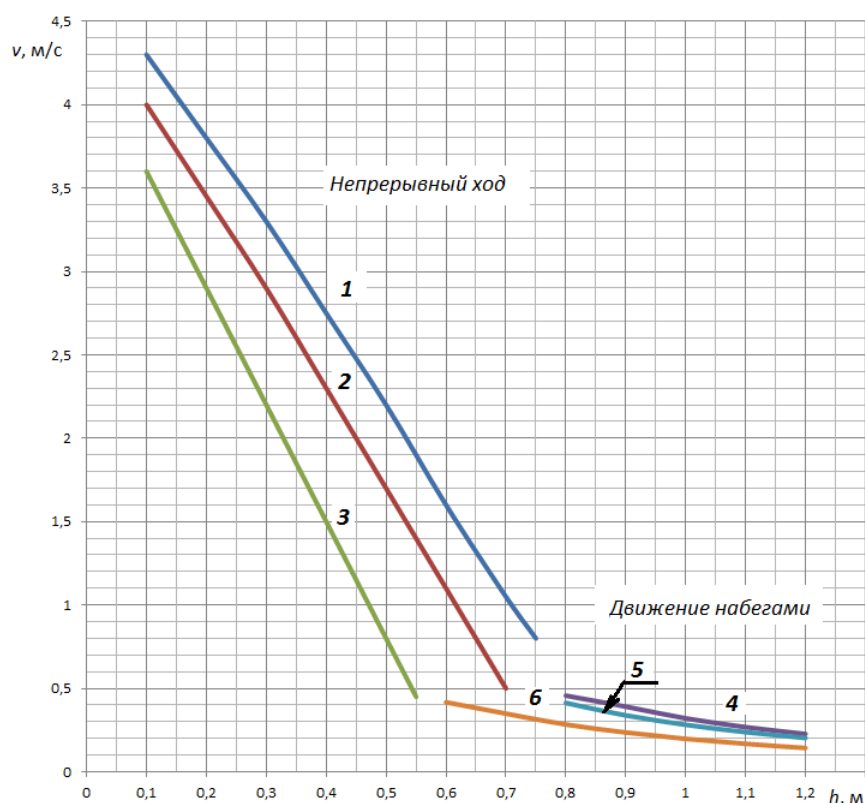


Рис. 6. Кривые ледопроеходимости ледокола проекта 1105 «Капитан Зарубин» непрерывным ходом и набегам

Из проведенных расчетов видно, что состояние ледяного покрова сильно влияет на ледовую ходкость судов, ведет к снижению предельной ледопроеходимости с 0,75 м до 0,55 м для ледокола «Капитан Зарубин». Чем толще лед, тем больше снижается скорость непрерывного движения судов. Заснеженность ледяного покрова увеличивает сопротивление движению судов, уменьшает скорость движения, ухудшает ледовую ходкость. Увеличение коэффициента трения корпуса о ледяную поверхность также ухудшает ледовую ходкость, увеличивает сопротивление.

При движении ледокола набегам состояние ледяного покрова незначительно влияет на среднюю скорость движения, что подтверждается проведенными ранее теоретическими исследованиями [11, 14]. Это можно объяснить следующим образом. Большую часть пути на этапах отхода и разбега ледокол движется в канале битого льда. Снег, находящийся на льду, размывается водой и его влияние на среднюю скорость движения снижается.

Заключение

В результате натурных экспериментов, проведенных на ледоколе «Капитан Зарубин» на реке Волга, определены коэффициенты трения корпуса судна при различном состоянии ледяного покрова.

На основе выполненных расчетов для ледокола проекта 1105 с использованием полученных данных экспериментальных исследований показано влияние состояния ледяного покрова на ледовую ходкость судов.

Полученные результаты натурных наблюдений и экспериментов могут быть использованы для прогнозирования ледовой ходкости при выборе расчетных значений

физико-механический характеристик льда и снега в различных математических моделях для прогнозирования ледовой ходкости как существующих, так и проектируемых судов.

Список литературы:

- [1] Бузуев А.Я. Влияние природных условий на судоходство в замерзающих морях // Л.: Гидрометеиздат, 1981. 200 с.
- [2] Сазонов К.Е. Современные проблемы ходкости транспортных судов // Судостроение. 2016. № 2 (825). С. 23-25.
- [3] Рывлин А.Я., Хейсин Д.Е. Испытания судов во льдах. Л.: Судостроение, 1980 – 208 с.
- [4] Костылев А.И., Сазонов К.Е., Тимофеев О.Я., Егизаров Г.Е., Соловьев А.С., Егоров Д.Н., Штрамбрант В.И. Ледовые натурные испытания ледокола «Владивосток» // Судостроение. 2016. № 6 (829). С. 9-12.
- [5] <http://sea-library.ru/upravlenie-sudnom/351-plavanie-vo-ldah.html> Морская библиотека
- [6] Сазонов К.Е. О возможном механизме влияния снежного покрова на ледовое сопротивление судов / Полярная механика, № 3, 2016.С. 417-427.
- [7] Сазонов К.Е. К вопросу о корректировке данных ходовых натурных испытаний судов в ледовых условиях // Проблемы Арктики и Антарктики. 2016. № 3 (109). С. 94–100.
- [8] Сазонов К.Е. Методы коррекции экспериментальных данных по ледовой ходкости судна в модельных и натурных условиях // Полярная механика, №3, 2016. С.406–416.
- [9] Цой Л.Г., Легостаев Ю.Л., Кузьмин Ю.Л. Ледокол XXI века или ржавый утюг? //Морские вести России – Морской флот №4, 2014. <http://www.morvesti.ru/tems/detail.php?ID=55563>
- [10] <http://www.korabli.eu/galleries/oboi/grazhdanskie-suda/kapitan-zarubin> Корабли всех времён и народов
- [11] Ионов Б.П. Грамузов Е.М. Ледовая ходкость судов. СПб.: Судостроение, 2001.– 512 с.
- [12] Грамузов Е.М., Калинина Н.В. Математическая модель неустановившегося движения ледокола // Сборник докладов Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 100-летию со дня рождения Р.Е. Алексеева «Современные технологии в кораблестроительном и авиационном образовании, науке и производстве», 2016. С. 64–68.
- [13] Грамузов Е.М., Калинина Н.В. Теоретико-экспериментальная модель движения речных ледоколов в тяжелых льдах // Физические технологии в машиноведении: Сб. научн. тр. вып.2 Нижегородский филиал Института машиноведения РАН. – Н.Новгород, 2000. – С. 170–180.
- [14] Грамузов Е.М., Калинина Н.В., Солдаткин, О.Б. Влияние заснеженности ледяного покрова и времени освобождения от заклинивания на тактику движения ледокола набегами // Сборник докладов Всероссийской научно-технической конференции посвященной памяти профессора В.М. Керичева «Современные технологии в кораблестроительном образовании, науке и производстве», 24–26 сентября 2002 г., Н.Новгород. С. 191–198.
- [15] Зуев В.А. Средства продления навигации на внутренних водных путях. – Л.: Судостроение, 1986. – 208 с.

THEORETICAL AND EXPERIMENTAL STUDIES OF THE INFLUENCE OF THE ICE COVER STATE ON THE ICE PROPULSION OF SHIPS

Kalinina Nadezhda V., *Candidate of technical sciences, associate professor
of the department «Shipbuilding and aircraft engineering»*

Nizhny Novgorod State Technical University, named after R.E. Alekseyev,

Soldatkin Oleg B., *Candidate of technical sciences, associate professor
of the department «Nuclear and thermal stations»*

Nizhny Novgorod State Technical University, named after R.E. Alekseyev

24, Minin st, Nizhny Novgorod, 603950

Keywords: full-scale tests of icebreaker, measuring complex, friction coefficient of a ship hull on ice, the state of the ice cover, ice propulsion, the curve of icebreaking capability.

Annotation. The results full-scale tests on the icebreaker «Captain Zarubin» by definition, the coefficient of friction of the ship hull on the ice cover for various exploitation conditions on the Volga River are presented. Описана методика проведения эксперимента и измерительный комплекс. The method of the experiment and the measuring complex are described. The calculations of ice propulsion for the icebreaker (project 1105) were made using the obtained experimental data on the existing semi-empirical models during continuous movement and by ramming. The article shows that the state of the ice cover strongly influences on the ice resistance of ships at continuous movement and slightly at movement by ramming. It leads to increase ice resistance of icebreakers.

The results of experimental studies can be used to predict the ice propulsion existing and projected ships.

References:

- [1] Buzuev A.Ja. Vlijanie prirodnyh uslovij na sudohodstvo v zamerzajushhih morjah // L.: Gidrometeoizdat, 1981. 200 s.
- [2] Sazonov K.E. Sovremennye problemy hodkosti transportnyh sudov // Sudostroenie. 2016. № 2 (825). S. 23-25.
- [3] Ryvlin A.Ja., Hejsin D.E. Ispytaniya sudov vo l'dah. L.: Sudostroenie, 1980 – 208 p.
- [4] Kostylev A.I., Sazonov K.E., Timofeev O.Ja., Egiazarov G.E., Solov'ev A.S., Egorov D.N., Shtrambrant V.I. Ledovye naturnye ispytaniya ledokola «Vladivostok» // Sudostroenie. 2016. № 6 (829). S. 9-12.
- [5] <http://sea-library.ru/upravlenie-sudnom/351-plavanie-vo-l'dah.html> Morskaja biblioteka
- [6] Sazonov K.E. O vozmozhnom mehanizme vlijaniya snezhnogo pokrova na ledovoe soprotivlenie sudov / Poljarnaja mehanika, № 3, 2016. P. 417-427.
- [7] Sazonov K.E. K voprosu o korekcirovanii dannyh hodovyh naturnykh ispytaniy sudov v ledovykh uslovijah // Problemy Arktiki i Antarktiki. 2016. № 3 (109). S. 94-100.
- [8] Sazonov K.E. Metody korekcii jeksperimental'nyh dannyh po ledovoj hodkosti sudna v model'nyh i naturnykh uslovijah // Poljarnaja mehanika, №3, 2016. S.406-416.
- [9] Coj L.G., Legostaev Ju.L., Kuz'min Ju.L. Ledokol XXI veka ili rzhavyj utjug? //Morskie vesti Rossii – Morskoj flot №4, 2014. <http://www.morvesti.ru/tems/detail.php?ID=55563>
- [10] <http://www.korabli.eu/galleries/oboi/grazhdanskije-suda/kapitan-zarubin> Korabli vseh vremjon i narodov
- [11] Ionov B.P., Gramuzov E.M. Ledovaja hodkost' sudov. SPb.: Sudostroenie, 2001.– 512 p.
- [12] Gramuzov, E.M., Kalinina, N.V. Matematicheskaja model' neustanovivshegosja dvizhenija ledokola // Sbornik dokladov Vserossijskoj nauchno-prakticheskoj konferencii, posvjashhennoj 100-letiju so dnja rozhdenija R.E. Aleksejeva «Sovremennye tehnologii v korablestroitel'nom i aviacionnom obrazovanii, nauche i proizvodstve», 2016. P. 64-68.
- [13] Gramuzov, E.M., Kalinina, N.V. Teoretiko-jeksperimental'naja model' dvizhenija rechnykh ledokolov v tjazhelyh l'dah // Fizicheskie tehnologii v mashinovedenii: Sb. nauchn. tr. vyp.2 Nizhegorodskij filial Instituta mashinovedenija RAN. – N.Novgorod, 2000. – P. 170-180.
- [14] Gramuzov, E.M., Kalinina, N.V., Soldatkin, O.B. Vlijanie zasnezhennosti ledjanogo pokrova i vremeni osvobozhdenija ot zaklinivaniya na taktiku dvizhenija ledokola nabegami // Sbornik dokladov Vserossijskoj nauchno- tehnichekoj konferencii posvjashhennoj pamjati professora V.M. Kericheva «Sovremennye tehnologii v korablestroitel'nom obrazovanii, nauche i proizvodstve», 24-26 sentjabrja 2002 g., N.Novgorod. P.191-198.
- [15] Zuev V.A. Sredstva prodlenija navigacii na vnutrennih vodnyh putjah. – L.: Sudostroenie, 1986. – 208 p.

Статья поступила в редакцию 08.08.2019 г.

УДК 629.12.002.8

Наумов Виктор Степанович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой охраны окружающей среды и производственной безопасности ФГБОУ ВО «ВГУВТ»,

e-mail: naumov1@vgavt-nn.ru

Кочнева Ирина Борисовна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры охраны окружающей среды и производственной безопасности ФГБОУ ВО «ВГУВТ»,

e-mail: iringre@mail.ru

Демина Екатерина Андреевна, магистрант ФГБОУ ВО «ВГУВТ»,

e-mail: dyomina_17@mail.ru

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Волжский государственный университет водного транспорта» (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»)

603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5

АСПЕКТЫ РЕАЛИЗАЦИИ НАЦИОНАЛЬНОГО ПРОЕКТА «ЭКОЛОГИЯ» В ОБЛАСТИ УТИЛИЗАЦИИ СУДОВ

Ключевые слова: утилизация судна, экологическая безопасность, предприятие по утилизации, национальный проект «Экология»

Аннотация. Принятый по поручению Президента РФ в 2018 году национальный проект «Экология» включает проект «Оздоровление Волги», который предусматривает, в том числе, очистку реки Волги от затонувших судов. В настоящей статье выполнен анализ необходимого объема работ научного, технологического и организационного характера, необходимого для улучшения экологической обстановки путем снижения негативного воздействия затонувших судов и успешной реализации задач поставленных Правительством РФ. По мнению авторов, план мероприятий по подъему и утилизации затонувших судов необходимо разбить на четыре этапа, включающих как непосредственный подъем судов и их последующую утилизацию, так и сопутствующие работы, направленные на создание необходимой и качественной инфраструктуры, научное обоснование проведенных работ с наименьшим экологическим ущербом.

Водный транспорт как часть транспортного комплекса является важным составным элементом экономики России, но его функционирование связано с негативным воздействием на окружающую среду.

Наряду с существующими проблемами загрязнения окружающей среды функционирующим флотом за последнее время резко обозначилась проблема загрязнения окружающей среды брошенными затонувшими судами. Затонувшие суда создают угрозу причинения ущерба водным биологическим ресурсам, выступают источником загрязнения и загрязнения прибрежной территории. Кроме того, малые глубины большинства рек, их высокое значение как транспортных артерий в период короткой летней навигации и как мест воспроизводства популяций промысловых видов рыбы, делают вопрос подъема и утилизации затонувших судов крайне важным.

Учитывая эти аспекты, в паспорт федерального проекта «Оздоровление Волги» введены мероприятия по снижению негативного воздействия брошенных затонувших судов в акватории реки Волги. Для этого программой предусмотрен подъем и утилизация судов по акваториям во всех субъектах РФ, по которым протекает река Волга.

На подготовительном этапе в настоящее время компетентными органами по Нижегородской области (Росприроднадзор, Росморречфлот) уточняется список затонувших (полузатонувших) судов и устанавливаются их собственники. После установ-

ления собственника необходимо будет проводить работы по подъему и дальнейшей утилизации судов, которые потребуют детальной проработки по технологическим, экологическим и правовым вопросам.

Для достижения целей безопасной и экологически рациональной утилизации судов необходимо решить множество вопросов, связанных с местоположением судна, его состоянием, разработкой необходимой технической документации, дооборудованием существующих предприятий и т.д. Мероприятия по подъему и утилизации затонувших судов можно разделить на следующие этапы (рис. 1).

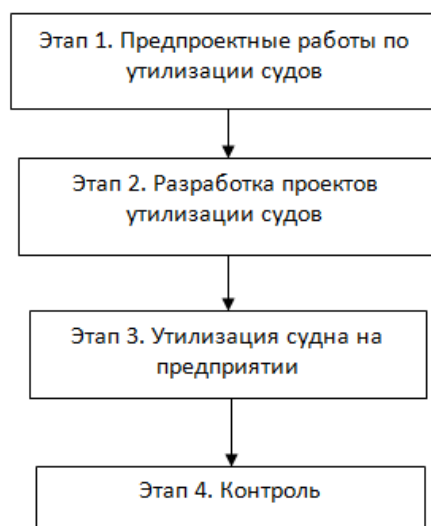


Рис. 1. План мероприятий по подъему и утилизации затонувших судов

На первом этапе необходимо провести работы, которые включают обследование судна и место его расположения с целью определения способов подъема и транспортировки судна к месту утилизации. При этом необходимо установить:

- глубину затопления судна;
- размеры и состояние судна;
- характер водоема;
- рельеф дна;
- положение судна;
- вес судна;
- материал, из которого изготовлено судно;
- возможность обеспечить герметичность корпуса.

В свою очередь, потребуется установить номенклатуру элементов судна, подлежащих дальнейшему использованию, и требования к их демонтажу; номенклатуру элементов судна с целью определения класса их опасности для окружающей среды, который необходим для осуществления последующих работ по утилизации.

Также на первом этапе необходимо провести анализ возможности утилизации судов на предприятиях региона, оценить возможность создания центра утилизации судов на базе предприятий Нижегородской области и, в свою очередь, разработать требования к организациям, сопровождающим процесс утилизации. Так, например, предприятия, занимающиеся утилизацией судов, должны отвечать определенным требованиям, в частности, иметь лицензию на хранение, переработку и реализацию лома черных, цветных металлов [1]. Процедура утилизации судов должна соответствовать требованиям защиты окружающей среды, производиться в специально отве-

денных и оборудованных для этих целей местах, исключая риск экологического загрязнения, система менеджмента предприятия должна способствовать применению безопасных и экологически рациональных приемов и методов работ по утилизации, отвечающим национальным и международным стандартам [2–8].

При определении предприятия по утилизации необходимо учесть:

- средства технологического оснащения;
- грузоподъемные и транспортные средства;
- судоподъемные средства;
- средства охраны окружающей среды.

Также необходимо учесть и технико-экономическую оценку обеспечения утилизации, содержащую:

- оценку возможности разделки корпуса и составных частей судна традиционными методами на существующих предприятиях;
- необходимость дооборудования существующих предприятий;
- необходимость строительства дополнительных средств обеспечения;
- мероприятия по созданию необходимых средств утилизации и охраны окружающей среды при утилизации;
- другие вопросы обеспечения утилизации, связанные с особенностями конструкции судна.

По окончании первого этапа, когда установлены конкретные объекты для утилизации, определено предприятие для их утилизации, можно переходить к следующему этапу, а именно разработке проекта утилизации судна.

Второй этап предполагает проведение работ по доставке судна к месту утилизации, что потребует разработать проект подъема судна, проект по перегону, подъем судна, буксировку судна, размещение судна в акватории завода.

В частности, необходимо будет решить вопросы, связанные с выбором характера перегона (перегон судна своим ходом, на буксире, в составе каравана), выбором судна-буксировщика, обеспечением сопровождения, выбором времени года, пути следования и места укрытия от непогоды, выбором благоприятных курсов и скоростей хода, комплектацией судна экипажем [9–10].

Также проект утилизации судна включает разработку:

- принципиальной технологии утилизации; спецификации элементов судна, подлежащих дальнейшему использованию, и требования к демонтажу;
- спецификации элементов судна, к которым необходимо предъявить требования по обращению с отходами;
- рекомендации по наличию необходимых средств утилизации и охраны окружающей среды при утилизации;
- других вопросов обеспечения утилизации, связанных с особенностями конструкции судна.

Перечень работ по второму этапу представлен на рисунке 2.

На третьем этапе выполняется утилизация судна на предприятии в соответствии с требованиями нормативных документов и наилучших практик в целях обеспечения безопасности человека и окружающей среды [11–15]. При этом последовательность работ будет следующая:

- осушка систем, а также зачистка объекта утилизации от нефтесодержащих, химических и других токсичных соединений;
- демонтаж вспомогательного оборудования, главной электрической установки, судовых систем, судовых устройств, обстройки судовых помещений, изоляции и покрытий, кабелей, двигателей;
- разделка демонтированного оборудования на металлолом, сепарация цветного металла от изоляции, разделка демонтированных кабельных изделий;
- разделка корпуса на крупногабаритные секции;
- разделка крупногабаритных секций на габаритный металлолом;

– работы с продуктами утилизации судна: переработка утилизируемых материалов, продажа или переработка отходов, неосвоенных предприятием, захоронение не утилизируемых оборудования и материалов, возврат в народное хозяйство чистого металла и оборудования.

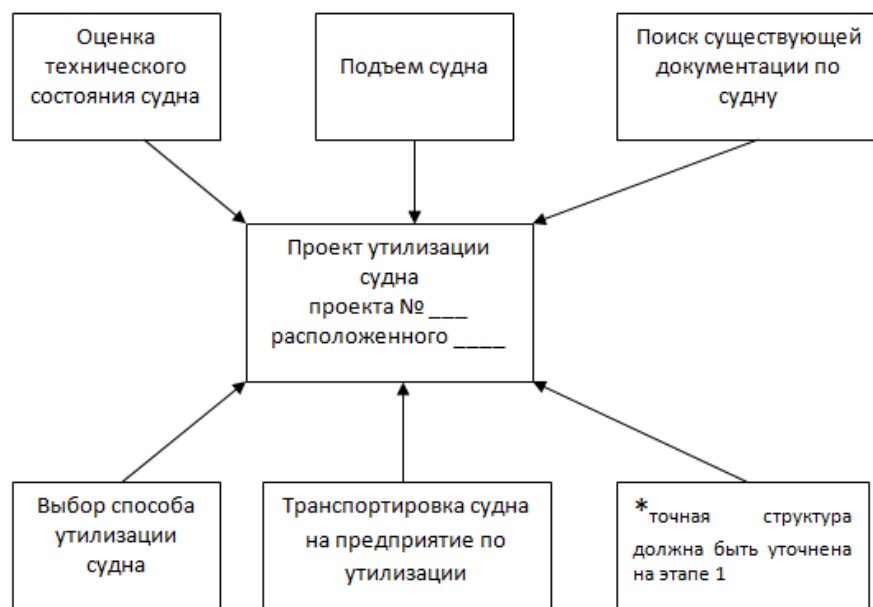


Рис. 2. Разработка проектов утилизации судов

Предложенные этапы утилизации судов являются универсальными. Однако конкретное содержание работ на этапах уникально для каждого судна. Это связано и с различным первоначальным состоянием (судно затоплено/ полузатоплено/ на берегу/ засыпано грунтом), и типом судна (самоходное, несамоходное судно, железобетонный дебаркадер), и сохранностью судна (судно полностью, остатки корпуса, остатки обшивки корпуса, остатки днищевых наборов). Принимая это во внимание, предлагается выбрать приоритетные объекты для утилизации (пилотные проекты). При отборе судов в пилотные проекты предполагается руководствоваться степенью их экологической опасности. Для этого необходимо провести научно-исследовательскую работу по ранжированию затонувших судов по их экологической опасности, с целью выявления последовательности их утилизации. Это потребует разработать методику оценки, оценить экологическую опасность судов, а затем разработать план-график последовательности утилизации судов. При разработке пилотных проектов (согласно плану мероприятий (рисунок 1) необходимо будет проработать технико-экономическое обоснование создания центра утилизации судов на базе предприятий Нижегородской области. После реализации пилотных проектов утилизации судов необходимо провести анализ результатов их реализации и на его основе разработать дорожную карту по утилизации идентифицированных судов на территории Нижегородской области.

Список литературы:

- [1] О лицензировании отдельных видов деятельности [Электронный ресурс] : Федеральный закон от 04.05.2011 г. Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».
- [2] Кочнев Ю.А. Оценка и учет материалов для безопасной и экологически рациональной утилизации судна / Ю.А. Кочнев, И.Б. Кочнева // Морские интеллектуальные технологии. – 2019. – Вып. 2(44)Т.2. – С. 10–16.

- [3] Regulation (EU) No 1257/2013 of the European Parliament and of the Council of 20 November 2013 on ship recycling and amending Regulation (EC) No 1013/2006 and Directive 2009/16/EC. – Режим доступа: http://www.safety4sea.com/images/media/pdf/EU_Ship-Recycling-Regulation.pdf.
- [4] Руководство ИМО по разделке судов (резолюция А.962(23) ИМО)). – СПб.: ЗАО ЦНИИМФ, 2004. – 136 с.
- [5] Об охране окружающей среды [Электронный ресурс] : Федеральный закон от 10.01.2002 г. Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».
- [6] Resolution MEPC.196(62)-2011. Guidelines for the Development of the Ship Recycling Plan. – Режим доступа: [http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/ShipRecycling/Documents/RESOLUTION%20MEPC.196\(62\).pdf](http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/ShipRecycling/Documents/RESOLUTION%20MEPC.196(62).pdf)
- [7] Resolution MEPC.210(63)-2012. Guidelines for Safe and Environmentally Sound Ship Recycling. – Режим доступа: [http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/ShipRecycling/Documents/210\(63\).pdf](http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/ShipRecycling/Documents/210(63).pdf)
- [8] Resolution MEPC.211(63)-2012. Guidelines for the Authorization of Ship Recycling Facilities. – Режим доступа: [http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/ShipRecycling/Documents/211\(63\).pdf](http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/ShipRecycling/Documents/211(63).pdf)
- [9] Руководство по техническому наблюдению за судами в эксплуатации. СПб., 2019 – 267 с.
- [10] Российский Речной Регистр. Правила. М., 2018 – 1885 с. URL: <https://www.rivreg.ru/assets/Uploads/rules2015/rules062018.pdf>
- [11] Технический регламент о безопасности объектов внутреннего водного транспорта [Электронный ресурс] : Постановление Правительства РФ от 12.08.2010 N 623. Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».
- [12] ГОСТ Р ИСО 30000 – 2013. Суда и морские технологии. Системы менеджмента утилизации судов. Технические требования к системам менеджмента предприятий по безопасной и экологически рациональной утилизации судов. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200105637> (дата обращения – 14.04.2019).
- [13] Technical guidance note under Regulation (EU) No 1257/2013 on ship recycling. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52016XC0412%2801%29> (дата обращения – 02.07.2019).
- [14] Basel Convention, Technical Guidelines for the Environmentally Sound Management of the Full and Partial Dismantling of Ships (hereafter referred to as ‘BC TG’), Section 4.5, pp. 63–64 and Section 6.2, pp. 84–88.
- [15] ILO, Safety and health in shipbreaking, guidelines for Asian countries and Turkey, 2004 (hereafter referred to as ‘ILO SHG’), Section 4.6, p. 32 and Section 16, pp. 128–133.

ASPECTS OF THE IMPLEMENTATION OF THE NATIONAL PROJECT «ECOLOGY» IN THE FIELD OF SHIP RECYCLING

Naumov Victor S., *doctor of Engineering Sciences, professor,
Head of the Department of Environmental Protection and Industrial Safety
Volga State University of Water Transport*
Kochneva Irina B., *Candidate of Engineering Science, Associate Professor
of the Department of Environmental Protection and Industrial Safety
Volga State University of Water Transport*
Dyomina Ekaterina A., *Master's Degree student
Volga State University of Water Transport
5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603951*

Keywords: *ship recycling, ecological safety, ship recycling facility, national project «Ecology»*

Adopted on behalf of the President of the Russian Federation in 2018, the national project «Ecology», including among the eleven Federal projects, as the project «Improvement of the Volga», started to be implemented in the Nizhny Novgorod region. This article analyzes the necessary amount of scientific, technological and organizational work required to improve the environmental situation by reducing the negative impact of wrecks and the successful implementation of the tasks set by the Government of the Russian Federation. According to the authors, the plan of measures for the lifting and disposal of sunken ships should be divided into four stages, including both the direct lifting of ships and their subsequent disposal, and

related works aimed at creating the necessary and high-quality infrastructure, scientific justification of the work with the least environmental damage.

References:

- [1] О лицензировании отдельных видов деятельности. Федеральный закон от 04.05.2011 г. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_113658/.
- [2] Kochnev Yu.A. Otsenka i uchet materialov dlya bezopasnoy i ekologicheskoy ratsionalnoy utilizatsii sudna / Yu.A. Kochnev, I.B. Kochneva // Morskie intellektualnye tekhnologii. – 2019. – Vyp. 2(44)T.2. – S. 10–16.
- [3] Regulation (EU) No 1257/2013 of the European Parliament and of the Council of 20 November 2013 on ship recycling and amending Regulation (EC) No 1013/2006 and Directive 2009/16/EC. – Режим доступа: http://www.safety4sea.com/images/media/pdf/EU_Ship-Recycling-Regulation.pdf.
- [4] Rukovodstvo IMO po razdelke sudov (rezolyutsiya A.962(23) IMO)). – SPb.: ZAO TsNIIMF, 2004. – 136 s.
- [5] Об охране окружающей среды. Федеральный закон от 10.01.2002 г. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_34823/.
- [6] Resolution MEPC.196(62)-2011. Guidelines for the Development of the Ship Recycling Plan. – Режим доступа: [http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/ShipRecycling/Documents/RESOLUTION%20MEPC.196\(62\).pdf](http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/ShipRecycling/Documents/RESOLUTION%20MEPC.196(62).pdf).
- [7] Resolution MEPC.210(63)-2012. Guidelines for Safe and Environmentally Sound Ship Recycling. – Режим доступа: [http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/ShipRecycling/Documents/210\(63\).pdf](http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/ShipRecycling/Documents/210(63).pdf).
- [8] Resolution MEPC.211(63)-2012. Guidelines for the Authorization of Ship Recycling Facilities. – Режим доступа: [http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/ShipRecycling/Documents/211\(63\).pdf](http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/ShipRecycling/Documents/211(63).pdf).
- [9] Rukovodstvo po tekhnicheskomu nablyudeniyu za sudami v ekspluatatsii. SPb., 2019 – 267 s.
- [10] Rossiyskiy Rechnoy Registr. Pravila. M., 2018 – 1885 s. URL: <https://www.rivreg.ru/assets/Uploads/rules2015/rules062018.pdf>.
- [11] Tekhnicheskiy reglament o bezopasnosti obektov vnutrennego vodnogo transporta. Postanovlenie Pravitelstva RF ot 12.08.2010 N 623. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_103987/508f7e09909c5340bc754fa03313ad7c93a4194f/.
- [12] GOST R ISO 30000 – 2013. Suda i morskoe tekhnologii. Sistemy menedzhmenta utilizatsii sudov. Tekhnicheskie trebovaniya k sistemam menedzhmenta predpriyatiy po bezopasnoy i ekologicheskoy ratsionalnoy utilizatsii sudov [Internet resource] <http://docs.cntd.ru/document/1200105637/> (Accessed: 14.04.2019).
- [13] Technical guidance note under Regulation (EU) No 1257/2013 on ship recycling. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52016XC0412%2801%29> (дата обращения – 02.07.2019).
- [14] Basel Convention, Technical Guidelines for the Environmentally Sound Management of the Full and Partial Dismantling of Ships (hereafter referred to as 'BC TG'), Section 4.5, pp. 63–64 and Section 6.2, pp. 84–88.
- [15] ILO, Safety and health in shipbreaking, guidelines for Asian countries and Turkey, 2004 (hereafter referred to as 'ILO SHG'), Section 4.6, p. 32 and Section 16, pp. 128–133.

Статья поступила в редакцию 15.07.2019 г.

УДК 629.5.013:[620.197.5:620.193]

Родькина Анна Владимировна, старший преподаватель кафедры
«Океанотехника и кораблестроение»

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»,

e-mail: a.v.rodkina@gmail.com

299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33

ЗАЩИТА ОТ КОРРОЗИИ В СОСТАВЕ НАГРУЗКИ МАСС СУДНА

Ключевые слова: нагрузка масс, защита от коррозии, судно.

Аннотация. Требования Правил и Норм классификационных обществ основаны на предположении, что при постройке и в эксплуатации судов осуществляются меры по защите корпуса от коррозии в соответствии с действующими стандартами и иными действующими нормативными документами. Для целей проектирования корпусных конструкций судов в статье получены составляющие части нагрузки для различных типов защиты от коррозии. Выполнен анализ изменения нагрузки масс различных типов защиты корпусных конструкций судов от коррозии в зависимости от водоизмещения. Проведено сравнение массы различных типов защиты корпусных конструкций судов от коррозии в составе нагрузки масс, сформированы данные о зависимости нагрузки масс защиты от коррозии от водоизмещения судна, что дает возможность выбора наименьшего по массе типа защиты от коррозии. Определена важность оценки нагрузки масс различных типов защиты от коррозии на начальных стадиях проектирования. Практическая значимость работы состоит в том, что полученные результаты могут быть использованы на стадии проектирования для выбора меньшей по массе защиты судов от коррозии.

Введение

Требования по определению размеров связей корпуса судов и плавучих технических сооружений Правил классификации и постройки морских судов в части II «Корпус» [1] и Правил классификации, постройки и оборудования плавучих буровых установок и морских стационарных платформ [2] Российского морского регистра судоходства основаны на предположении, что при постройке и в эксплуатации осуществляются меры по защите корпуса от коррозии в соответствии с действующими стандартами и иными действующими нормативными документами. Меры защиты корпусных конструкций судов и плавучих технических сооружений определяются на стадии проектирования. Первым этапом проектирования судна является определение водоизмещения, основываясь на составе нагрузки. Водоизмещение судна – важнейшая характеристика его размеров, стоящая во главе иерархий проектных величин, тесно связана с составом его нагрузки, который влияет на многие другие характеристики судна (Профессор Виктор Владимирович Ашик) [3]. В состав нагрузки входят и постоянные массы, к которым, в частности, относятся массы устройств и электрооборудования. Стандарт ОСТ5Р.0206–2002 «Нагрузка масс гражданских и вспомогательных судов» устанавливает типовую разбивку нагрузки масс судна на составляющие элементы и соответствующие им коды для выполнения проектных расчетов, а также расчетов по определению водоизмещений судна [4].

Защита протекторная корпусов судов [5] как элемент нагрузки (таблица 1) включена в состав нагрузки масс судна под кодом 01050111.

Согласно примечанию [4] в данном элементе нагрузки учитывают протекторы, аноды, электроды сравнения, экраны для защиты элементов корпуса. Следовательно, Защита катодная корпусов судов [6] частично входит в состав нагрузки масс судна

под кодом 01050111 (электроды сравнения, анодные узлы, околоанодные изоляционные экраны и контактно-щеточное устройство).

Элемент нагрузки «Электроустройства различного назначения» учитывает систему анодной защиты, следовательно, Защита катодная корпусов судов [6], а именно источники питания, распределительные щиты, силовые и контрольные кабели, как элемент нагрузки (таблица 1) включена в состав нагрузки масс судна под кодом 050309##; ## представляется цифровым кодом в зависимости от количества электроустройств различного назначения.

Таблица 1

Защита от коррозии в составе нагрузки масс судна

Код элемента нагрузки					Наименование элемента нагрузки
Раздел	Группа	Подгруппа	Статья	Подстатья	
01	05	01	11		Протекторы и их крепление
01	05	01			Покрытия, цементировка корпуса, протекторы
01	05				Покрытия, окраска
01					Корпус
05	03	09	##		Электроустройства различного назначения
05	03				Сети освещения, питания
05					Электроэнергетическая система, внутрисудовые связи и управление

Количество элементов зависит от главных размерений судна, которые приведены в таблице 2. Выполнена оценка влияния выбора типа защиты от коррозии на нагрузку масс следующих судов (рис. 1): Нефтеналивное судно «Балт Флот 11», Накатное/Генгруз/Контейнерное судно «Адлер», Рефрижераторное судно «Босфор Восточный», Рейдовый буксир «РБ-389», Гидрографическое судно «Донузлав» и Плавучая мастерская «ПМ-138».

Таблица 2

Главные размерения судов

	Рейдовый буксир «РБ-389»	Гидрографическое судно «Донузлав»	Плавучая мастерская «ПМ-138»	Нефтеналивное судно «Балт Флот 11»	Накатное/Генгруз/Контейнерное судно	Рефрижераторное судно «Босфор Восточный»
Водоизмещение, т	417	2 499	5 540	9 483	11 819	16 600
Длина, м	25,40	82,50	121,70	136,29	120,24	142,00
Ширина, м	9,30	13,50	17,00	16,86	20,00	22,20
Осадка, м	3,30	4,00	4,63	4,20	6,65	9,60
Высота борта, м	4,70	8,00	9,50	6,00	11,50	13,60
Коэффициент общей полноты	0,522	0,547	0,564	0,959	0,721	0,535

Рейдовый буксир «РБ-389» проекта 90600 с азимутальным принципом движения предназначен для выполнения буксировочных и кантовочных операций в порту, на

рейдах и в прибрежных районах, а также для тушения пожаров, ликвидации разливов нефти и других функций. Рейдовый буксир «РБ-389» был заложен в Санкт-Петербурге на ОАО «Ленинградский судостроительный завод «Пелла» в 2010 году, спущен на воду в июле 2010 г. В настоящее время буксир обеспечивает швартовки, буксировки кораблей и судов Черноморского Флота в главной базе – Севастополе. Буксир входит в состав 1-й группы судов 205-го отряда управления вспомогательного флота с базированием на Южную бухту Севастополя [7].

Гидрографическое судно «Донузлав» проекта 862/II обладает неограниченной мореходностью. Гидрографическое судно «Донузлав» было заложено на ССЗ «Сточни Полночни им. Бохатерев Вестерплати», Гданьск, Польша. Спущено на воду 28.05.1983 г., и 13.12.1983 г. вошло в состав Черноморского флота. В настоящее время находится в составе Черноморского флота с базированием на бухту Южная, Севастополь [8].

Плавучая мастерская «ПМ-138» проекта 304 была заложена 18.05.1968 г. на судостроительном заводе «Сточня Щецинская им. Адольфа Варского» в Щецине, Польша (заводской №304/1). Спущена на воду 9.11.1968 г., вступила в строй 31.10.1969 г. Вошла в состав Черноморского флота. В настоящее время входит в состав 1-й группы 205-го отряда управления вспомогательного флота с базированием на бухту Южная, Севастополь. Активно используется в работе Тартусской ПМТО (Сирия) [9].



Рис. 1. Рассматриваемые суда

Сравним массы различных типов защиты от коррозии в составе нагрузки масс указанных выше судов.

Защита протекторная корпусов судов

При проектировании рейдового буксира «РБ-389», плавучей мастерской «ПМ-138», гидрографического судна «Донузлав», нефтеналивного судна «Балт Флот 11», накатного судна «Адлер» и рефрижераторного судна «Босфор Восточный» в качестве защиты от коррозии принята протекторная защита. Число протекторов (рис. 2) при защите подводной части корпуса определяется в зависимости от водоизмещения судна (рис. 3) и регламентируется [5]: протекторы устанавливаются в районе скуловых поясов вдоль корпуса судна, в районе носовой и кормовой части – на уровне линии гребного вала.

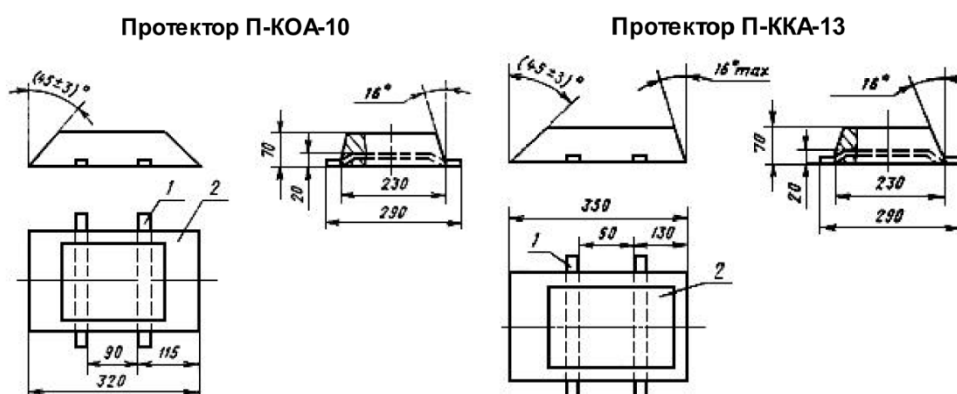


Рис. 2. Схематическое изображение протекторов (ГОСТ 26251-84)

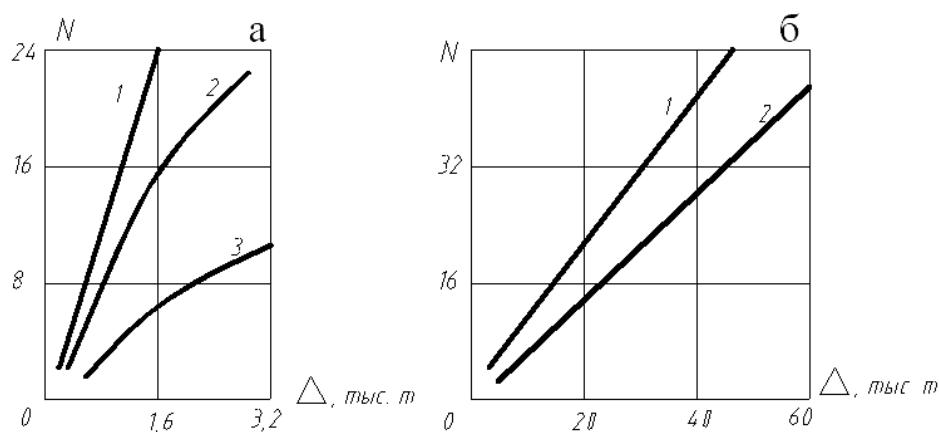


Рис. 3. Число одиночных протекторов и протекторных групп (N), на один борт судна при общей протекторной защите в зависимости от водоизмещения судна (Δ): а) водоизмещение $\Delta \leq 3500$ т, б) водоизмещение $\Delta \leq 60000$ т, 1 – протекторы П-КОА-4, 2 – протекторы П-КОА-10, 3 – протекторы П-ККА-13, 4 – протекторы по группе А-I, 5 – протекторы по группе А-II

Подробное описание нагрузки масс протекторной защиты рассматриваемых судов от коррозии представлено в таблице 3.

Таблица 3

Нагрузка масс протекторной защиты корпусов судов

	РБ-389	Донузлав	ПМ-138	Балт Флот 11	Адлер	Босфор Восточный
	Протектор П-КОА-10	Протектор П-ККА-13	Протектор П-ККА-13	Протектор П-ККА-13	Протектор П-ККА-13	Протектор П-ККА-13
Количество протекторов, шт	24,000	32,000	56,000	28,000	36,000	48,000
Масса протектора, кг	10,000	13,000	13,000	13,000	13,000	13,000
		Протектор П-КОЦ-10	Протектор П-КЛА-15	Протектор П-КЛА-15	Протектор П-КЛА-15	Протектор П-КЛА-15
Количество протекторов, шт		18,000	64,000	112,000	144,000	192,000
Масса протектора, кг		10,000	15,000	15,000	15,000	15,000
	Лист 15.0	Полутруба 100х10	Полутруба 100х10	Полутруба 100х10	Полутруба 100х10	Полутруба 100х10
Количество листов, шт	72,000	32,000	32,000	32,000	32,000	32,000
Масса листа, кг	0,520	3,300	3,300	3,300	3,300	3,300
		Заглушка 50х100	Заглушка s10	Заглушка s10	Заглушка s10	Заглушка s10
Количество листов, шт		64,000	64,000	64,000	64,000	64,000
Масса листа, кг		0,310	0,310	0,310	0,310	0,310
Масса протекторной защиты, кг	280,000	722,000	1 817,000	2 170,000	2 754,000	3 630,000

Таким образом, масса протекторной защиты составляет: 280 кг для Рейдового буксира «РБ-389», 722 кг для Гидрографического судна «Донузлав», 1817 кг для Плавучей мастерской «ПМ-138», 2170 кг для нефтеналивного судна «Балт Флот 11», 2754 кг для накатного судна «Адлер» и 3630 кг для рефрижераторного судна «Босфор Восточный».

Защита катодная корпусов судов

Рассмотрим, как изменится нагрузка масс при применении катодной защиты вместо протекторной. Число элементов катодной защиты определяется в зависимости от главных размерений (таблица 2) и площади смоченной поверхности корпуса судна (таблица 4). Расчет площади смоченной поверхности корпуса судна производится по формуле Мумфорда:

$$S_{см} = L \cdot (1,7 \cdot T + \delta \cdot B), \quad (1)$$

где L – длина судна, м;

T – осадка, м;

ρ – коэффициент общей полноты;

B – ширина, м.

Таблица 4

Площадь смоченной поверхности корпуса судна

	РБ-389	Донузлав	ПМ-138	Балт Флот 11	Адлер	Босфор Восточный
Площадь смоченной поверхности, м ²	3 175,898	3 093,258	4 004,432	3 175,898	3 093,258	4 004,432

В состав катодной защиты корпусов судов входят источники питания, анодные узлы, околоанодные изоляционные экраны, электроды сравнения, контактно-щеточное устройство, распределительные щиты, силовые и контрольные кабели.

В соответствии с требованиями в системе катодной защиты в качестве источников питания следует использовать статические преобразователи типа ТПЦЗ-200-24 (тиристорный преобразователь переменного тока в постоянный с цифровой индикацией контролируемых параметров), со сроком службы 25 лет, одобренные Российским морским Регистром судоходства. Конструктивно преобразователь выполнен в виде металлического шкафа. Рабочее положение стойки преобразователя – вертикальное, степень защиты IP23 по ГОСТ 14254-96. Габариты 600х610х1415 мм, масса 300±15 кг. Подключение входных и выходных кабелей – через уплотнительные муфты, установленные на крыше стойки. Клеммы для подключения кабелей установлены в верхней части стойки [10].

Рекомендуется применять платино-ниобиевые аноды типа АУ-1М с текстурированным платиновым покрытием на ниобиевой подложке (рис. 4 [10]).

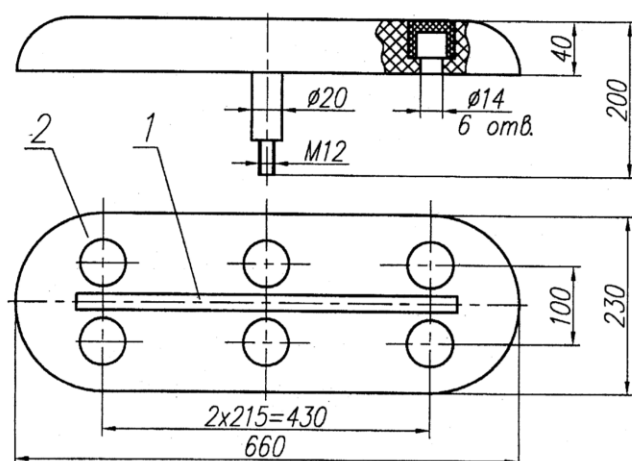


Рис. 4. Платино-ниобиевый анод типа АУ-1М
для системы катодной защиты: 1 – основа, 2 – электрод

Нагрузка масс катодной защиты для рейдового буксира, плавучей мастерской и гидрографического, нефтеналивного, накатного и рефрижераторного судов представлена в таблице 5.

Таким образом, масса катодной защиты составляет: 374,65 кг для Рейдового буксира «РБ-389», 832,55 кг для Гидрографического судна «Донузлав», 1338,4 кг для Плавучей мастерской «ПМ-138», 1181,75 кг для нефтеналивного судна «Балт Флот 11», 1314,35 кг для накатного судна «Адлер» и 1869,2 кг для рефрижераторного судна «Босфор Восточный».

Таблица 5

Нагрузка масс катодной защиты корпусов судов

	РБ-389	Донузлав	ПМ-138	Балт Флот 11	Адлер	Босфор Восточный
Количество анодных узлов, шт	6	12	18	12	14	16
Масса анодов типа АУ-1М, кг	7,9	7,9	7,9	7,9	7,9	7,9
Количество электродов сравнения, шт	2	4	6	4	4	4
Масса электродов сравнения ЭСХП-СС, кг	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2
Количество преобразователей	1	2	3	2	2	3
Масса ТПЦЗ-200-24, кг	300,000	300,000	300,000	300,000	300,000	300,000
Распределительные щиты, силовые и контрольные кабели, контактно-щеточное устройство	20,850	124,950	277,000	474,150	590,950	830,000
Масса катодной защиты, кг	374,650	832,550	1 338,400	1 181,750	1 314,350	1 869,200

Оценка влияния выбора типа защиты от коррозии на нагрузку масс судна

Нагрузка масс протекторной и катодной защиты от коррозии значительно отличается, что показывает объемная гистограмма на рис. 5. Однако не для всех судов масса катодной защиты меньше, чем масса протекторной.

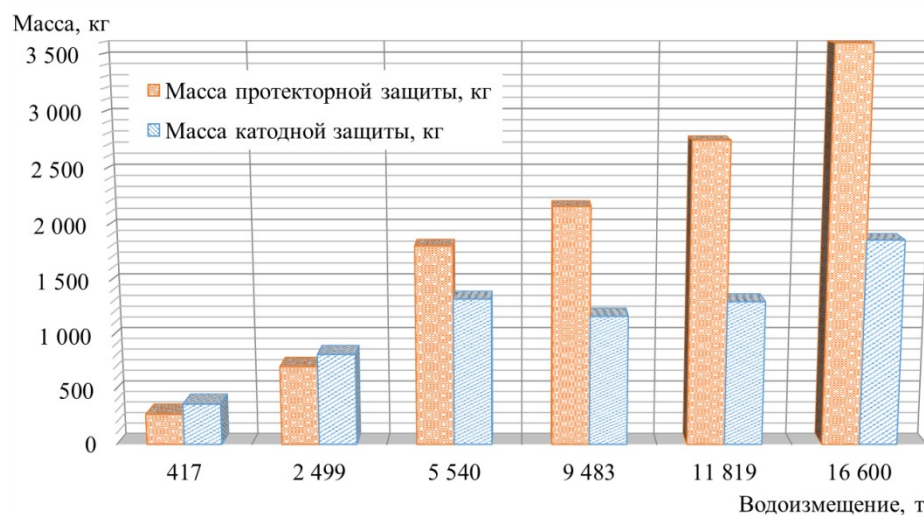


Рис. 5. Масса защиты от коррозии в составе нагрузки масс

На рис. 6 представлена зависимость разницы нагрузки масс от протекторной и катодной защиты от водоизмещения.

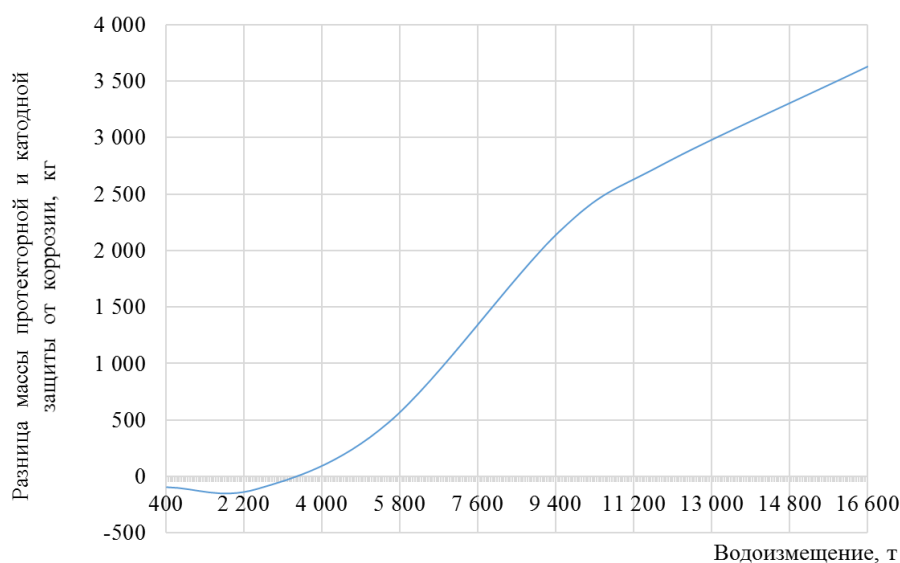


Рис. 6. Влияние выбора типа защиты от коррозии на нагрузку масс судна

Таким образом, с точки зрения уменьшения массы защиты от коррозии целесообразно рассматривать применение системы катодной защиты от коррозии вместо протекторной для судов с водоизмещением более 3400 т.

Заключение

Выполненный анализ нагрузки масс, входящей в состав элементов нагрузки под кодом 01050111 и 050309##, показал, что для судов с водоизмещением более 3400 т наблюдается уменьшение нагрузка масс защиты от коррозии в случае применения катодной защиты вместо протекторной. Выявлена важность оценки нагрузки масс различных типов защиты от коррозии на начальных стадиях проектирования с целью определения минимальной по массе.

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

Список литературы:

- [1] Правила классификации и постройки морских судов. Часть II. Корпус. – СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2019. – 278 с.
- [2] Правила классификации, постройки и оборудования плавучих буровых установок и морских стационарных платформ. – СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2018. – 460 с.
- [3] Ашик, В. В. Проектирование судов: Учебник. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Судостроение, 1985. – 320 с., ил.
- [4] ОСТ5Р.0206–2002 Нагрузка масс гражданских и вспомогательных судов. Классификация элементов нагрузки. – СПб.: НИИ «Лот» ФГУП «ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова», 2003. – 74 с.
- [5] Единая система защиты от коррозии и старения. Защита протекторная корпусов судов. Правила и нормы проектирования. – Л.: Типография НПО «Ритм», 1980. – 21 с.
- [6] Единая система защиты от коррозии и старения. Защита катодная корпусов судов. Правила и нормы проектирования. – Л.: Типография НПО «Ритм», 1983. – 21 с.
- [7] Рейдовый буксир «РБ-389». URL: <http://www.kchf.ru/ship/vspomog/rb389.htm>
- [8] Гидрографическое судно «Донузлав». URL: <http://www.kchf.ru/ship/gidrograf/donuzlav.htm>
- [9] Плавучая мастерская «ПМ-138». URL: <http://www.kchf.ru/ship/vspomog/pm138.htm>
- [10] Кузьмин, Ю.Л. Новая система электрохимической катодной защиты судов от коррозии / Ю.Л. Кузьмин, В. Н. Трошенко, Т. Е. Медяник, Г. В. Тарандо, Л. Д. Ротц, Н. Н. Купцова // Судостроение. – СПб.: Центр технологии судостроения и судоремонта, 2003. – № 6. – С. 35–37.

CORROSION PROTECTION AS STRUCTURE OF A SHIP MASS LOAD

Rodkina Anna V., Senior Lecturer of the Department of Ocean Technology and Shipbuilding Federal State Educational Institution of Higher Education «Sevastopol State University»
33, Universitetskaya st., Sevastopol, 299053

Keywords: mass load, corrosion protection, ship.

The requirements of the Rules and Norms of classification societies are based on the assumption that measures to protect the hull against corrosion in accordance with the standards and other regulations are taken during the construction and operation of ships. Components of the load have been obtained for various types of corrosion protection for the purpose of ship hulls designing. The analysis of mass load changes for the various types of ships hull structure corrosion protection, depending on the displacement. A mass load comparison the various types of ships hull structure protection against corrosion was made; data was generated on the dependence of the corrosion protection load mass on the ship displacement, which makes it possible to choose the smallest type of corrosion protection. The importance of the various types of corrosion protection mass load estimating at the initial stages of design is determined. The practical significance of the work lies in the fact that the obtained results can be used at the design stage to select a smaller weight for ship corrosion protecting.

References:

- [1] Pravila klassifikatsii i postroyki morskikh sudov. Chast' II. Korpus. – SPb.: Rossiyskiy morskoy registr sudokhodstva, 2019. – 278 s.
- [2] Pravila klassifikatsii, postroyki i oborudovaniya plavuchikh burovykh ustanovok i morskikh statsionarnykh platform. – SPb.: Rossiyskiy morskoy registr sudokhodstva, 2018. – 460 s.
- [3] Ashik, V.V. Proyektirovaniye sudov: Uchebnik. – 2-ye izd., pererab. i dop. – L.: Sudostroyeniye, 1985. – 320 s., il.
- [4] OST5R.0206–2002 Nagruzka mass grazhdanskikh i vspomogatel'nykh sudov. Klassifikatsiya elementov nagruzki. – SPb.: NII «Lot» FGUP «TSNII im. akad. A. N. Krylova», 2003. – 74 s.
- [5] Yedinaya sistema zashchity ot korrozii i stareniya. Zashchita protektornaya korpusov sudov. Pravila i normy proyektirovaniya. – L.: Tipografiya NPO «Ritm», 1980. – 21 s.
- [6] Yedinaya sistema zashchity ot korrozii i stareniya. Zashchita katodnaya korpusov sudov. Pravila i normy proyektirovaniya. – L.: Tipografiya NPO «Ritm», 1983. – 21 s.
- [7] Reydovyy buksir «RB-389». URL: <http://www.kchf.ru/ship/vspomog/rb389.htm>
- [8] Gidrograficheskoye sudno «Donuzlav». URL: <http://www.kchf.ru/ship/gidrograf/donuzlav.htm>
- [9] Plavuchaya masterskaya «PM-138». URL: <http://www.kchf.ru/ship/vspomog/pm138.htm>
- [10] Kuz'min, YU.L. Novaya sistema elektrokhimicheskoy katodnoy zashchity sudov ot korrozii / YU.L. Kuz'min, V.N. Troshchenko, T.Ye. Medyanik, G.V. Tarando, L.D. Rotts, N.N. Kuptsova // Sudostroyeniye. – SPb.: Tsentr tekhnologii sudostroyeniya i sudoremonta, 2003. – № 6. – S. 35–37.

Статья поступила в редакцию 28.06.2019 г.

УДК 629.3.016:[620.197.5:629.5.023]

Грамузов Евгений Михайлович, д-р техн. наук, профессор кафедры
«Кораблестроение и авиационная техника»

ФГБОУ ВО «НГТУ им. Р.Е. Алексеева»,

e-mail: terkor@nntu.ru

603950, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24.

Родькина Анна Владимировна, старший преподаватель кафедры
«Океанотехника и кораблестроение»

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»,

e-mail: a.v.rodkina@gmail.com

299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33.

Иванова Ольга Александровна, канд. техн. наук, инженер-конструктор

1-й категории АО «ЦКБ «Коралл»

299028, г. Севастополь, ул. Репина, 1.

доцент кафедры «Океанотехника и кораблестроение»

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»,

e-mail: o.a.ivanova.kmt@mail.ru

299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33.

АНАЛИЗ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЗАЩИТЫ КОРПУСНЫХ КОНСТРУКЦИИ СУДОВ ОТ КОРРОЗИИ

Ключевые слова: судно, защита от коррозии, стоимость, капитальные затраты, эксплуатационные затраты.

Аннотация. В статье выполнен анализ технико-экономических показателей защиты корпусных конструкций судов от коррозии. Направление исследования выбрано в связи с тем, что коррозионно-механические разрушения морских судов и плавучих технических сооружений приводят к большим экономическим убыткам. Решение проблемы коррозии относится к числу наиболее актуальных задач развития экономики России. Для достижения цели статьи применялся совокупный упрощенный расчет экономической целесообразности выбора типа защиты от коррозии корпусных конструкций судов. Выполнен расчет стоимости протекторной и катодной защиты корпусов судов, сформированы данные о зависимости капитальных вложений и эксплуатационных затрат в систему защиты от коррозии от водоизмещения судна. Определено, что для судов с водоизмещением более 6000 т в случае применения катодной защиты от коррозии вместо протекторной уменьшается суммарная стоимость защиты от коррозионно-механических разрушений. Результаты исследования могут использоваться судостроителями на этапе проектирования судов, что дает возможность правильного выбора типа защиты от коррозии и уменьшает ее суммарную стоимость.

Введение

Борьба с коррозией – важнейшая задача для кораблестроения. Вследствие коррозионно-механических разрушений гибнет большое количество морских судов и плавучих технических сооружений. Острота этой проблемы возрастает, поскольку темп роста коррозионных потерь превышает темпы роста производства металла. Причем, потеря металла не является определяющей. Реальный экономический ущерб складывается из стоимости утраченного оборудования, затрат на его ремонт и восстановление, убытков от простоя в работе, и др. В случае нарушения целостности танков морских судов и резервуаров с нефтью, газогидратами или иным сырьем для энергоресурсов, возникает угроза загрязнения окружающей среды. Загрязнение водной по-

верхности нефтепродуктами наносит большой вред экосистеме. Попавшая на поверхность воды нефть начинает быстро растекаться, тяжелые ее фракции оседают на дно, загрязняя не только береговую зону, но и дно водоемов.

Правилами Российского Морского Регистра Судоходства и других классификационных обществ предусмотрена обязательная защита морских судов от коррозии [1–5]. Одним из наиболее перспективных методов защиты от коррозии является электрохимическая защита. Сущность метода состоит в уменьшении скорости электрохимической коррозии металла при контакте с добавочным электродом, являющимся анодом по отношению к корпусным конструкциям судов и плавучих технических сооружений (протекторная защита) или при поляризации корпусных конструкций судов и плавучих технических сооружений от источника постоянного тока (катодная защита) [6].

При установке на судне системы электрохимической защиты (с расходуемыми анодами или наложенным током) подводной части корпуса, как правило, предусматривается установка контактно-щеточного устройства, предназначенного для подключения к защите валовинтового комплекса, и в то же время исключения контактной коррозии. Контактно-щеточное устройство состоит из разъемного кольца, установленного на гребном валу, щеткодержателя с медно-графитовыми щетками, зачистной проволоочной щетки и кронштейна для крепления щеткодержателей.

Протекторная защита осуществляется посредством металлических расходуемых анодов (протекторов), имеющих более электроотрицательный потенциал, чем у стали, и соединенных с корпусом либо непосредственно, либо с помощью промежуточных электрических сопротивлений, которые предназначены для ограничения развиваемых токов до величин, необходимых для защиты без лишнего расхода протекторов. Протектор имеет более отрицательный потенциал и является анодом, он отдает положительно заряженные ионы в раствор и растворяется. Избыточные электроны перетекают в корпус судна или в основание плавучего технического сооружения, имеющие более высокий электродный потенциал. Судно (основание плавучего технического сооружения) является катодом и при этом не разрушается, а электроны из него удаляются во внешнюю среду. Принцип действия протекторной защиты проиллюстрирован на рис. 1 [7].

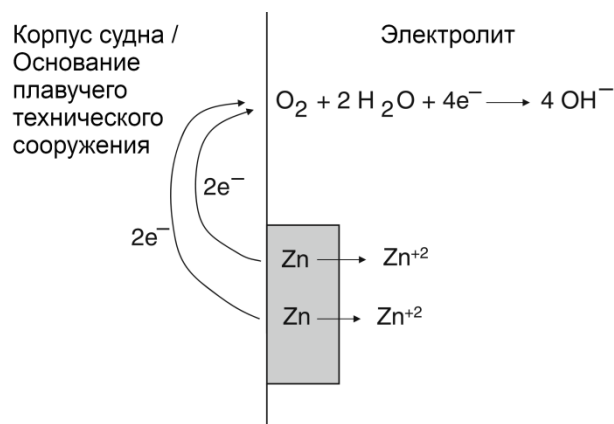


Рис. 1. Схема работы протекторной защиты

В случае системы протекторной защиты стального корпуса в качестве анода (протектора) выбирается металл с меньшим, чем у стали электрическим потенциалом (цинк, магний, алюминий и их сплавы). Между протектором и металлом корпуса создается электрический контакт и образуется гальваническая пара. Протекторы применяются для местной и общей защиты корпусов, балластных танков и отсеков от коррозии, могут располагаться одиночно или группами [8].

Общая протекторная защита подводной части корпуса (рис. 2) устанавливается в районе скуловых поясов вдоль корпуса судна, в районе носовой и кормовой части – на уровне линии гребного вала.

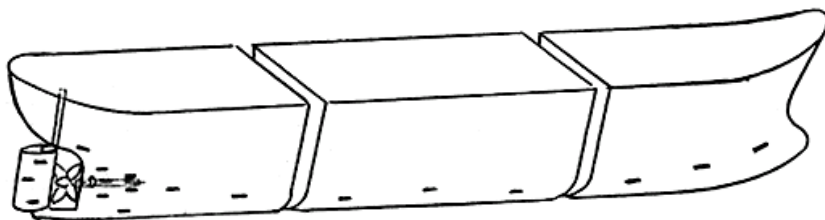


Рис. 2. Принципиальная схема размещения протекторов на подводной части корпуса судна [8]

Такая защита – наиболее простой из известных эффективных способов предотвращения коррозии. Монтаж и обновление протекторной защиты не вызывает каких-либо трудностей как при строительстве судов, так и при их ремонте. Принципиально срок службы ее может быть задан любым, в зависимости от количества протекторов. Путем изменения материала и типоразмеров протекторов может быть обеспечена защита практически во всех морских бассейнах [9].

Механизм электрохимической защиты металлов от коррозии с помощью анодного протектора состоит в том, что при протекании электрического тока через границу защищаемого металла с коррозионной средой поверхность защищаемого металла поляризуется катодно, ее потенциал уменьшается, что может приводить к почти полному прекращению коррозионного разрушения. На поверхности протектора при этом протекает анодный процесс, который постепенно приводит к его растворению (рис. 3), поэтому протектор необходимо периодически возобновлять, каждые 3–4 года [10]. Параметры протекторов регламентируются ГОСТ 26251–84, правила и нормы проектирования защиты протекторной корпусов судов основаны на руководящем документе 5.9042–80.



Рис. 3. Протектор в начале эксплуатации (слева) и в конце срока службы (справа) [11]

Но в случае коррозионно-механических разрушений корпусов корпусных конструкций судов и плавучих технических сооружений, протекторная защита не в силах в полной мере противостоять этому типу коррозионных разрушений [12, 13].

Катодная поляризация – это активный способ защиты металла от разрушений. Она позволяет использовать в самых широких интервалах потенциал и ток защиты, в ней заложены возможности регулирования параметров защиты, в том числе и автоматического. Эффективность катодной поляризации, в отличие от покрытий, не зависит

от времени эксплуатации. Она может применяться самостоятельно и в сочетании с другими способами защиты: покрытиями, упрочнениями и т.д.

Сущность катодной защиты заключается в уменьшении скорости электрохимической коррозии металла при поляризации корпусных конструкций судов и плавучих технических сооружений от источника постоянного тока. Судно присоединяется к отрицательному выводу источника постоянного тока, а анод – к положительному выводу (рис. 4).

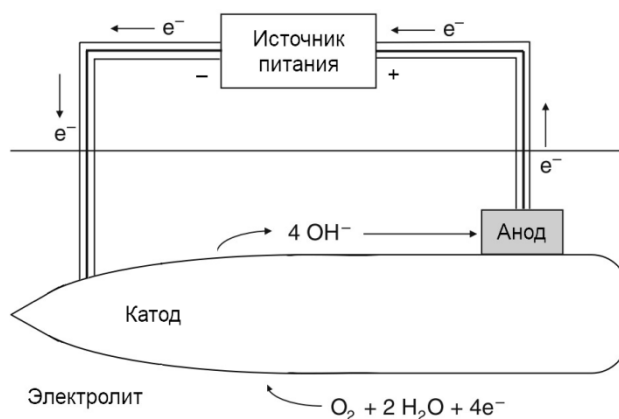


Рис. 4. Схема работы катодной защиты наложенным током [7]

Производится поляризация поверхности корпуса судна при постоянной плотности тока, в морской воде происходит накопление продуктов коррозии или катодного осадка на поверхности, что приводит к изменению сопротивления поверхности. Соответственно потенциал смещается в отрицательном направлении, при невысоких потенциалах происходит ионизация кислорода, а когда потенциал смещается еще отрицательнее – механизм электродного процесса меняется и начинается выделение водорода, что ведет к наводораживанию металла и дальнейшему охрупчиванию, чего нельзя допускать.

Системы катодной защиты наложенным током состоят из следующих основных элементов: анодов с околанодными экранами, источников питания с измерительной и регулирующей аппаратурой, электродов сравнения, силовых кабелей для подключения анодов и кабелей для подключения электродов сравнения и других, а также щита управления системы катодной защиты. В систему катодной защиты входят также сальниковые уплотнения и защитные коробки в местах токоподвода к анодам через обшивку корпуса и в местах установки электродов сравнения (рис. 5) [14].

Принципиальная схема системы катодной защиты наложенным током подводной части корпуса судна согласно [8] представлена на рис. 6.

Катодная защита в большинстве случаев не требует ее замены в течение всего срока службы океанотехнического сооружения и обеспечивает оптимальную защиту корпуса в различных условиях эксплуатации и при различной степени износа его лакокрасочного покрытия; обеспечивает полное подавление коррозии основного металла обшивки и сварных швов корпуса, независимо от вида используемых сварочных материалов и режимов сварки; позволяет снизить шероховатость обшивки и увеличить междоковый период эксплуатации корпусных конструкций судов и плавучих технических сооружений, а для проектируемых новых океанотехнических сооружений – уменьшить массу за счет исключения увеличенной толщины конструкций на величину коррозионного износа и применения низколегированных сталей повышенной прочности [15].

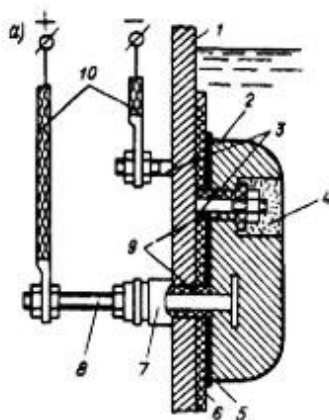


Рис. 5. Схема крепления анода к корпусу судна: 1 – наружная обшивка; 2 – анод; 3 – приварные шпильки; 4 – герметик; 5 – резиновая прокладка; 6 – стеклопластиковый экран; 7 – сальник; 8 – контактная шпилька; 9 – изоляционные втулки; 10 – кабель

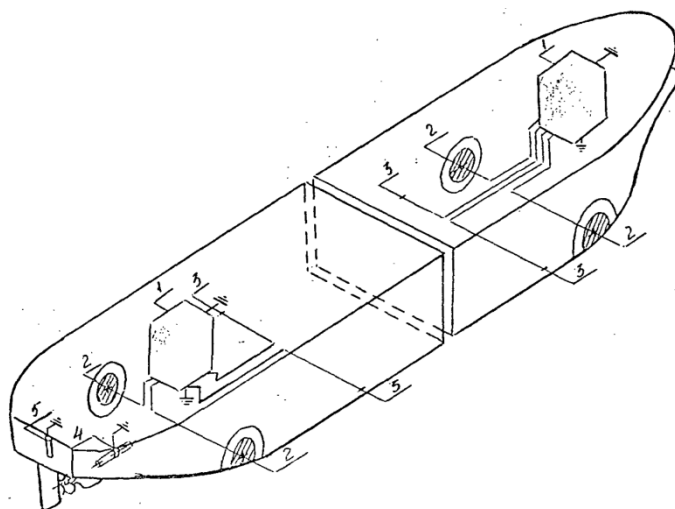


Рис. 6. Принципиальная схема системы катодной защиты наложенным током подводной части корпуса судна: 1 – источник питания и распределительный щит, 2 – анодные узлы с околоанодными экранами, 3 – электрод сравнения, 4 – контактно-щеточное устройство, 5 – кабель для заземления руля

Наиболее важной характеристикой данных систем является возможность автоматически выявлять электрический потенциал на поверхности корпуса и соответственно увеличивать или уменьшать выходной ток с анода. Таким способом судно получает постоянный оптимальный уровень защиты. Электрический потенциал отслеживается контрольными электродами. Одна из инноваций компании Cathelco (рис. 7) [16] – аноды, заменяемые водолазом на внешней поверхности корпуса, которые были разработаны для плавучих систем нефтедобычи, хранения и выгрузки и судов, имеющих длительные периоды между заходами в сухой док. Это происходит при помощи установочной «втулки», что достигается смолением анода при его производстве и заменяет обыкновенную электропроводку. Была также разработана водонепроницаемая система уплотнительной крышки и уплотнительного кольца, обеспечивающая передачу.

Анализ технико-экономических показателей

Для оценки экономической эффективности применения катодной защиты сравним стоимость протекторной и катодной защиты корпусов судов.

Стоимость протекторной защиты (таблица 1) рассчитывается, исходя из ее массы. Суммарная стоимость замены протекторов каждые 4 года в целях учета фактора времени рассчитывалась с использованием способа корректировки денежной единицы по схеме сложного процента. Сложный процент – процент за каждый очередной период начисляется на первоначальную базу в сумме с ранее начисленным процентом [17].

Таблица 1

Стоимость протекторной защиты корпусов судов

	Рейдовый буксир «РБ-389»	Гидрографическое судно «Донгузлав»	Плавучая мастерская «ПМ-138»	Нефтеналивное судно «Балт Флот 11»	Накатное/Ген-груз/Контейнерное судно «Адлер»	Рефрижераторное судно «Босфор Восточный»
Масса протекторной защиты, кг	280	722	1 817	2 170	2 754	3 630
Стоимость 1 кг, тыс. руб.	0,324	0,324	0,324	0,324	0,324	0,324
Стоимость протекторов, тыс. руб.	91	234	589	703	892	1 176
Стоимость установки протекторной защиты (замены – каждые 4 года), тыс. руб.	30	62	148	172	221	295
Стоимость протекторной защиты (Капитальные затраты), тыс. руб.	120	295	736	875	1114	1471
Материальные затраты на протекторную защиту за 35 лет, тыс. руб.	1 518	5 950	14 829	17 628	22 430	29 633

Стоимость денежной единицы на будущий момент времени (1):

$$C_{\text{буд}} = C_{\text{тек}} \cdot K_{\text{сл.}\%i}, \quad (1)$$

где $C_{\text{тек}}$ – стоимость денежной единицы на текущий (настоящий) момент времени,

$K_{\text{сл.}\%i} = (1 + i)^n$ – коэффициент сложного процента, соответствующий периоду пересчета,

где i – период, год замены протекторной защиты от первоначальной установки.

Расчет суммарной стоимости замены протекторов для исследуемых судов за 35 лет представлен в таблице 2 на примере нефтеналивного судна «Балт Флот 11».

Таблица 2

Стоимость замены протекторов для нефтеналивного судна

Период, год эксплуатации	4	8	12	16	20	24	28	32
Коэффициент сложного процента, соответствующий периоду пересчета	1,19	1,42	1,70	2,02	2,41	2,88	3,43	4,09
Стоимость на будущий момент времени, тыс. руб.	1044	1245	1484	1770	2111	2517	3002	3580
Суммарная стоимость за 35 лет, тыс. руб.	16 753							

Стоимость катодной защиты корпусов судов рассчитывается как сумма стоимости всех элементов (таблица 3).

Таблица 3

Стоимость катодной защиты корпусов судов

	РБ-389	Донузлав	ПМ-138	Балт Флот 11	Адлер	Босфор Восточный
Количество анодных узлов, шт	6	12	18	12	14	16
Аноды типа АУ-1М, тыс. руб.	870	1740	2610	1740	2030	2320
Количество электродов срав- нения, шт	2	4	6	4	4	4
Электроды сравнения ЭСХП- СС, тыс. руб.	60	120	180	120	120	120
Количество преобразователей	1	2	3	2	2	3
Преобразователи ТПЦЗ-200- 24, тыс. руб.	350	700	1050	700	700	1050
Распределительные щиты, си- ловые и контрольные кабели, контактно-щеточное устрой- ство, тыс. руб.	154	307	461	307	342	419
Стоимость катодной защиты (Капитальные затраты), тыс. руб.	1434	2867	4301	2867	3192	3909
Стоимость катодной защиты (Ежегодные эксплуатационные затраты), тыс. руб.	9	39	71	107	104	135
Материальные затраты на катодную защиту за 35 лет, тыс. руб.	2 195	6 219	10 386	11 961	12 049	12 830

Анализ проведенных расчетов показывает, что капитальные вложения (рис. 7) в систему катодной защиты **больше**, чем на систему протекторной защиты: ~ в 11,9 раз для рейдового буксира «РБ-389», ~ в 9,7 раз для гидрографического судна «Донузлав», ~ в 5,8 раз для Плавучей мастерской «ПМ-138», ~ в 3,3 раза для нефтеналивного судна «Балт Флот 11», ~ в 2,9 раз для контейнерного судна «Адлер», ~ в 2,7 раз для рефрижераторного судна «Босфор Восточный».

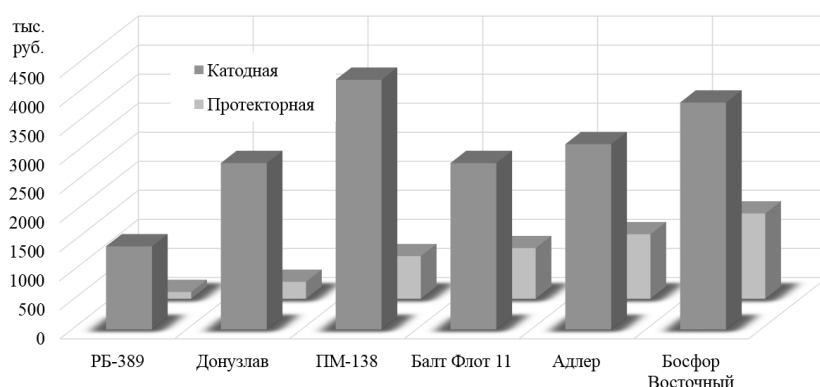


Рис. 7. Капитальные затраты на защиту от коррозии

Таким образом, прослеживается зависимость уменьшения разницы в начальной стоимости защиты от коррозии с увеличением водоизмещения судна.

Эксплуатационные затраты от системы катодной защиты вычисляются в зависимости от необходимой плотности защитного тока, номинального напряжения и площади смоченной поверхности. Во-первых, выполняется расчет мощности, потребляемой катодной защитой, по формуле (2):

$$N_{\text{к.з.}} = I_{\text{к.з.}} \cdot U, \text{ кВт}, \quad (2)$$

где $I_{\text{к.з.}} = S_{\text{см}} \cdot i$ – ток катодной защиты, А,

$S_{\text{см}}$ – площадь смоченной поверхности корпуса судна, м²,

i – плотность тока катодной защиты, А/м²,

U – номинальное напряжение, В.

Количество топлива, необходимого для работы катодной защиты:

$$Q_{\text{т}} = q_{\text{т}} \cdot N_{\text{к.з.}} \cdot t, \quad (3)$$

где $q_{\text{т}} = 0,2 \cdot 10^{-3}$ т/кВт · ч – удельный расход топлива,

t – время, для расчета массы топлива в сутки принимается $t = 24$ ч.

Расходы на топливо в год:

$$C_{\text{т}} = S \cdot Q_{\text{т}}, \text{ тыс. руб.}, \quad (4)$$

где S – стоимость топлива.

Расчет выполнялся в табличной форме (таблица 4).

Таблица 4

Стоимость эксплуатационных затрат от катодной защиты корпусов судов

	РБ-389	Донузлав	ПМ-138	Балт Флот 11	Адлер	Босфор Восточный
Плотность защитного тока, А/м ²	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Площадь смоченной поверхности судна, м ²	265,776	1 170,512	2 125,261	3 175,898	3 093,258	4 004,432
Требуемый защитный ток, А	5,316	23,410	42,505	63,518	61,865	80,089
Номинальное напряжение, В	24,000	24,000	24,000	24,000	24,000	24,000
Мощность, кВт	0,128	0,562	1,020	1,524	1,485	1,922
Удельный расход топлива, т/кВт ч	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002
Масса топлива в сутки, т	0,001	0,003	0,005	0,007	0,007	0,009
Стоимость топлива в год, тыс. руб.	8,940	39,374	71,490	106,832	104,052	134,703

Суммарная стоимость эксплуатационных затрат катодной защиты (таблица 5) за каждые год в целях учета фактора времени рассчитывалась с использованием способа

корректировки денежной единицы по схеме сложного процента, аналогично суммарной стоимости замены протекторов.

Таблица 5

Ежегодные эксплуатационные затраты на примере рефрижераторного судна

Период, год эксплуатации	2	3	4	5	...	33	34	35
Коэффициент сложного процента, соответствующий периоду пересчета	1,09	1,14	1,19	1,25	...	4,27	4,47	4,67
Стоимость на будущий момент времени, тыс. руб.	147	119	124	130	...	445	465	486
Суммарная стоимость за 35 лет, тыс. руб.	8 786							

За весь период эксплуатации материальные затраты (рис. 8) на систему катодной защиты меньше, чем на систему протекторной защиты: ~ в 1,4 раза для Плавучей мастерской «ПМ-138», ~ в 1,5 раз для Нефтеналивного судна «Балт Флот 11», ~ в 1,9 раз для контейнерного судна «Адлер», ~ в 2,3 раза для рефрижераторного судна «Босфор Восточный». Однако, для Рейдового буксира «РБ-389» и Гидрографического судна «Донузлав» материальные затраты за весь период эксплуатации практически равны в случае применения как протекторной, так и катодной защиты.

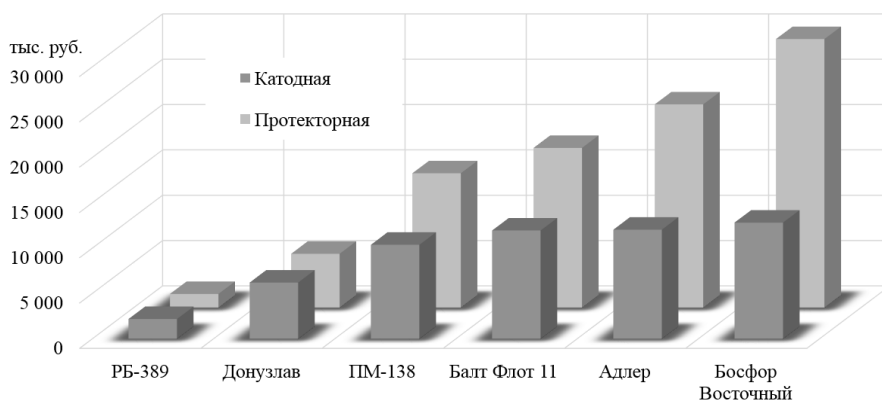


Рис. 8. Материальные затраты на защиту от коррозии за 35 лет

Таким образом, прослеживается зависимость увеличения разницы затрат за весь период эксплуатации на защиту от коррозии с увеличением водоизмещения судна. Достоверность результатов обеспечивается непротиворечивостью данным других исследований.

Границы целесообразности выбора одного из вариантов защиты показаны на графиках приведенных затрат различных судов от срока эксплуатации судна (рис. 9–14).

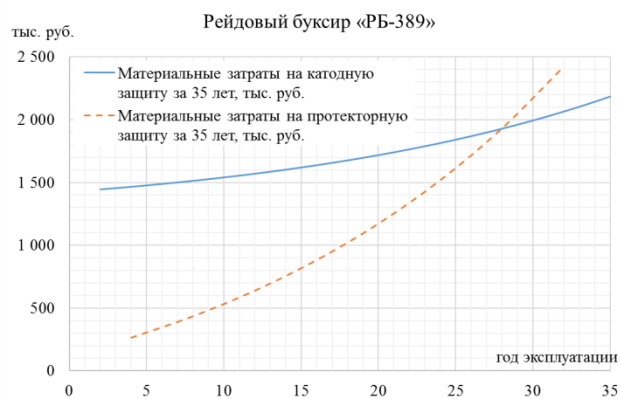


Рис. 9.

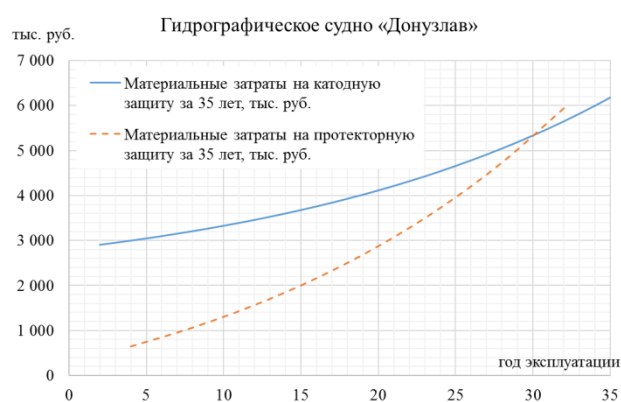


Рис. 10.

Из рисунков 9–10 видно, что суммарная стоимость катодной защиты становится меньше протекторной после 30 лет эксплуатации.

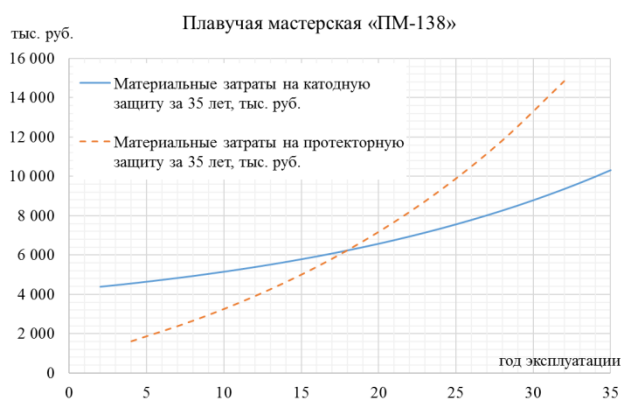


Рис. 11.

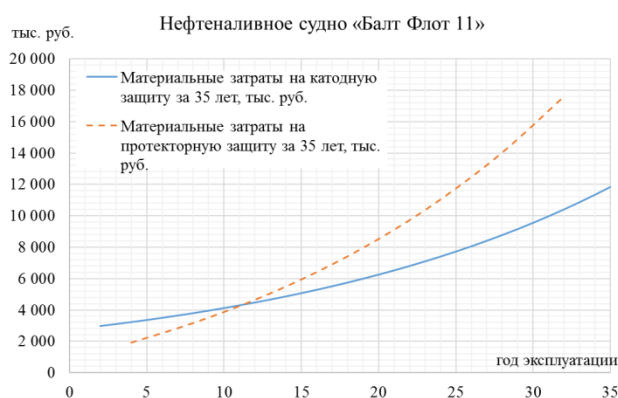


Рис. 12.

Рис. 11 показывает, что суммарная стоимость катодной защиты становится меньше протекторной после 18 лет эксплуатации, рис. 12 – 12 лет.

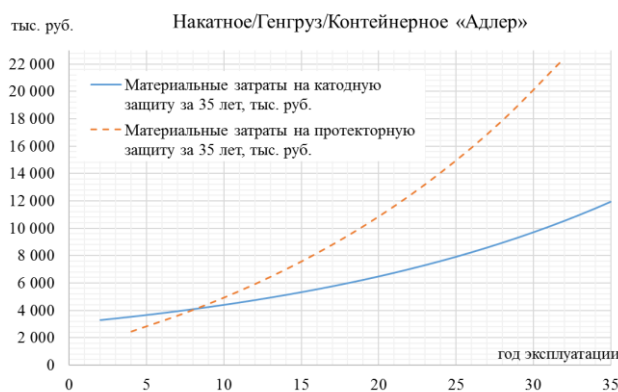


Рис. 13.

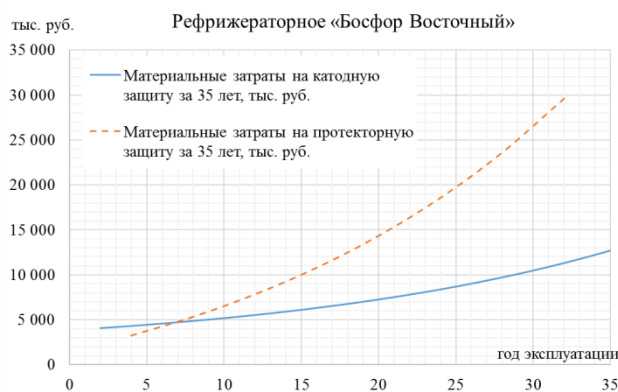


Рис. 14.

Из рис. 13–14 видно, что суммарная стоимость катодной защиты становится меньше протекторной до достижения 8 лет эксплуатации.

Таким образом, экономически эффективно применять систему катодной защиты для судов с водоизмещением более 6000 т. Учитывая, что площадь смоченной поверхности плавучих технических сооружений значительно превышает данную величину судов с водоизмещением 6000 т, то рекомендовано применять катодную защиту для них, основываясь на экономической выгоде.

Однако при выборе типа защиты необходимо учитывать побочные эффекты от применения катодной защиты наложенным током при потенциале незаряженной поверхности на ювенильной поверхности стали, нуждающиеся в дополнительной проработке и исследованиях:

- установленные заподлицо анодные узлы уменьшают влияние системы защиты от коррозии на сопротивление движению судна,
- отсутствие необходимости замены элементов защиты и точность применяемого значения защитного потенциала позволят увеличить междоковый период эксплуатации корпусов морских судов и сооружений,
- возможное положительное влияние на борьбу с обрастанием корпусных конструкций судов и плавучих технических сооружений.

Заключение

Технико-экономический анализ показал, что для судов с водоизмещением более 6000 т в случае применения катодной защиты от коррозии вместо протекторной уменьшается суммарная стоимость защиты от коррозионно-механических разрушений.

Технико-экономический анализ показал выгоду применения протекторной защиты на этапе капитальных затрат, однако при выборе типа защиты необходимо учитывать и побочные эффекты от применения катодной защиты наложенным током при потенциале незаряженной поверхности на ювенильной поверхности стали. Катодная защита значительно выгоднее протекторной на протяжении всего срока эксплуатации, причем с увеличением водоизмещения судна увеличивается разница в суммарной стоимости протекторной и катодной защиты.

Список литературы:

- [1] Правила классификации и постройки морских судов. Часть II. Корпус. – СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2019. – 278 с.
- [2] Правила классификации, постройки и оборудования плавучих буровых установок и морских стационарных платформ. – СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2018. – 460 с.
- [3] Corrosion Protection of Ships. – Det Norske Veritas, 2000. – 38 p.
- [4] Recommended practice – DNVGL-RP-B401. – DNV GL AS, June 2017. – 64 p.
- [5] NACE Standard SP0387-2006 (formerly RP0387-99) Item No. 21036. – NACE International, 2006. – 9 p.
- [6] Семенова, И.В. Коррозия и защита от коррозии / И.В. Семенова, Г.М. Флорианович, А.В. Хорошилов. Под ред. И.В. Семеновой. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. – 416 с.
- [7] McCafferty, E. Introduction to Corrosion Science. ISBN 978-1-4419-0454-6 / E. McCafferty. – Springer Science+Business Media, LLC, 2010. – 575 p.
- [8] РД 31.28.10–97 Комплексные методы защиты судовых конструкций от коррозии. – М.: ЦНИИМФ, 1997. – 169 с.
- [9] Люблинский Е. Я. Протекторная защита морских судов и сооружений от коррозии / Е. Я. Люблинский. – Л.: Судостроение, 1979. – 188 с.
- [10] Березин, Н.Б. Катодное восстановление и анодное формирование комплексов металлов / Н.Б. Березин, Т.Н. Березина, Ж.В. Межевич, Ю.В. Новоселова, В.А. Сысоев // Вестник технологического университета, 2015. – Т.18, №6. – С.75–77.
- [11] Арчибисов, Д.А. Контроль качества материалов и работ в ходе ремонта средств противокоррозионной защиты корпуса на маломерных судах / Д.А. Арчибисов, В.А. Швецов // Вестник

- Камчатского государственного технического университета, ISSN 2079-0333. – Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ, 2018. – № 44. – С. 6–11. DOI: 10.17217/2079-0333-2018-44-6-13
- [12] Ожиганов Ю.Г. Существующие и перспективные системы защиты от коррозионно-механических разрушений подводной поверхности морских судов и сооружений / Ю.Г. Ожиганов, А.В. Родькина, Е.В. Азаренко, А.А. Огородова // Збірник наукових праць Севастопольського національного університету ядерної енергії та промисловості, 2011. – Вип. 4(40). – С. 146–153.
- [13] Kramar, Vadim; Dushko, Veronika; Rodkina, Anna; Zaiets, Anastasiia (2015). Influence of Stress-Corrosion Fractures on Potential of Ship-Building Metals in the Sea Water. 25th DAAAM International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation, 2014, Guest Editor B.[ranko] Katalinic, Procedia Engineering, Volume 100, 2015, ISSN 1877-7058, 26-29th November 2014, Vienna, Austria, Published by Elsevier, Ltd. P. 1068-1074. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.01.468>
- [14] Бэкман, В. Катодная защита от коррозии. Справочник / В. Бэкман, В. Швенк, под редакцией И. В. Стрижевского. – М.: Металлургия, 1984. – 496 с.
- [15] Кузьмин, Ю.Л. Новая система электрохимической катодной защиты судов от коррозии / Ю.Л. Кузьмин, В.Н. Трошенко, Т.Е. Медяник, Г.В. Тарандо, Л.Д. Ротц, Н.Н. Купцова // Судостроение. – СПб.: Центр технологии судостроения и судоремонта, 2003. – № 6. – С. 35–37.
- [16] Cathelco ICCP hull corrosion protection systems [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.cathelco.com.sg/iccp/>
- [17] Экономическая эффективность технических решений: учебное пособие / С.Г. Баранчикова [и др.]; под общ. ред. проф. И. В. Ершовой. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2016. – 140 с.

ANALYSIS OF TECHNICAL AND ECONOMIC INDICATORS OF SHIPS HULL CONSTRUCTION CORROSION PROTECTION

Gramuzov Evgeniy M., Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Shipbuilding and Aircraft Engineering Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev,
24, Minin st., Nizhny Novgorod, 603950

Rodkina Anna V., Senior Lecturer of the Department of Ocean Technology and Shipbuilding Sevastopol State University,
33, Universitetskaya st., Sevastopol, 299053

Ivanova Olga A., Candidate in Engineering Science, Design Engineer of 1st Category of General Engineering and Naval Architecture Departament 11, General Engineering Office 111 «Corall» JSC 299028, Sevastopol; Central Design Bureau, Associate Professor of the Department of Ocean Technology and Shipbuilding Sevastopol State University
33, Universitetskaya st., Sevastopol, 299053

Keywords: ship, corrosion protection, cost, capital costs, operating costs.

The article analyzes the technical and economic indicators of the ship hulls corrosion protection. The direction of the investigation was chosen due to the fact that the corrosion-mechanical destruction of ships and floating technical structures leads to large economic losses. The solution to the problem of corrosion is among the most pressing problems in the development of the Russian economy. To achieve the goal of the article, a cumulative simplified calculation of the economic feasibility of choosing the type of corrosion protection for ship hull structures was used. The calculation of the ship hulls corrosion protection cost has done, data on the dependence of capital investments and operating costs in the system of corrosion protection on the ship displacement were formed. It was determined that for vessels with a displacement of more than 6000 tons in the case of applying cathodic protection by impressed current against corrosion instead of cathodic protection by sacrificial anodes, the total cost of protection against corrosion-mechanical damage is reduced. The results of the study can be used by shipbuilders at the ships design stage, which allows the correct choice of the corrosion protection type and reduces its total cost.

References:

- [1] Pravila klassifikatsii i postroyki morskikh sudov. Chast' II. Korpus. – SPb.: Rossiyskiy morskoy registr sudokhodstva, 2019. – 278 s.
- [2] Pravila klassifikatsii, postroyki i oborudovaniya plavuchikh burovykh ustanovok i morskikh statsionarnykh platform. – SPb.: Rossiyskiy morskoy registr sudokhodstva, 2018. – 460 s.
- [3] Corrosion Protection of Ships. – Det Norske Veritas, 2000. – 38 p.
- [4] Recommended practice – DNVGL-RP-B401. – DNV GL AS, June 2017. – 64 p.
- [5] NACE Standard SP0387-2006 (formerly RP0387-99) Item No. 21036. – NACE International, 2006. – 9 p.
- [6] Semenova, I.V. Korroziya i zashchita ot korrozii / I.V. Semenova, G.M. Florianovich, A.V. Khoroshilov. Pod red. I.V. Semenovoy. – 3-ye izd., pererab. i dop. – M.: FIZMATLIT, 2010. – 416 s.
- [7] McCafferty, E. Introduction to Corrosion Science. ISBN 978-1-4419-0454-6 / E. McCafferty. – Springer Science+Business Media, LLC, 2010. – 575 p.
- [8] RD 31.28.10–97 Kompleksnyye metody zashchity sudovykh konstruktсий ot korrozii. – M.: TSNIIMF, 1997. – 169 s.
- [9] Lyublinskiy Ye. YA. Protektornaya zashchita morskikh sudov i sooruzheniy ot korrozii / Ye. YA. Lyublinskiy. – L.: Sudostroyeniye, 1979. – 188 s.
- [10] Berezin, N.B. Katodnoye vosstanovleniye i anodnoye formirovaniye kompleksov metallov / N.B. Berezin, T.N. Berezina, Zh.V. Mezhevich, Yu.V. Novoselova, V.A. Sysoyev // Vestnik tekhnologicheskogo universiteta, 2015. – T.18, №6. – S.75–77.
- [11] Archibisov, D.A. Kontrol' kachestva materialov i rabot v khode remonta sredstv protivokorroziyonnoy zashchity korpusa na malomernykh sudakh / D.A. Archibisov, V.A. Shvetsov // VESTNIK Kamchatskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, ISSN 2079-0333. – Petropavlovsk-Kamchatskiy: KamchatGTU, 2018. – № 44. – S. 6–11. DOI: 10.17217/2079-0333-2018-44-6-13
- [12] Ozhiganov, YU. G. Sushchestvuyushchiye i perspektivnyye sistemy zashchity ot korroziyonno-mekhanicheskikh razrusheniy podvodnoy poverkhnosti morskikh sudov i sooruzheniy / YU.G. Ozhiganov, A.V. Rod'kina, Ye.V. Azarenko, A.A. Ogorodova // Zbirnik naukovikh prats' Sevastopol'skogo natsional'nogo univ'sitetu yadernoy yenergiï ta promislivosti, 2011. – Vip. 4(40). – S. 146–153.
- [13] Kramar, Vadim; Dushko, Veronika; Rodkina, Anna; Zaiets, Anastasiia (2015). Influence of Stress-Corrosion Fractures on Potential of Ship-Building Metals in the Sea Water. 25th DAAAM International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation, 2014, Guest Editor B.[ranko] Katalinic, Procedia Engineering, Volume 100, 2015, ISSN 1877-7058, 26-29th November 2014, Vienna, Austria, Published by Elsevier, Ltd. P. 1068-1074. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.01.468>
- [14] Bekman, V. Katodnaya zashchita ot korrozii. Spravochnik / V. Bekman, V. Shvenk, pod redaktsiyey I.V. Strizhevskogo. – M.: Metallurgiya, 1984. – 496 s.
- [15] Kuz'min, YU.L. Novaya sistema elektrokhimicheskoy katodnoy zashchity sudov ot korrozii / YU.L. Kuz'min, V.N. Troshchenko, T.Ye. Medyanik, G.V. Tarando, L.D. Rotts, N.N. Kuptsova // Sudostroyeniye. – SPb.: Tsentr tekhnologii sudostroyeniya i sudoremonta, 2003. – № 6. – S. 35–37.
- [16] Cathelco ICCP hull corrosion protection systems [Электронный ресурс]. –Режим доступа: <http://www.cathelco.com.sg/iccp/>
- [17] Ekonomicheskaya effektivnost' tekhnicheskikh resheniy: uchebnoye posobiye / S.G. Baranchikova [i dr.]; pod obshch. red. prof. I. V. Yershovoy. – Yekaterinburg: Izd-vo Ural. un-ta, 2016. – 140 s.

Статья поступила в редакцию 28.06.2019 г.

УДК 629.12

Роннов Евгений Павлович, доктор технических наук,
профессор ФГБОУ ВО «ВГУВТ»
e-mail: ptps@vgavt-nn.ru

Корепанов Алексей Эдуардович, аспирант ФГБОУ ВО «ВГУВТ»
e-mail: A.E.Korepanov@yandex.ru
603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5

ТРИМАРАНЫ: СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

Ключевые слова: *тримаран, аутригеры, многокорпусные суда, скоростные пассажирские тримараны, относительное удлинение, благоприятная интерференция системы волн.*

Аннотация. В статье отражена история, состояние развития и сложившиеся тенденции проектирования судов-тримаранов. Показано как сформировалась терминология по судам данного типа, приведены сведения об основных элементах и характеристиках современных крейсерских, пассажирских и военных судов-тримаранов. На основании анализа данных по построенным тримаранам сделаны общие выводы. Отмечены преимущества и недостатки этих судов, определены перспективные направления исследований по их проектированию, а именно при какой длине, ширине, водоизмещении рационально с точки зрения скоростного режима использовать ту или иную схему расположения аутригеров по длине и ширине судна с целью достижения благоприятной волновой интерференции основного корпуса и аутригеров.

Тримаран – это трехкорпусное судно, состоящее из основного корпуса (vaka) и двух меньших аутригеров (ama), жестко соединенных с основным корпусом боковыми балками (aka).

Конструкция и названия частей тримарана (vaka, ama, aka) взяты у парусного судна народов Полинезии в Тихом океане, которые строились полинезийцами и другими коренными жителями островов Тихого океана почти 4000 лет назад, и большая часть современной терминологии позаимствована именно у них.

Отцом первой трехкорпусной яхты построенной в 1945 г., является Виктор Четет (русский иммигрант, пропагандист многокорпусных судов). Ему же принадлежала идея назвать суда данного типа тримаранами.

Многокорпусные парусники (тримараны) стали популярными в 60–70-е годы XX века (таблица 1). Артур Пивер несомненно открыл новую эру в трансокеанских плаваниях, переплыв в июне 1960 г. Атлантику на построенном им тримаране «Нимбл» («Быстрый»). С тех пор тримараны неоднократно пересекали океан. В 1966 г. многокорпусные суда стартовали в двух крупнейших крейсерских гонках – вокруг Англии и Транстихоокеанской. Несмотря на то, что большинство участников выступало на катмаранах, победителем в первой из этих гонок и вторым призером во второй оказались тримараны.

Одним из главных достоинств многокорпусных парусных яхт-тримаранов, помимо большой полезной площади палуб, является меньшая амплитуда качки. Когда простое судно даже на малой волне начнет переваливаться с борта на борт, а пассажиры почувствуют первые признаки «морской болезни», в каютах тримарана, почувствуют лишь легкий перекач [1].

В конце XX века многокорпусные суда получили новый импульс в развитии с появлением тримаранов коммерческого и специального назначения. Мировой рынок динамично развивается и в мировом судостроении увеличился интерес к строительству

ву и использованию скоростных пассажирских тримаранов для пассажирских и автомобильно-пассажирских перевозок. В настоящее время принцип тримарана широко используется в пассажирских паромов и современных боевых кораблях (таблица 2).

Таблица 1

Основные данные крейсерских яхт-тримаранов

Название	Главные размеры LxB, м	Парусность, м ²	Водоизмещение порожнем, кг	Число спальных мест	Вид двигателя и мощность, л.с.	Материалы
«Кросс-24»	7,2х4,3	22	400	3	-	Ф-Пл
«Каравелла»	7,9х5,2	33	-	3	-	Пл
«Три Стар 28»	8,6х5,0	30	-	5	Ст: 7,5	Ф-Пл
«Нимбл»	9,1х5,5	30	1050	5	П/м	Ф-Пл
«Триун»	9,1х5,5	41	1830	5	П/м	Ф-Пл
«Свин Уинг»	9,2х6,9	37	2360	5	Ст	Пл
«Веgebенд-II»	11,0х6,2	47	2260	5	П/м: 16	Ф-Пл
«Оф Саундинг»	11,6х6,7	58	2900	7	Ст: 30	Ф-Пл
«Три Стар 40»	11,9х6,4	53	3580	9	Ст: 28	Ф-Пл
«Виктрис»	12,2х6,7	45	3400	8	Ст: 30	Ф-Пл
«Ториа»	12,8х6,8	50	3000	-	П/м	Ф-Пл
«Вильямс-44»	13,4х6,7	87	3860	8	-	Ф-Пл
«Триидент»	14,0х7,3	36	5350	8	Ст: 50	Ф-Пл
Обозначение: Ф – фанера, Пл – стеклопластик, П/м – подвесной мотор, Ст – стационарный двигатель.						

Таблица 2

Основные характеристики судов-тримаранов

Название судна	Главные размеры LxBxT, м	Водоизмещение, т	Мощность, кВт	Скорость, км/ч	Пассажироместимость, чел
«R.V. Triton»	97х22,5х3	1200	Дизель – элек.: 20 655	37	Экипаж: 14
«Benchijigua»	126,7х30,4х4	2784	Дизель: 4 х 8200	74	1290 + 340 автомобиль
«Klewang»	62,5х15х1,2	130	Дизель: 4 х 1342	65	Экипаж: 27
«Independence»	127,8х30,4х4,6	2637	Турбины: 2 х 21998 Дизель: 2х9099	83	Экипаж: 50
«Cable and Wireless Adventurer»	35х14х1,3	53	Дизель: 2 х 261	45	14
«Earthrace»/ «Ady Gil»	24х7х1,2	13	Дизель: 2 х 400	93	Экипаж: 8

В 2000 г. в Великобритании верфью «Vosper Thornycroft» был построен экспериментальный тримаран военного назначения «R. V. Triton» (рис. 1) водоизмещением 1100 т. До конца 2004 г. он был крупнейшим в мире трехкорпусным судном. Центральный корпус этого судна имеет относительное удлинение длины к ширине – 14, а «супертонкие» ауригеры (34м / 1,4м) – 24,3 [2].



Рис. 1. Тримаран военного назначения «R. B. Triton»

В 2004 г. австралийская фирма «Austal Ships» закончила постройку грузопассажирского скоростного тримарана типа «Auto-Express» [3], [4], [5] под названием «Benchijigua» (рис. 2). Это судно является на сегодня одним из крупнейших в мире тримаранов, длина которого составляет 126,7 м. Его корпус и надстройка полностью изготовлены из алюминия. Оно способно перевозить 1290 пассажиров и 340 автомобилей со скоростью 40 узлов. Конструкция корпуса судна основана по принципу SWATH (small waterplane area twin hull – «судно с малой площадью сечения по ватерлинии»), получившая название TRISWACH (trimaran small waterplane area central hull – «тримаран с малой площадью сечения по ватерлинии центрального корпуса») [2].



Рис. 2. Грузопассажирский скоростной тримаран «Benchijigua»

Той же фирмой «Austal Ships» на основе скоростного тримарана «Benchijigua» в 2010 году был построен и вступил в состав ВМС США прибрежный боевой тримаран под названием «Independence» (рис. 3) типа «LCS-2» (littoral combat ships – «прибрежный боевой корабль»). По состоянию на 2010 год, «Independence» и «Benchijigua» являются крупнейшими тримаранами в мире. Тримаран «Independence» имеет длину 127,4 метра. Дизайн тримарана обеспечивает повышенную устойчивость на море, а также значительные объемы внутренних отсеков и большую грузоподъемность.



Рис. 3. Прибрежный боевой тримаран «Independence»

Применение судов тримаранов явилось следствием ряда их положительных качеств и прежде всего, достижения существенного снижения сопротивления движению. Дело в том, что относительная скорость этих судов находится в диапазоне числа Фруда по водоизмещению $Fr_{\Delta} = 1.7 \div 2.6$, то есть соответствует переходному от плавания к глиссированию режиму движения. Этот режим характеризуется существенной продольной неустойчивостью, особенно при ходе на волнении, значительным увеличением волнового сопротивления, составляющего основную часть от полного, и соответственно ростом мощности энергетической установки. Это делает использование водоизмещающих судов при таких режимах движения экономически не рациональными. Уменьшить волновое сопротивление водоизмещающего судна можно за счет значительного увеличения относительной длины $l = \frac{L}{\sqrt[3]{V}}$ или отношения длины к

ширине. Снижение волнового сопротивления может быть достигнуто на так называемых судах с малой площадью ватерлинии. На них гидростатическая сила плавучести обеспечивается подводными обтекающими гондолами, не создающими волновое сопротивление. Малую площадь ватерлиний создают стойки, соединяющие гондолы с корпусом судна, расположенным над поверхностью воды. Суда имеют большие осадки и поэтому имеют перспективу только для морских перевозок. На тримаранах достигается значительное уменьшение волнового сопротивления, что подтверждает опыт создания и эксплуатации таких судов.

Кроме этого тримараны имеют ряд дополнительных положительных качеств, основными из которых являются:

- увеличение площади палуб;
- снижение интенсивности волнообразования;
- технологичность;
- способность безопасно и комфортно перевозить пассажиров [6];
- повышение мореходных качеств судна [7];

Изложенное дает основание рассматривать этот тип скоростного судна как перспективный.

Однако при отмеченных выше преимуществах тримараны имеют ряд недостатков:

- *Определенная сложность конструкции корпуса.* Это приводит к повышенной трудоемкости их постройки.
- *Большая площадь смоченной поверхности.* При малых скоростях у судна доминирует сопротивление трения.
- *Увеличение массы корпуса судна.* Из-за большого относительного удлинения центрального корпуса возникают проблемы с его прочностью. Обеспечение прочности вызывает некоторое увеличение массы корпуса, что не так актуально для скоростных судов.

При проектировании скоростных пассажирских тримаранов, которые используются как на внешних (морских) так и на внутренних водных путях, возникает вопрос о выборе скоростного режима и оптимизации их элементов и характеристик. Обеспечивая минимально возможную ширину центрального корпуса можно достичь существенного снижения волнового сопротивления [8], [9], [10], [11], [12]. Следовательно, скоростной режим движения судна должен соответствовать скорости хода, при которой основной составляющей полного сопротивления является волновое сопротивление [13], существенное снижение которого обеспечивают тримараны. В настоящее время нет четкого ответа на вопрос, при какой длине, ширине, водоизмещении, рационально с точки зрения скоростного режима использовать ту или иную схему расположения аутригеров по длине и ширине судна с тем, чтобы достичь благоприятной интерференции системы волн основного корпуса и аутригеров. Какими оптимальными являются главные размерения аутригеров и центрального корпуса. Какая энерговооруженность необходима для тримарана.

Таким образом, только при условии полной ясности ответов на поставленные вопросы, разработка проектного обоснования судов-тримаранов, исключит ошибки при проектировании данного типа судна и поможет определить их нишу использования среди других типов скоростных судов, таких как СПК, СВП, скоростные катамараны [14], [15], [16], [17].

Список литературы:

- [1] Лапин В.И. Что мы знаем о тримаранах / В.И. Лапин // Катера и яхты. – 1967. – № 11. – С. 77–86.
- [2] Корытов, Н. Тримараны нового поколения / Н. Корытов // Катера и яхты. – 2005. – № 196. – С. 66–69.
- [3] Austal updates Auto Express 127 trimaran experience // Fast ferry international. – 2005. – Vol. 44, No 10 – p. 26–27.
- [4] Austal Trimaran Technology [Электронный ресурс]. – Австралия: Henderson, Западная Австралия. – Режим доступа: www.Austal.com, свободный. – Загл. с экрана.
- [5] Fast ferries take Canary Islands passenger traffic // Fast ferry international. – 2005. – Vol. 44, No10. – p. 21–26.
- [6] Рюмин С. Обводы быстроходных катеров / С. Рюмин // Катера и яхты. – 2008. – № 214. – С. 72–75.
- [7] Elcin, Z. Wave making resistance characteristics of trimaran hulls : Master of Science Thesis / Zafer Elcin; Monterey, California, Naval Postgraduate School. – December 2003. – p. 92.
- [8] Michell J.H. The Wave Resistance of a Ship / J.H. Michell // Philosophical Magazine. – 1898. – Vol. 45, Ser. 5. – p. 6–123.
- [9] Tuck E.O. Wave Resistance Formula of JH Michell's and its Significance in Ship Hydrodynamics / E.O. Tuck // J. Austral. Math. Soc. – 1989. – Ser. B 30. – p. 365–377.
- [10] Wigley, W.C.S. Ship Wave Resistance, a Comparison of Mathematical Theory with Experimental Results / W.C.S. Wigley // 67th Session of the Spring Meetings INA. – 1926. – p. 124–141.
- [11] Wigley W.C.S. Ship Wave Resistance / W.C.S. Wigley // Philosophical Magazine. – 1898. – Vol. 45, Ser.5. – p. 106–123.
- [12] Gotman, A. A History of Ship Resistance Evaluation: Navigating the Wake of Past Efforts / A. Gotman // The Journal of Ocean Technology. – 2007. – p. 74–96.
- [13] Войткунский, Я. И. Сопротивление движению судов. / Я.И. Войткунский. – Ленинград. : Издательство «Судостроение», 1988. – 288 с.
- [14] Ваганов А.М. Проектирование скоростных судов. / А.М. Ваганов. – Ленинград. : Издательство «Судостроение», 1978.
- [15] Зайцев Н.А. Отечественные суда на подводных крыльях. / Н.А. Зайцев, А.И. Маскалик. – Ленинград. : Издательство «Судостроение», 1967. – 364 с.
- [16] Блюмин В.И. Транспортные суда на подводных крыльях. / В.И. Блюмин, Л.А. Иванов, М. Б. Масеев. – Москва. : Издательство «Транспорт», 1964. – 256 с.
- [17] Алферьев М.Я. Транспортные катамараны внутреннего плавания / М.Я. Алферьев, Г.С. Мадорский. – Москва. : Издательство «Транспорт», 1976. – 336 с.

TRIMARANS: STATE AND PROSPECTS OF DEVELOPMENT

Ronnov Evgeniy P., Doctor of Technical Sciences, Professor

Volga State University of Water Transport

Korepanov Alexey E., postgraduate student

Volga State University of Water Transport,

5, Nesterov st, Nizhniy Novgorod, 603951

Key words: trimaran, outriggers, multihull vessels, high-speed passenger trimarans, elongation relative, favorable interference of the wave system.

Annotation. The paper reflects the history, the status of development and current trends in the design of trimaran vessels. It is shown how the terminology on vessels of this type was formed, the information about the main elements and characteristics of modern cruising, passenger and military vessels-trimarans. On the basis of the analysis of data on the constructed trimarans, general conclusions are made. Advantages and disadvantages of these vessels are noted, promising directions of research on their design are determined, namely, at what length, width, displacement it is rational from the point of view of the speed regime to use this or that scheme of the location of outriggers along the length and width of the vessel in order to achieve a favorable wave interference of the main body and outriggers.

References:

- [1] Lapin V.I. Chto my znaem o trimaranax / V.I. Lapin // Katera and Yahty. – 1967. – №11. – p. 77–86.
- [2] Koritov, N. Trimarany novogo pokaleniya / N. Koritov // Katera and Yahty. – 2005. – № 196. – p. 66-69.
- [3] Austal updates Auto Express 127 trimaran experience // Fast ferry international. – 2005. – Vol. 44, No 10 – p. 26-27.
- [4] Austal Trimaran Technology [Elektronnyi resurs]. – Australia: Henderson, Zapadnaya Australia. – Rezim dostupa: www.Austal.com, svobodnyi. – Zagl. s ekrana.
- [5] Fast ferries take Canary Islands passenger traffic // Fast ferry international. – 2005. – Vol. 44, No10. – p. 21-26.
- [6] Rumin, S. Obvody bistrohodnih katerov / S. Rumin // Katera and Yahty. – 2008. – № 214. – p. 72-75.
- [7] Elcin, Z. Wave making resistance characteristics of trimaran hulls : Master of Science Thesis / Zafer Elcin ; Monterey, California, Naval Postgraduate School. – December 2003. – p. 92.
- [8] Michell, J.H. The Wave Resistance of a Ship / J.H. Michell // Philosophical Magazine. – 1898. – Vol. 45, Ser. 5. – p. 6–123.
- [9] Tuck, E. O. Wave Resistance Formula of JH Michell's and its Significance in Ship Hydrodynamics / E. O. Tuck // J. Austral. Math. Soc. – 1989. – Ser. B 30. – p. 365-377.
- [10] Wigley, W.C.S. Ship Wave Resistance, a Comparison of Mathematical Theory with Experimental Results / W.C.S. Wigley // 67th Session of the Spring Meetings INA. – 1926. – p. 124-141.
- [11] Wigley, W.C.S. Ship Wave Resistance / W.C.S. Wigley // Philosophical Magazine. – 1898. – Vol. 45, Ser.5. – p. 106-123.
- [12] Gotman, A. A History of Ship Resistance Evaluation: Navigating the Wake of Past Efforts / A. Gotman // The Journal of Ocean Technology. – 2007. – p. 74-96.
- [13] Voitekunskiy, Y. I. Soprotivlenie dvizheniya sudov. / Y. I. Voitekunskiy. – Leningrad. : Izdatelstvo «Sudostroenie», 1988. – 288 p.
- [14] Vaganov, A. M. Proektirovanie skorostnih sudov. / A. M. Vaganov. – Leningrad. : Izdatelstvo «Sudostroenie», 1978.
- [15] Zaysev, N. A. Otechestvennie suda na podvodnykh krilyah. / N. A. Zaysev, A. I. Maskalik. – Leningrad. : Izdatelstvo «Sudostroenie», 1967. – 364 p.
- [16] Blymin, B. I. Transportnie suda na podvodnykh krilyah. / B. I. Blymin, JI. A. Ivanov, M. B. Maseev. – Moskva.: Izdatelstvo «Transport», 1964. – 256 p.
- [17] Alferev, M. Y. Transportnie katamarany vnutrennego plavaniy / M. Y. Alferev, G. S. Madorsky. – Moskva.: Izdatelstvo «Transport», 1976. – 336 p.

Статья поступила в редакцию 08.07.2019 г.

УДК 629.12

Роннов Евгений Павлович, доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой проектирования и технологии постройки судов
ФГБОУ ВО «ВГУВТ», e-mail: ptps@vgavt-nn.ru

Кочнев Юрий Александрович, кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры проектирования и технологии постройки судов
ФГБОУ ВО «ВГУВТ», e-mail: tmnnkoch@mail.ru
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
образования «Волжский государственный университет водного транспорта»
(ФГБОУ ВО «ВГУВТ»)
603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5

ОСОБЕННОСТИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ КАЧЕСТВ СУДОВОГО ЯКОРЯ

Ключевые слова: якорь повышенной держащей силы, действующие нагрузки, деформация лап якоря

При проектировании нового типа судового якоря необходимо учитывать требования Правил классификационных обществ к его конструкции, материалу, а также прочности различных элементов. Однако при реальной эксплуатации якоря возможны нагрузки, не учитываемые в настоящее время нормативными документами и обусловленные особенностями поведения якоря в грунте, при подъёме и входе в якорный клюз и нишу. В статье на примере балансирного якоря повышенной держащей силы приведены расчёты прочности лапы как при действии нагрузки, регламентируемой Правилами, так и предельной нагрузки, которая может возникнуть при эксплуатации якоря. Проанализированы различные способы контакта якоря с окружающей средой. Показано, что реальная опасная нагрузка для лапы меньше, чем пробная нагрузка при испытаниях и, как следствие, требуется её учет при проектировании.

Судовые якоря являются основными элементами якорного устройства, обеспечивающего в соответствующих ситуациях безопасность судна, поэтому при их проектировании и изготовлении Правила Регистра [1,2,3,4] предъявляют в прямом или косвенном виде требования по обеспечению необходимой держащей силы и к прочности элементов конструкции якоря.

Для якорей повышенной и высокой держащей силы Правила требуют эту силу подтверждать проведением совместных испытаний на различных типах грунта с обычным бесштоковым якорем (например, якорем Холла).

Веретено и лапы якоря, (последние зафиксированы в сечении на 1/3 длины от их кончика), должны выдерживать пробное усилие, за которое принимается величина, регламентируемая Правилами в зависимости от массы якоря. Выполнение этого требования предполагает, каким принимается наиболее опасное одновременное заглубление двух лап якоря в грунт, с точки зрения их прочности при обеспечении требуемой держащей силы.

Кроме того, при сдаточных испытаниях все детали якоря сбрасывают с определенной высоты на стальную плиту, уложенную на плотном основании, проверяя тем самым их с точки зрения динамической прочности. Также Правилами предъявляются жёсткие требования к материалу.

В подавляющем большинстве случаев выполнение этих требований обеспечивает целостность якорных элементов в зоне до пластических деформаций. При этом точка

приложения силы находится на одной трети длины лапы. Покажем это на следующем примере.

На рисунке 1 показаны геометрические характеристики якоря ПДСБ массой 1710 кг, соответствующие требованиям технического условия ТУ 6411-001-03149576-2013 [3].

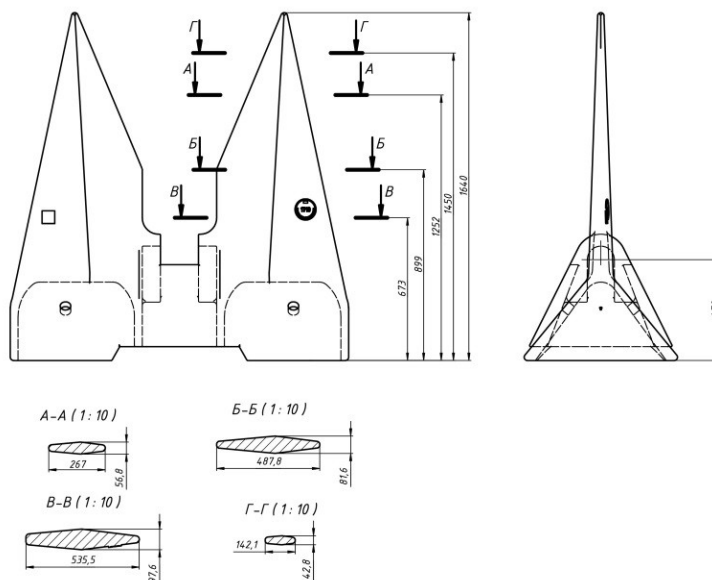


Рис. 1. Лапа якоря ПДСБ массой 1710 кг

Возникающие напряжения в элементах якоря находятся сложением по формуле [1]

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2},$$

где σ – нормальные напряжения в рассматриваемом сечении;

τ – касательные напряжения в рассматриваемом сечении.

Учитывая, что нормальные напряжения от общего изгиба максимальны на краях сечения, а касательные напряжения, наоборот, в данных точках отсутствуют и, что нормальные напряжения в лапе много больше касательных, расчёт коэффициента запаса у якоря ПДСБ 1710 кг будем выполнять только по нормальным напряжениям.

Схема сил, действующих на лапу в соответствии с [1–5, 7] представлена на рисунке 2.

Так как сила на лапу якоря действует под углом, то нормальные напряжения будут состоять из двух составляющих: σ_1 – нормальные напряжения от изгиба лапы и σ_2 – нормальные напряжения от силы её сжатия:

$$\sigma = \sigma_1 + \sigma_2$$

Нормальные напряжения от изгиба

$$\sigma_1 = \frac{M(x)}{I} z,$$

где $M(x)$ – изгибающий момент в сечении;

I – момент инерции сечения;

z – аппликата сечения лапы якоря (рисунк 3).

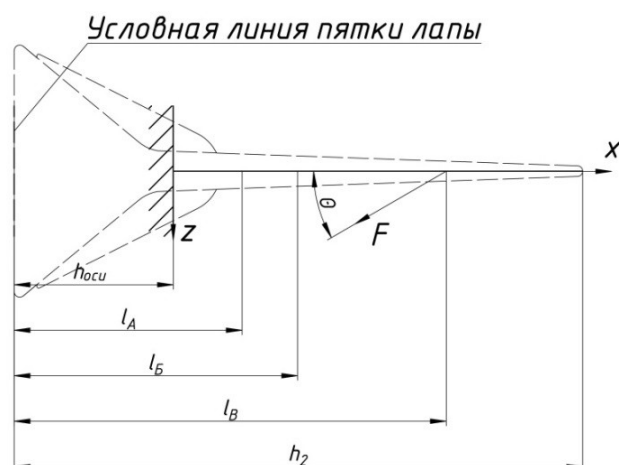


Рис. 2. Расчётная схема лапы якоря

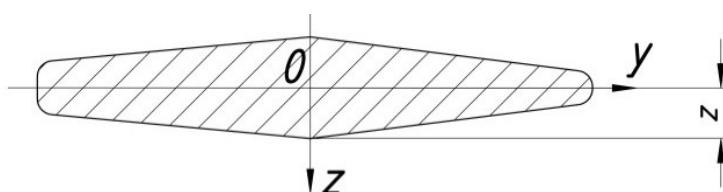


Рис. 3. Форма геометрического сечения лапы якоря

Изгибающий момент в сечении лапы равен

$$M(x) = \begin{cases} P_z \times (x_p - x) & \text{при } x < x_p \\ 0 & \text{при } x \geq x_p \end{cases},$$

где P_z – изгибающая составляющая пробной нагрузки, действующая на лапы;
 x_p – абсцисса точки действия пробной нагрузки;
 x – расчётная абсцисса сечения.

Нормальные напряжения от сжимающей нагрузки [8]

$$\sigma_2 = \frac{P_x}{S},$$

где P_x – сжимающая нагрузка;
 S – площадь поперечного сечения.

Максимальный угол отклонения лапы от вертикали составляет $\pm 35^\circ$ [5,6]. Таким образом, пробная нагрузка P , будет действовать на якорь так же под углом $\pm 35^\circ$, и соответственно, её составляющие можно найти

$$\begin{aligned} P_x &= 0,5 \times P \cos 35^\circ \\ P_z &= 0,5 \times P \sin 35^\circ, \end{aligned}$$

где P – пробная нагрузка, равная для якоря ПДСБ массой 1710 кг 389 кН.

Пробная нагрузка в соответствии с [1,2] прикладывается на расстоянии 1/3 от носика лапы до оси крепления лапы на веретене, то есть абсцисса её точки приложения может быть найдена по формуле

$$x_p = h_{\text{оси}} + \frac{2}{3} \times (h_2 - h_{\text{оси}}),$$

где $h_{\text{оси}}$ – положение оси крепления лапы к веретену, измеренное от пятки лапы;
 h_2 – высота лапы [5].

Расчёт напряжений выполнен в таблице 1, из неё следует, что при действии на якорь пробной нагрузки, соответствующей 389 кН и воспринимаемой двумя лапами, их прочность обеспечена.

Таблица 1

Расчёт прочности лапы якоря массой 1710 кг

Наименование	Размерность	Обозначение	Якорь ПДСБ 1710 кг		
			Сечение А	Сечение Б	Сечение В
Допускаемые напряжения	МПа	$[\sigma]$	240		
Высота лапы	м	h_2	1,64		
Абсцисса точки приложения силы	м	x_p	1,252		
Пробная нагрузка	кН	P	369		
Пробная нагрузка на одну лапу	кН	$0,5 P$	184,5		
Угол действия силы	град		35		
Сжимающая нагрузка	кН	P_x	154,7		
Изгибающая нагрузка	кН	P_y	100,5		
Абсцисса сечения лапы	м	x	1,252	0,899	0,673
Изгибающий момент в сечении	кН м	$M(x)$	0	35,5	58,2
Площадь, см	см ²	S	112,12	270,03	364,08
Момент инерции сечения лапы	см ² см ²	I	188,49	851,27	1699,86
Ширина сечения	см	b	5,67	8,16	9,76
Аппликата сечения	см	z	2,835	4,08	4,88
Нормальные напряжения от изгиба	МПа	σ_1	0	170,15	167,08
Нормальные напряжения от сжимающей силы	МПа	σ_2	13,8	5,73	4,25
Суммарные нормальные напряжения	МПа	σ	13,8	175,88	171,33
Коэффициент запаса прочности		k	17,39	1,36	1,4

Коэффициент запаса прочности лапы

$$k = \frac{[\sigma]}{\sigma_{eq}},$$

где $[\sigma] = 240$ МПа – допускаемые напряжения в лапе.

Однако в эксплуатационной практике есть отдельные случаи, когда возникает изгиб одной из лап якоря. Такая деформация возможна только в случае, когда держащая сила якоря создается при заглублении только одной лапы.

Рассмотрим маловероятный случай эксплуатационной нагрузки, когда зацепление якоря происходит минимально возможным контактом за кончик одной из лап. Для данного случая рассмотрим якорь ПДСБ массой 1710 кг и дополнительно ещё одно сечение Г (см рисунок 1). Расчётная схема для него приведена на рисунке 4. Результаты расчёта представлены в таблице 2.

Таблица 2

Расчёт прочности лапы якоря массой 1710 кг при действии силы на носик лапы

Наименование	Размерность	Обозначение	Якорь ПДСБ 1710 кг			
			Сечение А	Сечение Б	Сечение В	Сечение Г
Допускаемые напряжения	МПа	$[\sigma]$	240			
Высота лапы	м	h_2	1,64			
Абсцисса точки приложения силы	м	x_p	1,64			
Нагрузка на одну лапу	кН	P	70			
Угол действия силы	град		35			
Сжимающая нагрузка	кН	P_x	57,3			
Изгибающая нагрузка	кН	P_y	40,2			
Абсцисса сечения лапы	м	x	1,252	0,899	0,673	1,45
Изгибающий момент в сечении	кН м	$M(x)$	15,6	29,8	38,9	7,6
Площадь, см	см ²	S	112,12	270,03	364,08	48,59
Момент инерции сечения лапы	см ² см ²	I	188,49	851,27	1699,86	52,57
Ширина сечения	см	b	5,67	8,16	9,76	4,28
Апplikата сечения	см	z	2,835	4,08	4,88	2,14
Нормальные напряжения от изгиба	МПа	σ_1	234,63	142,83	111,68	309,38
Нормальные напряжения от сжимающей силы	МПа	σ_2	5,11	2,12	1,57	11,79
Суммарные нормальные напряжения	МПа	σ	239,74	144,95	113,25	321,17
Коэффициент запаса прочности		k	1	1,66	2,12	0,75

Из таблицы следует, что при действии на один из носиков лапы нагрузки в 70 кН, соответствующей тяге брашпиля судна, в сечении А возникают напряжения, равные пределу текучести материала. В то же время, в дополнительно рассмотренном сечении Г возникают напряжения выше предела текучести, из-за чего на существующих якорях могут деформироваться лапы. Однолапое зацепление якоря за грунт кончиком лапы, на наш взгляд, абсолютно маловероятно. Скорее всего, пластические деформации одной лапы могут являться результатом других, не имеющих отношения к якорной стоянке, нагрузок. Они могут возникать, например, из-за проектного контакта одной лапы якоря с якорным клюзом или навалом якоря на стенку.

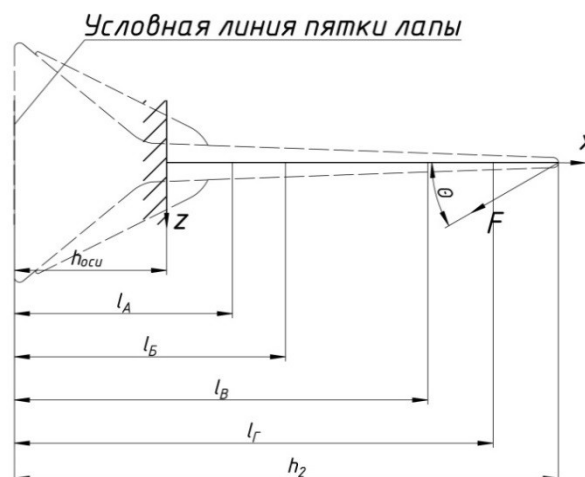


Рис. 4. Расчётная схема эксплуатационного случая лапы

Таким образом, можно сделать вывод, что при разработке новых типов якорей, вероятно, необходимо учитывать не только соответствующие требования Правил [1,2] к их прочности, но реальные нагрузки, возникающие в процессе эксплуатации судна. Считаем, что требования Правил отечественных классификационных обществ необходимо дополнить, испытаниями или подтверждающими расчётами прочности конструктивных элементов якоря при всех возможных и маловероятных эксплуатационных нагрузках.

Список литературы:

- [1] Российский Речной Регистр. Правила. М., 2018 – 1885 с. URL: <https://www.rivreg.ru/assets/Uploads/rules2015/rules062018.pdf>
- [2] Российский Морской Регистр. Правила. ЧIII. Устройства, оборудования и снабжения. URL: <https://lk.rs-class.org/regbook/getDocument2?type=rules&d=E24119C4-F399-477C-8A44-1C143EAA1C03&f=2-020101-114-3>
- [3] ТУ 6411-001-03149576-2013 Якоря повышенной держащей силы сбалансированные. Технические условия. Н.Новгород, 2013 – 18 с.
- [4] Requirements concerning Mooring, Anchoring and Towing. International Association of Classification Societies – 2014 – 21p.
- [5] ГОСТ 25496 Якорь повышенной держащей силы. Технические условия.
- [6] Патент на полезную модель 2018101516/, 16.01.2018 Якорь сбалансированный / Патент России на полезную модель 185142, 21.11.2018 бюл. №33 // Роннов Е.П., Тихомиров А.Д., Кочнев Ю.А.
- [7] Anchor loss – technical and operational challenges and recommendations 1 DNV GL, Gard and The Swedish Club, March 2016 – 49p.
- [8] Учебный справочник по прочности судов внутреннего плавания / Давыдов В.В., Маттес Н.В., Сиверцев И.Н. изд. 2-ое, перераб. и доп. М.: Речной транспорт, 1958 – 755 с.

FEATURES ENSURE THE PERFORMANCE OF THE SHIP'S ANCHOR

Ronnov Evgeny P., Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Chair
of Design and Technology of Ship Construction
Volga State University of Water Transport
5, Nesterov st, Nizhniy Novgorod, 603951
Kochnev Yuri A., Candidate of Engineering Science, Associate Professor

of the Department of Design and Technology of Ship Construction
Volga State University of Water Transport
5, Nesterov st, Nizhniy Novgorod, 603951

Keywords: anchor increased holding power, operating load, the deformation of the legs of the armature

When designing a new type of ship anchor, it is necessary to take into account the requirements of the Rules of classification societies for its design, material, as well as the strength of various elements. However, in the actual operation of the anchor, loads that are not currently taken into account by normative documents and due to the peculiarities of the behavior of the anchor in the ground, when lifting and entering the anchor cleave and niche are possible. In the article, on the example of the balance anchor of increased holding force, the calculations of the strength of the paw are given, both under the action of the load regulated by the Rules and the limit load that can arise during the operation of the anchor. analyzed the different ways of contact of the armature with the environment. It is shown that the real dangerous load for the paw is less than the trial load during the tests, and as a consequence, it is required to take it into account in the design.

References:

- [1] Rossiyskiy Rechnoy Registr. Pravila. M., 2018 – 1885 s. URL: <https://www.rivreg.ru/assets/Uploads/rules2015/rules062018.pdf>
- [2] Rossiyskiy Morskoy Registr. Pravila. ChIII. Ustroystva, oborudovaniya i snabzheniya. URL: <https://lk.rs-class.org/regbook/getDocument2?type=rules&d=E24119C4-F399-477C-8A44-1C143EAA1C03&f=2-020101-114-3>
- [3] TU 6411-001-03149576-2013 Yakorya povyshennoy derzhashchey sily sbalansirovannyye. Tekhnicheskie usloviya. N.Novgorod, 2013 – 18 s.
- [4] Requirements concerning Mooring, Anchoring and Towing. International Association of Classification Societies – 2014 – 21p.
- [5]. GOST 25496 Yakor' povyshennoy derzhashchey sily. Tekhnicheskie usloviya.
- [6] Patent na poleznuyu model' 2018101516/, 16.01.2018 Yakor' sbalansirovannyy / Patent Rossii na poleznuyu model' 185142, 21.11.2018 byul. №33 // Ronnov E.P., Tikhomirov A.D., Kochnev Yu.A.
- [7] Anchor loss – technical and operational challenges and recommendations 1 DNV GL, Gard and The Swedish Club, March 2016 – 49p.
- [8] Uchebnyy spravochnik po prochnosti sudov vnutrennego plavaniya / Davydov V.V., Mattes N.V., Sivertsev I.N. izd. 2-oe, pererab. i dop. M.: Rechnoy transport, 1958 – 755 s.

Статья поступила в редакцию 17.04.2019 г.

УДК 532.573.7: 53.05: 622.691.48

Смирнова Мария Валерьевна, к.т.н., доцент кафедры гидродинамики, теории корабля и экологической безопасности судов, ФГБОУ ВО «ВГУВТ», e-mail: igoninam@yandex.ru
Капустин Иван Александрович, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник отдела радиофизических методов в гидрофизике, ИПФ РАН, e-mail: kapustin-i@yandex.ru
Глухова Вероника Сергеевна, магистрант, ФГБОУ ВО «ВГУВТ»
Носова Анжелика Дмитриевна, магистрант, ФГБОУ ВО «ВГУВТ»
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Волжский государственный университет водного транспорта» (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»)
603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5
Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» (ИПФ РАН)
603951, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46

ИЗМЕРЕНИЕ СРЕДНИХ И ПУЛЬСАЦИОННЫХ СКОРОСТЕЙ ТЕЧЕНИЙ, ФОРМИРУЕМЫХ ВОСХОДЯЩИМ ПУЗЫРЬКОВЫМ ПОТОКОМ В ПРИПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ ВОДЫ В ПРИСУТСТВИИ ПЛЕНКИ ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНОГО ВЕЩЕСТВА

Ключевые слова: лабораторный эксперимент, визуализация течений, пленка ПАВ, пузырьковый поток, PIV, трассеры, поля средних скоростей, пульсации скорости, слик

Аннотация. Одной из актуальных проблем трубопроводного транспорта газа на сегодняшний день является обнаружение утечек газа на подводных участках газопроводов и снижение их негативного воздействия на окружающую среду. Настоящая работа посвящена развитию методов дистанционного обнаружения утечек газа из подводных газопроводов по изображениям сликов над ними. Отработана методика лабораторного моделирования и визуализации течений, формируемых в приповерхностном слое воды восходящим пузырьковым потоком. С помощью метода Particle Image Velocimetry (PIV) проведено исследование влияния пленок поверхностно-активных веществ (ПАВ) на средние и пульсационные скорости течений в приповерхностном слое воды. Получены поля средних скоростей и пульсаций скорости в лабораторной ювенте в отсутствие и в присутствии пленки ПАВ. Показано, что, присутствие пленки ПАВ оказывает существенное влияние на картину течений в приповерхностном слое воды.

Введение

На поверхности воды практически всегда присутствуют пленки поверхностно-активных веществ (ПАВ), будь то природные водоемы или технические системы. В водоемах пленка может формироваться в результате жизнедеятельности водных организмов, а также в результате разливов нефтепродуктов с судов или береговых объектов, либо в результате повреждения подводных нефтепроводов или естественных выходов нефти из подводных недр [1]. Независимо от природы пленки ее поведение под действием различных внешних сил, таких как ветер, волнение, течения, до сих пор недостаточно изучено (см., например, [2–6]).

В то же время, существует широкий круг проблем, касающихся процессов, проте-

кающих в приповерхностном слое воды, непосредственно контактирующем с пленкой ПАВ. Актуальным остается вопрос о влиянии ветра, волнения и течений на динамику и кинематику сликов на морской поверхности [5, 7–8], а также об условиях их формирования. Не менее важной задачей, с точки зрения экологической безопасности судов, является изучение влияния течений, формирующихся рядом с корпусами судов, на поведение пленки разлитой нефти [4]. В настоящее время также рассматривается возможность дистанционного обнаружения утечек из подводных газопроводов по изображениям сликов над ними [9, 10]. Это лишь малая часть задач, связанных с изучением приповерхностного слоя воды. Некоторые из них можно решить путем проведения лабораторных экспериментов, а для некоторых требуются натурные или полунатурные модельные исследования. В настоящей работе представлены результаты бесконтактных экспериментов, методика которых может быть применена и в натурных условиях.

1. Постановка задачи

Ранее были проведены эксперименты по изучению полей течений, формируемых пузырьковым потоком в толще воды [6, 11]. Было показано, что в результате пристеночного всплытия пузырьков в кювете формировался циркуляционный поток [6]. При этом течение было сильно неоднородно по вертикали с многократным увеличением средних скоростей у поверхности воды [11].

В присутствии пленки ПАВ на скорости в поверхностном слое воды влияют два процесса: циркуляционный поток от всплытия пузырьков и растекание скопившейся на поверхности пленки ПАВ. Поэтому поведение приповерхностного слоя может меняться в зависимости от преобладания первого или второго процесса. Физическому описанию механизма формирования пятна ПАВ на поверхности воды вокруг области всплытия пузырьков газа планируется посвятить отдельную работу. Однако, предварительная обработка экспериментальных данных [10], указывает на то, что вокруг области выхода из воды пузырьков, на некотором расстоянии от оси пузырькового потока формируется пленка ПАВ. В общем случае расстояние, на котором будет локализовываться пленка ПАВ, зависит от интенсивности пузырькового потока и от масштаба скоростей формируемого им циркуляционного потока воды, а точнее, связанных с ним течений в приповерхностном слое воды. Исследованию масштаба и поведения этих течений в присутствии накапливающейся пленки ПАВ и посвящена настоящая работа.

2. Методика исследований

Ниже представлены результаты двух экспериментов: целью первого было получение общего представления о скоростях и направлении приповерхностного слоя воды и возможного обнаружения области торможения потока накапливающейся пленкой ПАВ; цель второго – получение картины мелкомасштабных процессов в присутствии накапливающейся пленки ПАВ, в частности, с целью оценки их масштабов и скоростей для дальнейшего использования полученных значений в моделях формирования пятна ПАВ над областью выхода газа из подводных источников (газопроводов).

Первый эксперимент был выполнен в лабораторной кювете вместимостью 200 л. В кювету было добавлено анионноактивное ПАВ – додецилсульфат натрия в таком количестве, что концентрация его в воде составила 0,5 мг/л. В качестве трассеров – частиц, движущихся вместе с приповерхностным слоем воды и маркирующих его – были использованы гранулы полистирола разных цветов размером около 3 мм. У одной из коротких стенок кюветы был сформирован плоский пузырьковый поток с расходом газа 0,0228 л/с. Положение трассеров записывалось с помощью серийной фотосъемки с частотой 4 кадра в секунду. Обработка изображений была выполнена вручную: с

помощью стандартного редактора изображений были получены координаты положения трассеров в парах следующих друг за другом изображений (рис. 1, а, б).

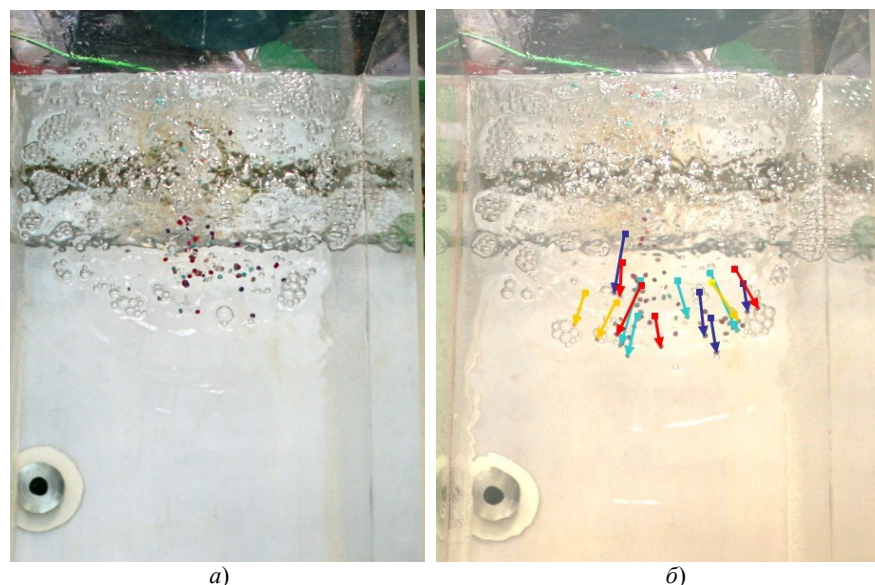


Рис. 1. Пара изображений положения трассеров с разницей во времени 250 мс. Цветными стрелками помечено смещение частиц за время, прошедшее между кадрами

На рис. 1 (а, б) приведена пара изображений, полученных в первые секунды эксперимента. Стрелками (рис. 1, б) показаны смещения некоторых частиц за интервал времени между кадрами 250 мс. Всего за время проведения эксперимента было получено 30 пар изображений и 1200 значений скоростей, после статистической обработки которых было получено поле средних скоростей в приповерхностном слое воды.

Несмотря на всю прозрачность процесса обработки изображений и получения картины средних течений, данный способ имеет один существенный недостаток: высокая трудоемкость, поскольку подразумевает фиксацию координат каждой частицы вручную. Кроме того, на картине средних течений существуют области, в которых не оказалось ни одной частицы. Вектора скоростей в них были получены линейной интерполяцией. Данный метод не позволяет также получить картину мгновенных скоростей по всей поверхности воды в кювете, поскольку в случае заполнения всей поверхности воды трассерами их невозможно индивидуализировать и определить их смещение. Этих недостатков лишен метод цифровой PIV-обработки изображений, использованный во втором эксперименте.

Целью второго эксперимента было получение поля мгновенных скоростей в приповерхностном слое воды, формируемого восходящим пузырьковым потоком в присутствии накапливающейся пленки ПАВ. Эксперимент выполнялся в лабораторной кювете меньшей вместимости (20 л), что позволило ускорить процесс накопления пленки ПАВ на поверхности воды в ходе эксперимента. Вдоль короткой стенки кюветы был сформирован пузырьковый поток от точечного источника с расходом газа 0,00017 л/с. В качестве трассеров использовались частицы талька. Съемка производилась с интервалом в 2 секунды. Перед началом эксперимента поверхность очищалась от пленки ПАВ промокательной бумагой.

На рис. 2 показана область поверхности воды, выделенная для дальнейшей обработки. В качестве готового алгоритма цифровой PIV-обработки изображений было выбрано свободно распространяемое приложение Matlab PIVlab [12]. Обработка

включала такие стадии как выбор пар изображений, создание маски и фильтрация «шумов», собственно анализ и построение поля мгновенных скоростей с заданием масштаба и отсевом ошибочных векторов.

В качестве алгоритма корреляции был выбран алгоритм «деформации окна FFT» (прямая корреляция преобразования Фурье с несколькими проходами и деформирующими окнами), описанный, например, в [13]. При этом способе при расчете корреляционной функции рассматриваются элементарные области, смещенные на вектор, посчитанный на предыдущей итерации. Количество итераций было выбрано равным 3. При таком способе обработки приложение PIVlab хорошо «видит» контрастные пятна размером не менее 5 пикселей. Поэтому свойство частиц талька слипаться в данном случае дало положительный эффект при обработке полученных изображений.



Рис. 2. Выбор области анализа на изображениях во втором эксперименте

В результате обработки двенадцати пар изображений были получены поля пульсаций скорости в лабораторной кювете в отсутствие и в присутствии накопленной пленки ПАВ.

3. Обсуждение результатов

На рис. 3 приведены результаты обработки данных первого эксперимента, получено поле средних скоростей в приповерхностном слое воды. Медианная скорость движения трассеров вдоль кюветы составила 5,51 см/с, а средняя – 6,22 см/с. Максимальные значения скоростей достигали 40 см/с и более и наблюдались вблизи зоны выхода пузырьков. Минимальные скорости составляли менее 0,2 см/с и наблюдались в отдельных зонах на расстоянии от 30 до 80 см от зоны выхода пузырьков. Предположительно, это могут быть центры относительно стабильных вихрей – «водоворотов». Один из таких вихрей, наиболее долгоживущий, замечен на расстоянии 60 – 70 см от зоны выхода пузырьков. Скорости в районе этого вихря варьируют от минимальных, порядка 0,2 см/с до максимальных, порядка 30 см/с.

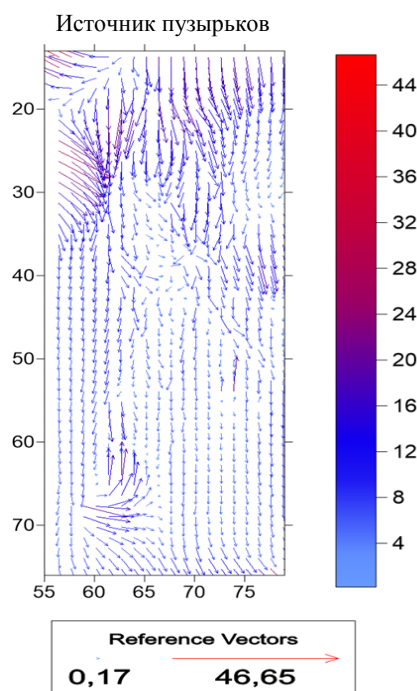


Рис. 3. Поле средних скоростей в приповерхностном слое воды в присутствии накапливающейся пленки ПАВ

На рис. 4 показаны усредненные по ширине кюветы средние скорости. С удалением от зоны выхода пузырьков скорость приповерхностного слоя воды быстро снижается, выходя на расстоянии 30-40 см на асимптоту. Анализ проб пленок, взятых на расстоянии 50 – 60 см от зоны выхода пузырьков, показал, что к моменту, когда трассеры достигли этой области, пленка уже присутствовала на поверхности воды и оказывала влияние на скорости течений в приповерхностном слое воды. О методах и результатах отбора проб пленок было описано в [10, 14]. Однако, выраженной границы, на которой пленка начинает тормозить приповерхностный поток при данном расходе газа на рассмотренном расстоянии от зоны выхода пузырьков не наблюдалось.

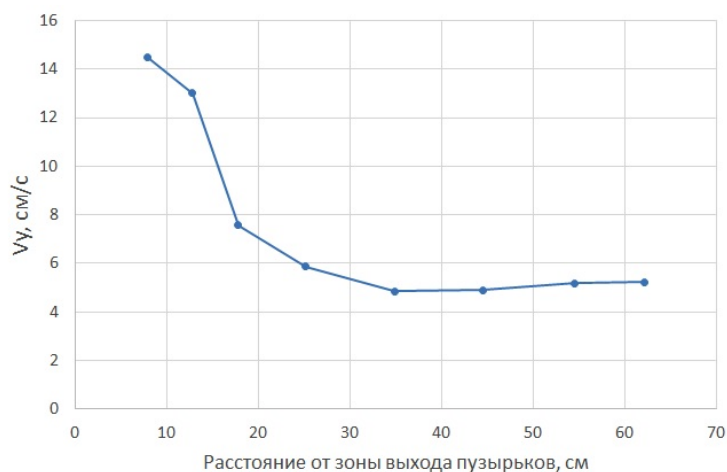


Рис. 4. Усредненные по ширине кюветы скорости вдоль потока в приповерхностном слое воды

Во втором эксперименте были получены поля мгновенных скоростей в приповерхностном слое воды в отсутствие (рис. 5, а) и в присутствии (рис. 5, б) накапливающейся пленки ПАВ.

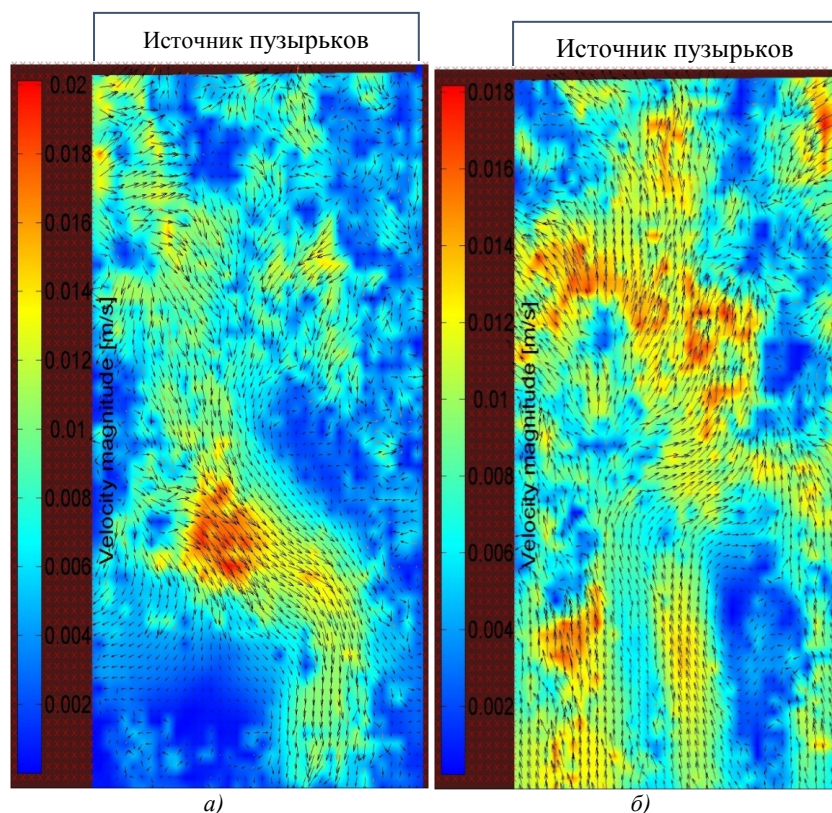


Рис. 5. Поля мгновенных скоростей в лабораторной кювете (20 л):
а) в начальный момент включения пузырькового потока, поверхность
воды предварительно очищена от пленки; б) через 16 секунд
после включения пузырькового потока

В первые секунды включения пузырькового потока поле скоростей сильно неравномерно и варьирует от 0 до 2 см/с в разных направлениях. Однако большинство векторов направлено в сторону от области выхода пузырьков (рис. 5, а). Но уже через 16 секунд накапливающаяся пленка начинает поджимать поверхностный поток. Вектора скорости в центральной части кюветы направлены навстречу пузырьковому потоку (рис. 5, б). Максимальные скорости снижаются до 1,8 см/с, а неравномерность поля скоростей увеличивается. При этом ежесекундно формируются и исчезают новые вихри, масштаб которых варьирует от менее 1 до 5 см. Наибольшая плотность образования вихрей и одновременно меньшие их размеры наблюдаются вблизи области выхода пузырьков, в то время как с удалением от нее вихри становятся крупнее и стабильнее. При накоплении пленки ПАВ на поверхности воды количество вихрей уменьшается, а их размеры увеличиваются (рис. 5, б). Эксперимент при небольших расходах газа показал, что процесс растекания накапливающейся пленки ПАВ может оказывать существенное влияние на поле скоростей в приповерхностном слое воды.

Заключение

Отработана методика лабораторного моделирования и визуализации течений,

формируемых в приповерхностном слое воды восходящим пузырьковым потоком. Экспериментально получены средние и пульсационные скорости течений в приповерхностном слое воды в присутствии накапливающейся пленки ПАВ.

Получено общее представление о скоростях и направлении приповерхностного слоя воды. В первом эксперименте при больших значениях расхода газа выраженной границы, на которой пленка начинает тормозить приповерхностный поток, на рассмотренном расстоянии от зоны выхода пузырьков не наблюдалось. Однако, во втором эксперименте с малым расходом газа зафиксировано влияние пленки на поле мгновенных скоростей в приповерхностном слое воды.

Получены оценки масштабов вихревых процессов по мгновенным полям скорости в приповерхностном слое воды. Наибольшая плотность и частота образования вихрей и одновременно меньшие их размеры (порядка 1 см) наблюдаются вблизи области выхода пузырьков, в то время как с удалением от нее вихри становятся крупнее и стабильнее. При этом, появление пленки ПАВ на поверхности воды приводит к снижению количества вихрей и к их укрупнению.

Эксперименты наглядно показали, что процесс растекания накапливающейся пленки ПАВ в зоне пузырькового потока при небольших расходах газа может оказывать существенное влияние на поле скоростей в приповерхностном слое воды.

Полученные оценки могут использоваться в физических и численных моделях, описывающих формирование пятна ПАВ над областью выхода газа из подводных источников (газопроводов).

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант №18-38-00861 мол_a).

Список литературы:

- [1] Бондур В.Г., Кузнецова Т.В. Исследования естественных нефте- и газопоявлений на морской поверхности по космическим изображениям // В книге: Аэрокосмический мониторинг объектов нефтегазового комплекса / Под редакцией академика В.Г. Бондура. – Москва, 2012. – С. 272–287.
- [2] Neda Sanatkaran, Valery Kulichikhin, Alexander Ya. Malkin, Reza Foudazi Spreading of Oil-in-Water Emulsions on Water Surface. – August 2018. – Langmuir 34(37). – DOI: 10.1021/acs.langmuir.8b01435,
- [3] Jae-Han Kim, Kyung-Lim Jang, Kwangho Ahn, Taeshik Yoon, Tae-Ik Lee, Taek-Soo Kim (2019). Thermal expansion behavior of thin films expanding freely on water surface. Scientific Reports. 9. 10.1038/s41598-019-43592-x.
- [4] Чебан Е.Ю., Капустин И.А., Мольков А.А., Игонина М.В. Экспериментальное исследование растекания нефтепродуктов в кильватерных следах судов в счале // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. – 2016. – Т. 9. – № 3. – С. 57–65.
- [5] Даниличева О.А. и др. Исследование динамики разливов поверхностно-активных веществ в условиях ветрового волнения / Ермаков С.А., Капустин И.А., Мольков А.А., Дмитриева М.С., Лещев Г.В. // В книге: Сборник тезисов докладов шестнадцатой Всероссийской открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». – Институт космических исследований Российской академии наук. – 2018. – С. 259.
- [6] Смирнова М.В., Капустин И.А. Развитие нового подхода к исследованию процесса выноса поверхностно-активных веществ всплывающими в жидкости пузырьками газа // Ученые записки физического факультета Московского университета. – № 6, 1860302 (2018), с. 1860302–1 – 1860302–6.
- [7] 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.
- [8] Ермошкин А.В., Богатов Н.А., Капустин И.А., Лещев Г.В., Мольков А.А., Поплавский Е.И., Русаков Н.С. Исследование процессов растекания пленочных загрязнений на поверхности внутренних водоемов // В книге: Сборник тезисов докладов шестнадцатой Всероссийской открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». – Институт космических исследований Российской академии наук. – 2018. – С. 263.

- [9] V. Stearns, Steven & Lines, Raymond. (2019). Active Remote Detection of Natural Gas Pipeline Leaks. – <https://www.researchgate.net/publication/253937025>
- [10] Смирнова М. В., Капустин И.А., Лазарева Т.Н. Экспериментальное исследование процесса выноса поверхностно-активных веществ всплывающими в жидкости пузырьками газа в приложении к проблеме обнаружения утечек из подводных газопроводов // В книге: Сборник тезисов докладов шестнадцатой Всероссийской открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». – Институт космических исследований Российской академии наук. – 2018. – С. 320.
- [11] Ермаков С.А., Капустин И.А., Лазарева Т.Н., Калимулин Р.Р. Экспериментальное исследование трансформации гравитационно-капиллярных волн на течении, индуцированном пузырьковой пленкой // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2013. Т. 10. № 4. С. 298–307.
- [12] Thielicke, W. and Stamhuis, E.J. (2014): PIVlab – Towards User-friendly, Affordable and Accurate Digital Particle Image Velocimetry in MATLAB. Journal of Open Research Software 2(1):e30, DOI: <http://dx.doi.org/10.5334/jors.bl>
- [13] Thielicke, W. and Stamhuis, E. J. (2014): PIVlab – Time-Resolved Digital Particle Image Velocimetry Tool for MATLAB. <http://dx.doi.org/10.6084/m9.figshare.1092508>
- [14] Ермаков С.А. Влияние пленок на динамику гравитационно-капиллярных волн. ИПФ РАН. – Н. Новгород. 2010. – 163 с.

EXPERIMENTAL STUDY OF MEAN AND PULSATION VELOCITIES OF FLOWS FORMED BY POP-UP BUBBLE FLOW IN A NEAR-SURFACE WATER LAYER IN THE PRESENCE OF A SURFACTANT FILM

Smirnova Maria V., *Candidate of Engineering Science, Associate Professor,
Department of Hydrodynamics, the Theory of the Ship and Environmental Safety of Vessels,
Volga State University of Water Transport*

Kapustin Ivan A., *Candidate of Engineering Science, Senior Researcher
of the Department of Radiophysical Methods in Hydrophysics,
Federal Research Center Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences
46, Ulyanov st, Nizhny Novgorod, 603951*

Glukhova Veronika S., *graduate student,
Volga State University of Water Transport*

Nosova Angelica D., *graduate student,
Volga State University of Water Transport
5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603951*

Keywords: laboratory experiment, visualization of the flow, surfactant film, bubble flow, PIV, tracer, mean velocity, pulsation velocity, slick

Annotation. One of the topical problems of gas pipeline transport today is the detection of gas leaks in underwater sections of gas pipelines and reducing their negative impact on the environment. This paper is devoted to the development of methods for remote detection of gas leaks from underwater gas pipelines by specific slick signatures. The technique of laboratory modeling and visualization of the flows formed in the surface layer of water by pop-up bubble flow has been worked out. Using the Particle Image Velocity (PIV) method, the influence of surfactant films on the mean and pulsation flow velocities in the near-surface water layer were studied. The mean velocity field and pulsation velocity field in the laboratory cuvette in the absence and in the presence of surfactant film were obtained. It is shown that the presence of surfactant film has a significant effect on the flow pattern in the near-surface water layer.

References:

- [1] Bondur V.G., Kuznetsova T.V. Issledovaniya yestestvennykh nefte- i gazoproyavleniy na morskoy

- poverkhnosti po kosmicheskim izobrazheniyam / V knige: Aerokosmicheskiy monitoring obyektov neftegazovogo kompleksa / Pod redaktsiyey akademika V.G. Bondura. – M., 2012. – p. 272–287.
- [2] Neda Sanatkaran, Valery Kulichikhin, Alexander Ya. Malkin, Reza Foudazi Spreading of Oil-in-Water Emulsions on Water Surface. – August 2018. – Langmuir 34(37). – DOI: 10.1021/acs.langmuir.8b01435,
- [3] Jae-Han Kim, Kyung-Lim Jang, Kwangho Ahn, Taeshik Yoon, Tae-Ik Lee, Taek-Soo Kim (2019). Thermal expansion behavior of thin films expanding freely on water surface. Scientific Reports. 9. 10.1038/s41598-019-43592-x.
- [4] Cheban Ye.Yu., Kapustin I.A., Molkov A.A., Igonina M.V. Eksperimentalnoye issledovaniye rastekaniya nefteproduktov v kilvaternykh sledakh sudov v schale / Fundamentalnaya i prikladnaya gidrofizika. – 2016. – V. 9. – № 3. – p. 57–65.
- [5] Danilicheva O.A., Yermakov S.A., Kapustin I.A., Molkov A.A., Dmitriyeva M.S., Leshchev G.V. Issledovaniye dinamiki razlivov poverkhnostno-aktivnykh veshchestv v usloviyakh vetrovogo volneniya / Sbornik tezisov dokladov shestnadsatoy Vserossiyskoy otkrytoy konferentsii «Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa». – 2018. – p. 259.
- [6] Smirnova M.V., Kapustin I.A. Razvitiye novogo podkhoda k issledovaniyu protsessa vynosa poverkhnostno-aktivnykh veshchestv vsplyvayushchimi v zhidkosti puzyrkami gaza / Uchenyye zapiski fizicheskogo fakulteta Moskovskogo universiteta. – № 6, 1860302 (2018), p. 1860302–1 – 1860302–6.
- [7] Kapustin I.A., Yermoshkin A.V., Bogatov N.A., Molkov A.A. Ob otsenke vklada privodnogo vetra v kinematiku slikov na morskoy poverkhnosti v usloviyakh ogranichennykh razgonov volneniya / Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2019. V. 16. № 2. p. 163–172.
- [8] Yermoshkin A.V., Bogatov N.A., Kapustin I.A., Leshchev G.V., Molkov A.A., Poplavskiy Ye.I., Rusakov N.S. Issledovaniye protsessov rastekaniya plenochnykh zagryazneniy na poverkhnosti vnutrennykh vodoyemov / Sbornik tezisov dokladov shestnadsatoy Vserossiyskoy otkrytoy konferentsii «Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa». – 2018. – p. 263.
- [9] Steven V. Stearns, Raymond Lines (2019). Active Remote Detection of Natural Gas Pipeline Leaks. – <https://www.researchgate.net/publication/253937025>
- [10] Smirnova M. V., Kapustin I.A., Lazareva T.N. Eksperimentalnoye issledovaniye protsessa vynosa poverkhnostno-aktivnykh veshchestv vsplyvayushchimi v zhidkosti puzyrkami gaza v prilozhenii k probleme obnaruzheniya utechek iz podvodnykh gazoprovodov / Sbornik tezisov dokladov shestnadsatoy Vserossiyskoy otkrytoy konferentsii «Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa». – 2018. – p. 320.
- [11] Yermakov S.A., Kapustin I.A., Lazareva T.N., Kalimulin R.R. Eksperimentalnoye issledovaniye transformatsii gravitatsionno-kapillyarnykh voln na techenii, indutsirovannom puzyrkovoy pelenoy / Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. – 2013. V. 10. № 4. p. 298–307.
- [12] Thielicke, W. and Stamhuis, E.J. (2014): PIVlab – Towards User-friendly, Affordable and Accurate Digital Particle Image Velocimetry in MATLAB. Journal of Open Research Software 2(1):e30, DOI: <http://dx.doi.org/10.5334/jors.bl>
- [13] Thielicke, W. and Stamhuis, E. J. (2014): PIVlab – Time-Resolved Digital Particle Image Velocimetry Tool for MATLAB. <http://dx.doi.org/10.6084/m9.figshare.1092508>
- [14] Yermakov S.A. Vliyaniye plenok na dinamiku gravitatsionno-kapillyarnykh voln. IPF RAN. – N. Novgorod. 2010. – 163 p.

Статья поступила в редакцию 20.08.2019 г.

УДК 629.576

Февральских Андрей Владимирович, к.т.н, ведущий инженер по гидрогазодинамике

ЗАО «КАДФЕМ Си-Ай-Эс», e-mail: a.fevralskih@gmail.com

111672, Москва, ул. Суздальская, 46

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АЭРОДИНАМИКИ БОРТОВОГО ОГРАЖДЕНИЯ ВОЗДУШНОЙ ПОДУШКИ В СОСТАВЕ КОМПОНОВКИ ЭКРАНОПЛАНА

Ключевые слова: экраноплан, воздушная подушка, концептуальное проектирование, численное моделирование аэродинамики, ANSYS CFD

Аннотация. Одно из преимуществ экранопланов (ЭП), по сравнению с судами на воздушной подушке (СВП), заключается в возможности достижения более высоких показателей транспортной эффективности за счет меньшего относительного сопротивления на режиме крейсерского хода. При прочих равных условиях, ЭП с шасси на воздушной подушке (ВП) нуждаются в меньшей энерговооруженности на старте, чем экранопланы с поддувом. Однако конструктивные элементы стартовой системы ЭП способны оказывать влияние на структуру обтекания крыла на крейсерском режиме движения, уменьшая тем самым аэродинамическую подъемную силу, действующую на судно. Результаты расчетов показывают, что известные коммерческие ЭП с шасси на ВП не превосходят СВП с гибким ограждением баллонетного типа по показателю транспортной эффективности. Одна из причин низкой проработанности концептуальных проектов исследованных ЭП с шасси на ВП может заключаться в отсутствии данных по аэродинамическому влиянию ограждения ВП на обтекание крыла под действием экранного эффекта. С использованием методов численного моделирования в настоящей работе исследуется аэродинамика компоновок ЭП с бортовым ограждением воздушной подушки: как в форме баллонетов, так и в виде плоских шайб. По результатам серии вычислительных экспериментов определены коэффициенты аэродинамических сил и аэродинамическое качество компоновочных вариантов ЭП при различных углах тангажа и высотах движения над экраном. В ходе анализа результатов численного моделирования установлено, что бортовое ограждение, имеющее форму баллонета, способствует развитию аэродинамического течения вблизи поверхности крыла ЭП в направлении размаха, приводя к снижению подъемной силы и аэродинамического качества судна. При некоторых значениях угла тангажа компоновочного варианта ЭП с баллонетами наблюдается обратный экраный эффект: снижение подъемной силы по мере уменьшения высоты движения ЭП. В качестве возможного проектного решения, частично компенсирующего влияние баллонетов на аэродинамические характеристики ЭП, исследуется применение реданов.

Введение

Экранопланы (ЭП) и суда на воздушной подушке (СВП) рассматриваются в качестве перспективных транспортных средств для освоения территорий Сибири, Дальнего Востока и Арктики [1–3]. По сравнению с другими судами с динамическим поддержанием, экранопланы имеют преимущества по относительной полезной нагрузке, пассажировместимости, скорости и дальности хода, что неоднократно демонстрировалось на примерах экранопланов Р.Е. Алексеева и его последователей [4, 5]. Преимущества СВП связаны со свойствами амфибийности. Причем, как показывает анализ рынка [6], наиболее рационально это преимущество, в сочетании с управляемостью, реализовано в компоновках СВП с гибким ограждением баллонетного типа. Баллонетные СВП используются в России на регулярных пассажирских перевозках в Самарской и Нижегородской областях, Благовещенске, Якутии и других регионах [6].

Преимущество экранопланов и СВП заключается также и в возможности всесезонной эксплуатации, в том числе, в условиях ледостава. При этом ЭП с классической схемой поддува нуждаются в высокой энерговооруженности на старте, а суда на воздушной подушке уступают ЭП в скорости и дальности хода. Анализ преимуществ и ограничений СВП и экранопланов привел к идее использования воздушной подушки в качестве стартового устройства малых пассажирских экранопланов. В прошедшие десятилетия в ряде стран (США, Южная Корея, Россия) предпринимались попытки создания и введения в эксплуатацию ЭП с шасси на воздушной подушке, однако, ни одно из этих судов в настоящий момент не применяется на регулярных пассажирских перевозках.

В последние годы технологии численного моделирования аэродинамики все чаще используются в качестве основных инструментов исследования при проектировании экранопланов. Результаты численного моделирования аэродинамики ЭП хорошо согласуются с результатами экспериментов в аэродинамических трубах [6, 7]. Численное моделирование позволяет получать новые данные об особенностях аэродинамики крыла под действием экранного эффекта [8], в том числе – в условиях волнения [9]. С использованием численных методов развивается представление об устойчивости движения экраноплана [10–12]. Численное моделирование используется для исследования различных способов механизации крыла под действием экранного эффекта [13, 14].

Для определения оптимальной формы ограждения воздушной подушки, с учетом распределения давления и влияния сил сопротивления, ранее [15] использовался «генетический» алгоритм, основанный на анализе случайных решений. С использованием метода численного моделирования VOF (Volume of Fluid) в работе [16] получено распределение давления и уровня свободной поверхности воды в воздушной подушке при разных значениях числа Фруда, определено относительное сопротивление. В работе [17] метод конечных элементов использовался для определения формы ограждения под действием аэродинамических нагрузок. Методика связанного моделирования взаимодействия водно-воздушной среды с ограждением воздушной подушки на основе балочной модели ограждения предложена в работе [18].

В настоящей работе приводятся результаты анализа технико-экономических характеристик экранопланов со стартовым устройством в виде статической воздушной подушки. С использованием методов численного моделирования, исследуется влияние формы бортового ограждения воздушной подушки ЭП на структуру обтекания крыла и интегральные аэродинамические характеристики компоновки: коэффициенты подъемной силы, силы сопротивления и аэродинамическое качество. Выполнена серия вычислительных экспериментов с вариантами компоновок бортового ограждения воздушной подушки ЭП: в форме пневмобаллонов и в форме плоских шайб, при разных углах тангажа и высотах движения над экраном. Показано, что форма бортового ограждения воздушной подушки ЭП влияет на характеристики действия экранного эффекта, в том числе, и на изменение аэродинамического качества компоновки вблизи экрана. В качестве возможного способа снижения влияния формы баллонного ограждения на аэродинамическое качество компоновки ЭП предложено применение реданов.

1. Техничко-экономический анализ ЭП с шасси на воздушной подушке

Известно, по меньшей мере, два примера коммерческого производства экранопланов с шасси на воздушной подушке. Суда серии Howerwing Ground Effect Hovercraft (США) относятся к спортивно-прогулочному типу (рис. 1).



Рис. 1. Спортивно-прогулочное судно
серии Howerwing Ground Effect Hovercraft

Нагнетающий вентилятор воздушной подушки экраноплана Howerwing Ground Effect Hovercraft расположен в носовой части корпуса, ограждение воздушной подушки, компонуется под рубкой. По всему периметру воздушную подушку ограничивает замкнутая пневмооболочка, которая не трансформируется при переходе от старта к режиму полета, и тем самым, оказывает влияние на аэродинамическое течение вблизи поверхности несущего крыла. Основные характеристики экраноплана UH-18SPW Howerwing приведены в таблице 1.

Таблица 1

Основные характеристики экраноплана UH-18SPW Howerwing

Пассажировместимость, чел.	2-3
Максимальная скорость, км/ч	120
Высота ограждения ВП, м	0,2
Длина судна, м	7,26
Ширина судна, м	6,15
Масса без груза, кг	455
Потребная мощность, л.с.	120

Пассажирский экраноплан WSH 500 (Южная Корея) обладает трансформируемым носовым и кормовым ограждением воздушной подушки, организованной под днищем рубки (рис. 2). При этом функцию бортового ограждения воздушной подушки выполняют жесткие гондолообразные элементы корпуса.

Известно, что опытный образец этого судна проходил стадии мореходных испытаний и опытной эксплуатации, однако о дальнейшем развитии проекта (после 2013 года) информация в открытом доступе отсутствует. Основные характеристики судна WSH 500 приведены в таблице 2.



Рис. 2. Пассажирский экраноплан WSH 500

Таблица 2

Основные характеристики экраноплана WSH-500

Пассажировместимость, чл.	50
Крейсерская скорость, км/ч	180
Максимальная взлетная масса, кг	18000
Максимальная высота движения, м	5
Расход топлива, кг/ч	460
Максимальная дальность, км	1000
Высота ограждения ВП, м	0,2
Длина судна, м	29
Ширина судна, м	27
Высота судна, м	7

В таблице 3 представлено сравнение характеристик ЭП с шасси на воздушной подушке и баллонетного СВП пр. А20П (Россия, ООО СК «Аэроход») по показателю транспортной эффективности. Значение показателя транспортной эффективности K_z , определяется с использованием соотношений (1) – (3).

$$K_z = \frac{T_z}{q_t} \quad (1)$$

$$T_z = \frac{n \cdot L}{G_0} \quad (2)$$

Здесь n – количество пассажиров, G_0 – взлетная масса (водоизмещение при максимальной загрузке), L – максимальная дальность хода.

$$q_t = \frac{m_t}{n \cdot L} \quad (3)$$

q_t – расход топлива на пассажирокилометр;

m_t – масса топлива.

Таблица 3

**Результаты оценки транспортной эффективности судов
с аэродинамическим поддержанием**

Судно	Пассажиро- вместимость, ч/л	Максимальная дальность, L, км	Расход топлива, кг/пасс*км	Транспортная эффективность
Экраноплан «UH-18SPW» Hoverwing	3	275	0,034	33
Экраноплан «WSH-500»	50	1 000	0,029	40
СВП пр. А20П	30	400	0,034	45

Данные таблицы 3 показывают, что, несмотря на ряд преимуществ ЭП с шасси на воздушной подушке, таких, как высокая скорость крейсерского хода, относительно низкая тяговооруженность на старте, по показателю транспортной эффективности проекты UH-18SPW и WSH-500 уступают СВП пр. А20П. В качестве одной из возможных причин низкого показателя транспортной эффективности ЭП с шасси на воздушной подушке в настоящем исследовании рассматривается влияние ограждения воздушной подушки на аэродинамику крыла в составе компоновки экраноплана.

2. Численное исследование компоновочных вариантов ЭП

Выполнена серия вычислительных экспериментов по исследованию обтекания воздушной средой на разных углах атаки α и высотах движения над экраном $\bar{h}$ (в долях средней аэродинамической хорды) компоновочных вариантов экранопланов, отличающихся бортовым ограждением воздушной подушки (рисунок 3).

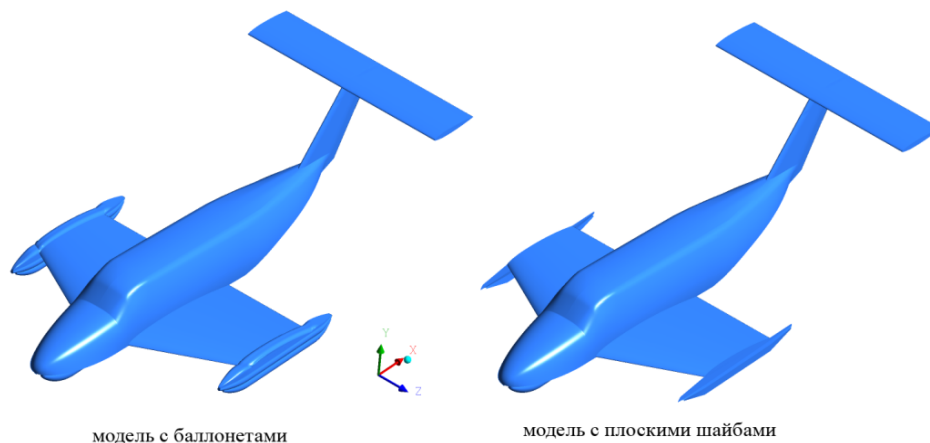


Рис. 3. Компоновочные варианты экранопланов для численного моделирования

Использовалась методика численного моделирования экранной аэродинамики, с применением программного обеспечения ANSYS CFX, общее описание которой и результаты верификации представлены в работах [6, 7]. Рассматриваются два варианта аэродинамической компоновки ЭП: в первом варианте бортовое ограждение имеет форму пневмобаллонов; во втором варианте – форму плоских килей (шайб). Эффекты аэрогидроупругости баллонов не учитываются. Продольные габариты и площадь продольного сечения обоих вариантов ограждения одинакова. Результаты численного

исследования в виде коэффициента подъемной силы $C_y = 2Y / \rho V^2 S$ (Y – подъемная сила, ρ – плотность воздушной среды, V – скорость экранного полета, S – площадь крыла), коэффициента силы сопротивления $C_x = 2X / \rho V^2 S$ (X – сила сопротивления) и аэродинамического качества $K = C_y / C_x$ приведены на рисунке 4.

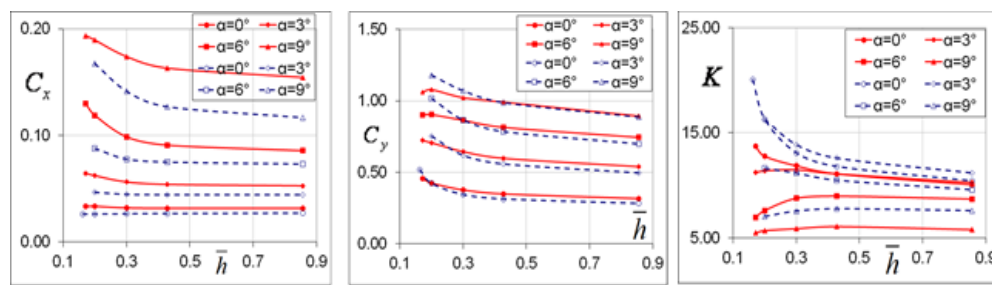


Рис. 4. Результаты численного моделирования аэродинамики компоновочных вариантов экранопланов с баллонетами (сплошные линии) и плоскими шайбами (пунктирные линии) при разных значениях углов атаки α и высоты движения над экраном $\bar{h}$

Данные рисунка 4 показывают, что интегральные аэродинамические характеристики ЭП с шасси на ВП зависят от компоновки бортового ограждения воздушной подушки. Компоновочный вариант экраноплана с баллонетным ограждением, по результатам численного моделирования, обладает меньшим на 30% аэродинамическим качеством, что влияет на соотношение водоизмещения и энерговооруженности судна, и способствует снижению транспортной эффективности ЭП. Пневмобаллонеты не только увеличивают сопротивление экраноплана, но и приводят к уменьшению подъемной силы на высотах с $\bar{h} < 0,15$. Положительные значения производной $C_{y\bar{h}} = dC_y / d\bar{h}$ на этих высотах показывает обратное влияние экранного эффекта. По результатам анализа картин течения, полученных в ходе численного моделирования, изменение характера влияния экранирующей поверхности на подъемную силу связывается с бортовым перетеканием воздуха под баллонетами из области воздушной подушки во внешнее пространство. Это перетекание стимулировано эллиптической формой поперечного сечения пневмобаллонета. Аэродинамическое разрежение под баллонетами способствует приложению к бортовому ограждению вертикальной силы, направленной к экрану. Одновременно, концевые сечения крыла экраноплана оказываются в зоне влияния отрицательных скосов потока, индуцируемых баллонетами. Таким образом, результаты численного исследования аэродинамики выбранных компоновочных вариантов ЭП обосновывают, что проектирование бортового ограждения воздушной подушки для экраноплана рационально выполнять с учетом аэродинамической интерференции баллонетов, крыла и экрана. Одновременно, применение замкнутых пневмооблочечек в качестве бортового ограждения воздушной подушки ЭП представляется целесообразным, поскольку пневмобаллонеты уменьшают нагрузку на жесткие элементы корпуса при контакте ЭП с экранирующей поверхностью. Кроме того, пневмобаллонеты способствуют обеспечению управляемости ЭП на режимах старта и остановки.

Одним из известных конструктивных решений, влияющих на аэрогидродинамику несущих поверхностей глиссеров, СВП и экранопланов, является применение в компоновке реданов. Аэродинамическое качество компоновки экраноплана с реданированными баллонетами, по оценкам численного моделирования, выше на 0,3 – 0,7 единиц, чем качество ЭП с баллонетами без реданов. Тем самым, с использованием реданов возможно увеличение транспортной эффективности ЭП с шасси на ВП баллонет-

ного типа на 5-7 %. Кроме того, в качестве более эффективного способа снижения влияния бортового истечения на малых высотах может быть рассмотрено применение энергетической механизации, трансформация ограждения на режимах крейсерского хода и другие компоновочные решения.

Заключение

Выполнен сравнительный анализ транспортной эффективности двух коммерческих экранопланов с шасси на воздушной подушке проектов УН-18SPW и WSH-500. Показано, что по показателю транспортной эффективности эти суда не превосходят судно на воздушной подушке проекта А 20П.

Выполнено численное исследование аэродинамики бортового ограждения воздушной подушки в составе компоновки экранопланов. Показано, что бортовое ограждение способно оказывать существенное влияние на интегральные аэродинамические характеристики экраноплана, вплоть до обратного экранного эффекта: уменьшения подъемной силы по мере приближения судна к экрану.

Результаты численного моделирования аэродинамики экраноплана с бортовым ограждением в виде реданированных пневмобаллонов показывают возможность увеличения аэродинамического качества за счет реданов на 5–7 % и, соответственно, возможность увеличения показателя транспортной эффективности экранопланов с шасси на воздушной подушке. Таким образом, в ходе проектирования бортового ограждения экранопланов с шасси на воздушной подушке рационально исследовать его влияние на АДХ крейсерского хода и рассматривать возможности применения различных типов механизации.

Список литературы:

- [1] Морозов В.П. Роль перспективных воздушных амфибий в развитии транспортной системы России, включая приморские регионы страны / В.П. Морозов, В.П. Соколянский, Ю.А. Захарченко, А.А. Долгополов // Теория и практика морской деятельности. Выпуск 24. Инновационные транспортные подсистемы. М.: СОПС, 2013, с. 42–60.
- [2] Любимов В.И. Перспективные направления развития экранопланов в транспортной системе России / В.И. Любимов, В.И. Барышев // Труды 19-ого международного научно-промышленного форума «Великие реки». – Нижний Новгород, Изд-во: ФГБОУ ВО «ВГУВТ», 2017. – С. 11.
- [3] Грамузов Е.М. Перспективы развития проекта амфибийного судна на воздушной подушке с аэродинамической разгрузкой / Е.М. Грамузов, Ф.С. Пеплин, А.В. Февральских // V Международный Балтийский морской форум. V Международная научная конференция «Морская техника и технологии. Безопасность морской индустрии»: тезисы докладов. Часть I. – Калининград: Изд-во БГАРФ, 2017. – С. 56–57.
- [4] Rozhdestvensky K.V. Wing-in-ground effect vehicles / K.V. Rozhdestvensky // Progress in aerospace sciences. – № 42. – 2006. – pp. 211–283.
- [5] Маскалик А.И. Экранопланы: транспортные суда 21 века / А.И. Маскалик, Р.А. Нагапетян, В.В. Иваненко, А.Г. Бутлицкий, В.В. Томилин, А.И. Лукьянов. – СПб.: Судостроение, 2005. – 576 с.
- [6] Февральских А.В. Разработка методики проектирования аэрогидродинамической компоновки амфибийного судна на воздушной подушке с аэродинамической разгрузкой на основе численного моделирования: дис. ... канд. техн. наук. – Нижний Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2017. – 175 с.
- [7] Блохин В.Н. Применение методов вычислительного эксперимента для определения аэродинамических характеристик экраноплана на крейсерском режиме движения / В.Н. Блохин, В.М. Прохоров, П.С. Кальясов, А.К. Якимов, А.В. Туманин, В.В. Шабаров // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. – 2012. – №3. – с. 147–154.
- [8] Alireza Heidarian. Numerical Aerodynamic of the Rectangular Wing Concerning to Ground Effect / Alireza Heidarian, Hassan Ghassemi, Pengfei Liu // American Journal of Mechanical Engineering – 2018 – Vol. 6 – No. 2 – P. 43–47.
- [9] Boshun Gao. Aerodynamics of a Transonic Airfoil above Wavy Ground / Boshun Gao, Qiulin Qu, Ramesh K. Agarwal // AIAA Aerospace Sciences Meeting – January 2018 – doi:10.2514/6.2018-1784.

- [10] Juhee Lee. Computational analysis of static height stability and aerodynamics of vehicles with a fuselage, wing and tail in ground effect / Juhee Lee // *Ocean Engineering*. – 2018. – № 168 – P. 12–22.
- [11] Kornev Nikolai. Complex numerical modeling of dynamics and crashes of wing-in-ground vehicles / Kornev Nikolai, Matveev Konstantin // *41st Aerospace Science Meeting and Exhibit* – 2003 – AIAA2003-A2600.
- [12] Mohammadhossein Nirooei. Aerodynamic and static stability characteristics of airfoils in extreme ground effect / Mohammadhossein Nirooei // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering* – 2018 – Vol. 232(6) – P. 1134–1148.
- [13] Umar F. Aerodynamic force and power for flapping wing at low reynolds number in ground effect / F. Umar, M. Sun // *15th International Bhurban Conference on Applied Sciences and Technology (IBCAST)* – 2018. – doi:10.1109/ibcast.2018.8312279.
- [14] Xuan Zhang. Computation of Flow Field of an Airfoil with Gurney Flap in Ground Effect / Xuan Zhang, Qiulin Qu, Ramesh K. Agarwal // *35th AIAA Applied Aerodynamics Conference*. – 2017. – doi:10.2514/6.2017-4466.
- [15] Chung, J. Optimization of an air cushion vehicle bag and finger skirt using genetic algorithms / J. Chung, T.-C. Jung // *Aerospace Science and Technology* – 2004. – Vol. 8(3) – P. 219–229.
- [16] Nikseresht, A. H. Complete flow field computation around an ACV (air-cushion vehicle) using 3D VOF with Lagrangian propagation in computational domain / A.H. Nikseresht, M.M. Alishahi, H. Emdad // *Computers & Structures*. – 2008. – Vol. 86(7-8) – P. 627–641.
- [17] Zhou, J. Nonlinear FEM Simulation of Air Cushion Vehicle (ACV) Skirt Joint Under Tension Loading / J. Zhou, J. Guo, W. Tang, S. Zhang // *Naval Engineers Journal* – 2008. – Vol. 121(2) – P. 91–97.
- [18] Zalek, S.F. Modeling of air cushion vehicle's flexible seals under steady state conditions / S.F. Zalek, D.G. Karr, S. Jabbarizadeh, K.J. Maki // *Ocean Systems Engineering* – 2011 – Vol. 1 – No. 1 – P. 17–28.

NUMERICAL INVESTIGATION OF BOARD SEAL AERODYNAMICS IMPACT ON WING IN GROUND EFFECT VEHICLE CHARACTERISTICS

Fevralskikh Andrey V., *Candidate of Engineering Science,
Lead CFD Engineer, CADFEM CIS,
46, Suzdalskaya st, Moscow, 111672*

Keywords: *wing in ground effect vehicle, air cushion, conceptual design, aerodynamics, numerical simulation, ANSYS CFD*

Annotation. *One of the advantages of wing in ground (WIG) effect vehicles is considered with the possibility of a high value of transport efficiency on cruise motion mode than it is possible for air-cushion vehicles (ACV). It is achieved due to low WIG vehicles drag-to-displacement ratio values. The WIG vehicles with the static air-cushion (AC) supported by fans need the low power of engine on a start motion mode, than the classic WIG vehicles with the power augmentation on takeoff. But the construction elements of the take-off systems can have impact on the fluid near wing on ground effect cruise motion mode, that leads to decrease the lift force impact on WIG vehicle. The results of calculations show that the known operated WIG vehicles with the static air-cushion as chassis have the low values of transport efficiency, than the ACV with the ballonet seal. The insufficient project development of the WIG vehicles with AC as chassis can be considered with the lack of data about the impact of board seal on the wing aerodynamic streamlines. Using computational fluid dynamics methods the ground effect aerodynamics of the both WIG layouts with ballonets and with plane endplates is investigated. The lift coefficient, the drag coefficient and the lift-to-drag ratio are obtained by results of the numerical investigation. As it shows, the ballonet board seal promotes the development of board directed flow near wing and decrease the lift-to-drag ratio. For some values of pitch angle the reverse ground effect (the lift force decreasing for ground clearance decreasing) is observed. For WIG with the ballonet air-cushion design it is recommended to use the ballonets with redans.*

References:

- [1] Morozov V.P., Sokolyanskiy V.P., Zakharchenko YU.A., Dolgoplov A.A. Rol' perspektivnykh vozdushnykh amfibiyy v razvitiy transportnoy sistemy Rossii, vklyuchaya primorskie regiony strany [Role of perspective aeroamphibians in the development of Russian transport system]. *Teoriya i praktika morskoy deyatel'nosti*, 2013, no. 24, pp. 42–60.
- [2] Lyubimov V.I., Barishev V.I. Perspektivnye napravleniya razvitiya ekranoplanov v transportnoj sisteme Rossii [Perspective directions of development of screenplans in the transport system of Russia]. *Transactions of 19th International Science and Industrial Forum «Great Rivers»*. Nizhny Novgorod, Publisher of VSUWT, 2017, pp.11-15.
- [3] Gramuzov E.M., Peplin F.S., Fevralskikh A.V. Perspektivy razvitiya proekta amfibijnogo sudna na vozdushnoj podushke s aerodinamicheskoy razgruzkoj [Perspectives of project development of wing-in-ground effect hovercraft]. *Transactions of V International Baltic Maritime Forum*, Kaliningrad, Publisher of BGARF, 2017, pp.6–57.
- [4] Rozhdestvensky K.V. Wing-in-ground effect vehicles. *Progress in aerospace sciences*, 2006, no. 42, pp.211–283.
- [5] Maskalik A.I. Ekranoplany: transportnye suda 21 veka [Wing-in-ground effect vehicle: transport vessels of 21st century]. Sankt-Peterburg, Sudostroenie, 2005, 576 p.
- [6] Fevralskikh A.V. Development of wing-in-ground effect hovercraft design method based on computational fluid dynamics (PhD thesis). Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, 2017, p.175.
- [7] Blokhin V.N., Prokhorov V.M., Kal'yasov P.S., YAkimov A.K., Tumanin A.V., Shabarov V.V. Primenenie metodov vychislitel'nogo eksperimenta dlya opredeleniya aerodinamicheskikh kharakteristik ekranoplana na kreyserskom rezhime dvizheniya [The application of computer simulation for the determination of wig craft aerodynamic characteristics in a cruising regime]. *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N.I. Lobachevskogo*, 2012, №3, pp.147–154.
- [8] Alireza Heidarian, Hassan Ghassemi, Pengfei Liu. Numerical Aerodynamic of the Rectangular Wing Concerning to Ground Effect. *American Journal of Mechanical Engineering*, 2018, vol. 6, no. 2, pp.43-47.
- [9] Boshun Gao, Qiulin Qu, Ramesh K. Agarwal. Aerodynamics of a Transonic Airfoil above Wavy Ground. *AIAA Aerospace Sciences Meeting*, January 2018, doi:10.2514/6.2018-1784.
- [10] Juhee Lee. Computational analysis of static height stability and aerodynamics of vehicles with a fuselage, wing and tail in ground effect. *Ocean Engineering*, 2018, no.168, pp. 12–22.
- [11] Kornev Nikolai, Matveev Konstantin. Complex numerical modeling of dynamics and crashes of wing-in-ground vehicles. *41st Aerospace Science Meeting and Exhibit*, 2003, AIAA2003-A2600.
- [12] Mohammadhossein Nirooei. Aerodynamic and static stability characteristics of airfoils in extreme ground effect. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 2018, vol. 232(6), p. 1134–1148.
- [13] Umar F., Sun M. Aerodynamic force and power for flapping wing at low reynolds number in ground effect. *15th International Bhurban Conference on Applied Sciences and Technology (IBCAST)*, 2018, doi:10.1109/ibcast.2018.8312279.
- [14] Xuan Zhang, Qiulin Qu, Ramesh K. Agarwal. Computation of Flow Field of an Airfoil with Gurney Flap in Ground Effect. *35th AIAA Applied Aerodynamics Conference*, 2017, doi:10.2514/6.2017-4466.
- [15] Chung J., Jung T.-C. Optimization of an air cushion vehicle bag and finger skirt using genetic algorithms. *Aerospace Science and Technology*, 2004, vol. 8(3), pp. 219–229.
- [16] Nikseresht A.H., Alishahi M.M., Emdad H. Complete flow field computation around an ACV (air-cushion vehicle) using 3D VOF with Lagrangian propagation in computational domain. *Computers & Structures*, 2008, vol. 86(7-8), pp. 627–641.
- [17] Zhou J., Guo J., Tang W., Zhang S. Nonlinear FEM Simulation of Air Cushion Vehicle (ACV) Skirt Joint Under Tension Loading. *Naval Engineers Journal*, 2008, vol. 121(2), pp. 91–97.
- [18] Zalek S.F., 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.

Статья поступила в редакцию 29.07.2019 г.

УДК 532.5

Чебан Егор Юрьевич, к.т.н., доцент кафедры гидродинамики,
теории корабля и экологической безопасности судов,
ФГБОУ ВО «ВГУВТ», e-mail: egor.cheban.2@gmail.com

Лукина Евгения Александровна, к.т.н., доцент кафедры гидродинамики,
теории корабля и экологической безопасности судов,
ФГБОУ ВО «ВГУВТ», e-mail: evair@yandex.ru

Мартемьянова Ольга Вадимовна, аспирант кафедры гидродинамики,
теории корабля и экологической безопасности судов,
ФГБОУ ВО «ВГУВТ», e-mail: dovnn@yandex.ru

Кшталтная Мария Николаевна, магистрант кафедры гидродинамики,
теории корабля и экологической безопасности судов,
ФГБОУ ВО «ВГУВТ», e-mail: kshalttnaja@rambler.ru

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
образования «Волжский государственный университет водного транспорта»
(ФГБОУ ВО «ВГУВТ»)
603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5

ОЦЕНКА СОПРОТИВЛЕНИЯ БОЛЬШЕГРУЗНОГО КАТАМАРАНА ЧИСЛЕННЫМИ МЕТОДАМИ

Ключевые слова: вычислительная гидродинамика, CFD, катамаран, буксировочные
испытания, корабельные волны, интерференция волн, NUMECA FINE/MarineTM

Аннотация. В настоящее время существует проблема повышения эффективности перевозок внутренним водным транспортом. Одним из путей решения может быть использование большегрузных катамаранов. В статье представлены результаты определения сопротивления численными методами для перспективного большегрузного катамарана для внутренних водных путей. На основании выполненного анализа научных работ был сделан вывод о том, что при проектировании большегрузных речных катамаранов для ВВП необходимо выдерживать докритические значения чисел Фруда с учетом благоприятной интерференции волн и влияния глубины на конкретных линиях эксплуатации. С использованием программного продукта NUMECA FINE/MarineTM была произведена оценка величины сопротивления. Выбрана K- ω SST модель турбулентности с пристеночными функциями, обоснован размер расчетной сетки, начальные и граничные условия. Результаты численного моделирования показали хорошее соответствие приближенным методикам Алферьева-Мадорского и программы NavCad.

Введение

В настоящее время существует проблема повышения скорости перевозок по внутренним водным путям, в первую очередь большегрузных самоходных судов речного и смешанного плавания [1, 2]. Однако повышение скорости движения водоизмещающего судна приводит к возрастанию волновой составляющей в общем сопротивлении, а, следовательно, к повышению требований для движительно-рулевого комплекса и росту мощности главных двигателей. Другой проблемой повышения скорости водоизмещающих судов является их негативное энергетическое воздействие на ложе и берега водных путей, происходящее из-за увеличения высот корабельных волн. В работах [3–6] показано, что судном, которое может обеспечить повышение скорости при допустимой высоте генерируемой корабельной волны, может быть большегрузный катамаран.

Исследованиям гидродинамики катамаранов и разработке аналитических методов расчета их волнового сопротивления посвящены работы Костюкова А.А., Ляховицкого А.Г., Дубровского В.Г. [7], Millward [8]. На основании большого количества модельных испытаний Алферьевым М.Я. [9] исследовано влияние относительной длины L/B и расстояния между корпусами на волновое сопротивление катамаранов, движущихся, в том числе, в условиях ограниченных глубин, характерных для внутренних водных путей. Результаты исследований М.Я. Алферьева были учтены при постройке грузовых речных катамаранов длиной от 40 до 95 м и скоростью хода до 27 км/ч, а также пассажирского катамарана длиной 48 м, движущегося со скоростью около 40 км/ч. Исследования интерференции волн в зависимости от расстояния между корпусами для модели высокоскоростного катамарана были выполнены также А. Souto-Iglesias, R. Zamora-Rodriguez, D. Fernandez-Gutierrez и L. Perez-Rojas [10]. В них показано, что фактор интерференции может иметь отрицательное значение при числах Фруда, близких к 0,3. По мнению авторов, это свидетельствует о благоприятной интерференции волн и снижении сопротивления. Влияние относительных размеров катамарана на сопротивление и волнообразование численными методами исследовано Н.В. Мораес, J.M. Vasconcellos, R.G. Latorre [11] для двух сдвоенных корпусов «Вигли» и катамарана с острыми скулами, при числах Фруда от 0,2 до 1. В работе показано существенное влияние глубины водоема на сопротивление скоростных катамаранов длиной до 40 м в диапазоне относительных глубин $L/h=2-6$. Аналогичные исследования потенциальным панельным методом численного решения уравнений для свободной поверхности были выполнены Md Shahjada Tarafdera, Kazuo Suzuki [12]. Однако результаты этих исследований трудно применимы для ВВП России, где относительная глубина для большегрузных судов находится в диапазоне $L/h=21-14$ м.

Из анализа научной литературы можно сделать вывод о том, что гидродинамические характеристики катамарана зависят от следующих величин:

– числа Фруда по длине судна $Fr = \frac{V}{\sqrt{g \cdot L}}$;

– расстояния между корпусами (горизонтальный клиренс, отнесенный к длине корпуса – S/L);

– относительной глубины под корпусом судна H_{ϕ}/T .

Результаты расчета сопротивления с помощью программ вычислительной гидродинамики и по теории «тонкого тела», а также модельных экспериментов в опытовых бассейнах, показали [12–15], что при любом относительном клиренсе в очень узком диапазоне малых чисел Фруда до 0,3 можно получить значения коэффициента остаточного сопротивления, отличающиеся в два раза. Однако эти колебания значений далеки от максимальных значений сопротивления при $Fr = 0.45 \dots 0.50$ и меньше их в 3-6 раз при различных относительных глубинах. При $Fr < 0,5$ кривые при разных относительных клиренсах имеют значительные модуляции, а при $Fr > 0.5$ имеют вид стройного ансамбля кривых [9].

Теоретические и экспериментальные данные [12,13,16] позволяют считать целесообразным использование различных методов определения остаточного сопротивления катамаранов в разных диапазонах скоростей. Так как исследователей интересовало движение катамаранов с высокими числами Фруда, то и основные исследования лежат в области $Fr > 0.35 \dots 0.40$.

Предполагается, что при проектировании большегрузных речных катамаранов для ВВП необходимо выдерживать докритические значения чисел Фруда ($Fr < 0,3$) с учетом благоприятной интерференции волн и влияния глубины на конкретных линиях эксплуатации. В этом случае необходимо использование максимально точных методов определения гидродинамических характеристик большегрузных катамаранов при проектировании.

1. Моделирование буксировочных испытаний большегрузного катамарана методом вычислительной гидродинамики

Для оценки сопротивления катамарана использовался программный комплекс CFD NUMECA/FineMarineTM, предназначенный для решения задач корабельной гидродинамики, включая определение маневренных качеств судов и работу судовых движителей. Целью работы являлась отработка методики численного моделирования большегрузных катамаранов с помощью пакета NUMECA/FineMarineTM: определение параметров численного моделирования, в том числе размера расчетной сетки, начальных и граничных условий.

Объектом исследования в настоящей работе был перспективный большегрузный катамаран для Волго-Камского бассейна [1–3], характеристики которого приведены в табл. 1. На рис. 2 выделена область чисел Фруда, при которых происходит движение большегрузного катамарана. Необходимо отметить, что движение большегрузного катамарана происходит в диапазоне чисел Фруда, который достаточно мало исследован [1–3], и построенные по данным модельных испытаний кривые (рис. 2) нельзя считать исчерпывающими. Кроме того, отсутствует возможность получить данные о высотах корабельных волн, возникающих при движении катамарана. В работе [6] проведена оценка волнообразования на основе буксировочных испытаний моделей существующих проектов однокорпусных грузовых судов и катамарана в опытовом бассейне на глубокой воде. Установлено, что проектный диапазон чисел Фруда соответствует интерференционному минимуму кривой остаточного сопротивления на глубокой воде, что может обеспечить возможное снижение полного сопротивления [5,6]. Выявлена целесообразность проведения исследований сопротивления катамаранов в зоне докритических чисел Фруда, в том числе и на мелководье.



Рис. 1. Общий вид перспективного большегрузного катамарана для Волго-Камского бассейна

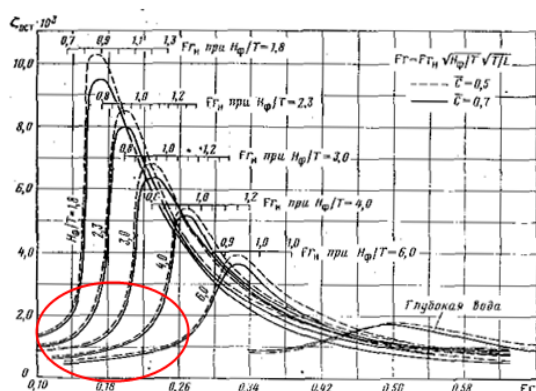


Рис. 2. График коэффициента остаточного сопротивления речных катамаранов по М.А. Альферьеву с указанием диапазона чисел Фруда для большегрузного катамарана

Таблица 1

**Характеристики перспективного большегрузного катамарана
для Волго-Камского бассейна**

	Параметр	Обозначение	Единица измерения	Значение
1.	Длина по КВЛ	L	м	150,0
2.	Ширина одного корпуса по КВЛ	B _к	м	10,0
4.	Осадка по КВЛ	T	м	2,8
5.	Относительный клиренс		-	0,4
6.	Коэффициент общей полноты	δ	-	0,630
7.	Отстояние подшивки моста катамарана от воды при осадке в грузу	h	м	2,1
8.	Водоизмещение в грузу	D	т	5300
9.	Скорость	v	км/ч	30 (8,33 м/с);
10.	Числа Фруда	Fr _L		0,20...0,23

Численное моделирование гидродинамики судов с целью определения сопротивления [6,7] выполняется в четыре этапа: разработка и импорт твердотельной геометрии, моделирования и анализ результатов. Разработанная твердотельная геометрия в масштабе 1:10, представляла собой симметричный корпус с цилиндрической вставкой. Геометрия была импортирована через формат IGS в parasolid 25.

Размеры расчетного домена выбирались на основании [17,18], размещение граничных условий на гранях домена показано на рис. 4.

Построение расчетной сетки выполнялось в модуле HEXPRESSTM. Использовалась неструктурированная сетка, начальный размер составил (x:y:z): 20:10:6. Для получения более точного решения было выполнено измельчение сетки по поверхности корпуса катамарана: корпус, транец и свободная поверхность – 8 уровень измельчения, кривые по корпусам – 7–8. Разрешение пограничного слоя составило – 6–10 при заданном параметре $y^+=1$ [17, 18], для учета трения в водоизмещающем режиме движения. Кроме того, было выполнено локальное измельчение сетки в области возникновения и распространения корабельных волн, как вблизи корпуса, так и между корпусами (рис. 5). Общее количество ячеек составило от 2011809 до 3448319. Вид расчетной сетки показан на рис. 5.

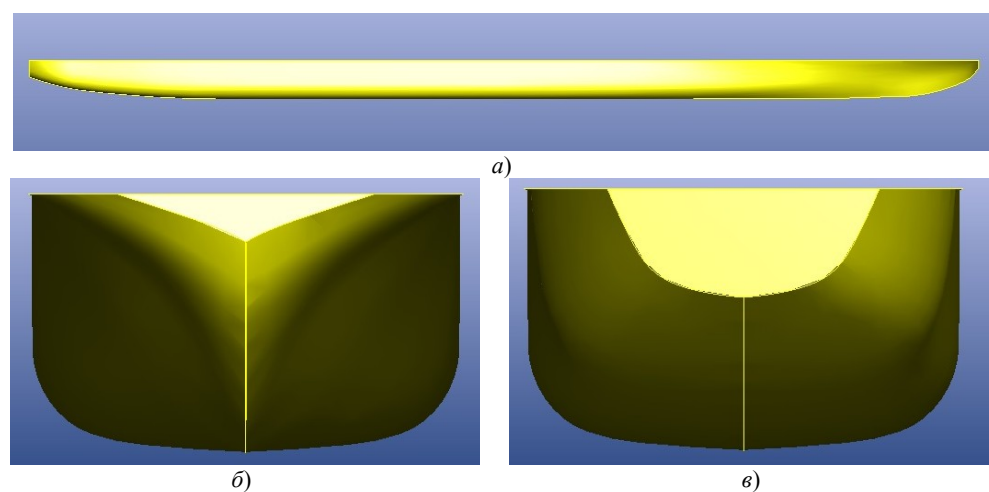


Рис. 3. Твёрдотельная геометрия большегрузного катамарана:
а) вид сбоку, б) вид в нос, в) вид в корму

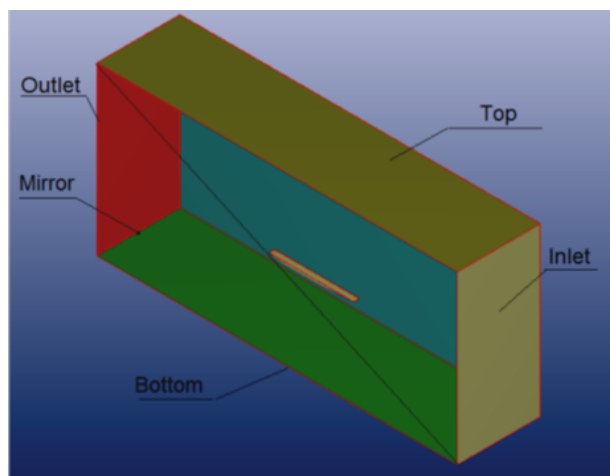


Рис. 4. Схема расчетного домена и расположение граничных условий

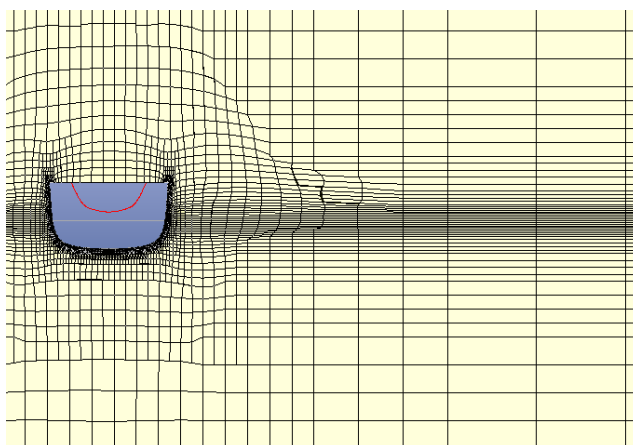


Рис. 5. Вид расчетной сетки

Одновременное моделирование двух корпусов катамаранов требует увеличения размеров сетки [20] и соответственно больших затрат времени. Результаты выполненного исследования показали, что для двухкорпусных судов достаточно смоделировать только один корпус, расположив корпуса относительно плоскости симметрии с соответствующим граничным условием «*mirror*», т.е. нулевыми нормальными и касательными напряжениями. Моделирование выполнялось для судна с одной степенью свободы, т.е. движение вперед. Возможность возникновения просадки и дифферента не учитывались.

Параметры расчета приведены в табл. 2.

Таблица 2

Параметры расчета

	Параметр	Значение
1.	Длина [м]	15,34 (1:10)
2.	Осадка [м]	0,28
3.	Скорость [м/с]	2,28; 2,46; 2,66
4.	Количество степеней свободы	1 – движение вперед
5.	Постановка	стационарная задача
6.	Схема дискретизации по времени:	2 порядка назад
7.	Модель турбулентности	K- ω SST модель турбулентности с пристеночными функциями, EASM
9.	Разгонный участок [с]	13,46 с; 12,472 с; 11,54 с
10.	Параметры среды:	вода (24.5°): - молекулярная вязкость: $1.22 \text{ (Па} \cdot \text{с)} \times 10^{-3}$ - плотность: 999.07 кг/м^3 воздух (20°): - молекулярная вязкость: $1.85 \text{ (Н} \cdot \text{с/м}^2) \times 10^{-5}$ - плотность: 1.2 кг/м^3

2. Результаты численного моделирования буксировочных испытаний

В качестве визуализации результатов использовались поля скоростей, форма волновой поверхности, а также распределения давления по поверхности корпуса катамарана. Данные о форме волновой поверхности (рис. 6–8) позволяют определить высоты корабельных волн, необходимые, например, для оценки их воздействия на дно и ложе водоемов.

В частности, из рассмотрения волновой поверхности на рис. 7, можно видеть, что высота волн между корпусами (а) ниже, чем по наружному борту (б), что может свидетельствовать о частичной интерференции волн. В то же время для гипотезы о возникновении «катамаранного эффекта», информации в данном случае недостаточно, ввиду ограниченного количества результатов.

Поскольку буксировочные испытания катамарана были выполнены на принципиальной модели катамарана сходных размеров, а численное моделирование выполнено для модели с проектными характеристиками, то сравнение выполнялось с приближенными методиками Алферьева-Мадорского и по программе NavCad. Сравнение результатов на рис. 9 для сеток малой и средней плотности показало достаточную сходимость результатов численного моделирования и приближенных расчетов.

Необходимо отметить, что для большей достоверности на сегодняшний день необходимо сравнивать результаты численного моделирования движения большегрузных катамаранов с результатами буксировочных, а еще лучше и натурных испытаний. Это связано с используемыми в комплексах вычислительной гидродинамики моделями

ми турбулентности, которые в большей степени предназначены для моделирования натуральных объектов и соответственно показывают лучшее совпадение сопротивления при моделировании натуральных условий. Например, в работе [21] показано, что различия при численном моделировании между моделью и полномасштабным судном, касаются, прежде всего, пограничного слоя, и процессов трансформации волн, в частности за транцем. Однако для катамаранов исследований влияния масштаба модели на результаты численного моделирования еще не проводились и будут выполнены в дальнейшем по уже отработанной методике.

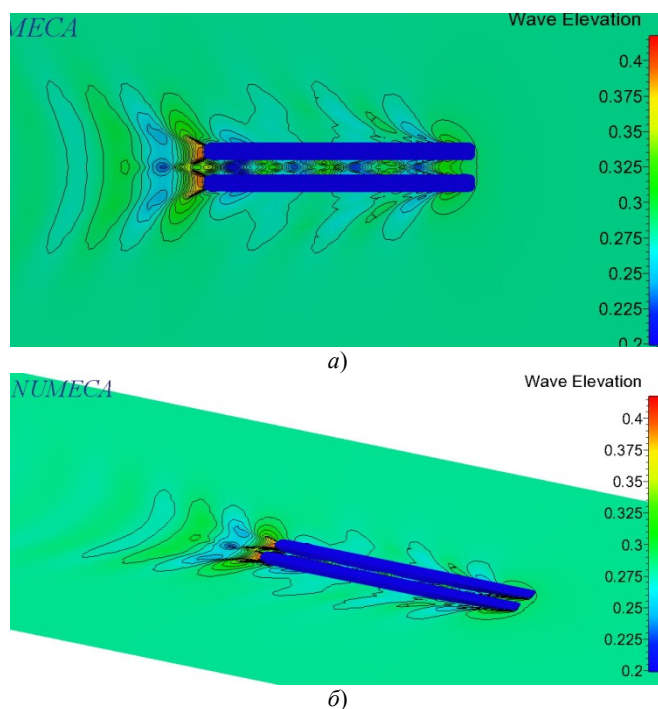


Рис. 6. Волновая поверхность при движении катамарана

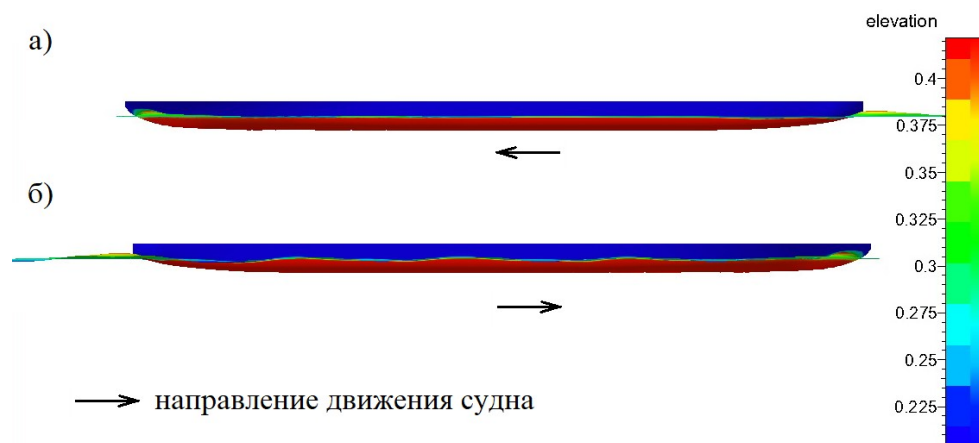


Рис. 7. Волновая поверхность при движении:
а) внутренний борт корпуса, б) наружный борт корпуса.

NUMECA

а)



б)

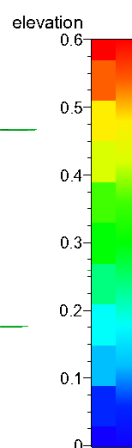
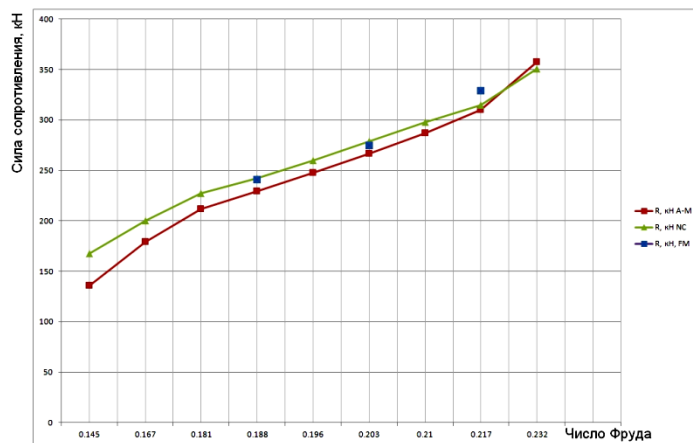
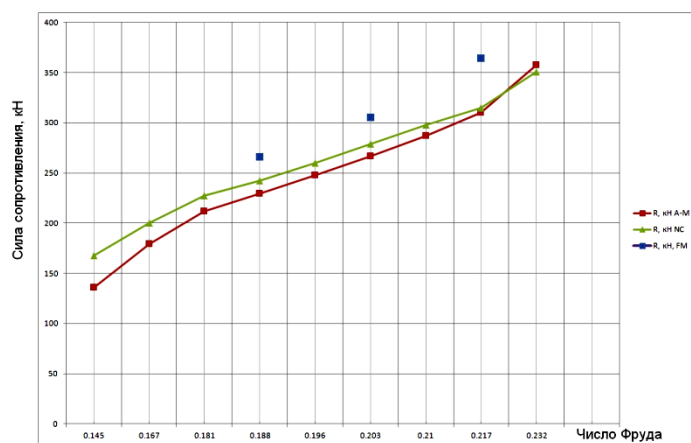


Рис. 8. Волновая поверхность при движении а) вид с носа, б) вид с кормы.



- ▲ — кривая сопротивления, полученная методом Алферьева – Мадорского;
- — кривая сопротивления, полученная в программе NavCad.
- — результатам FineMarine

Рис. 9. Графики сопротивления для двух вариантов сетки

3. Заключение

Представлена методика численного моделирования большегрузных катамаранов с помощью пакета NUMECA/FineMarineTM. Определены параметры численного моделирования, выбран размер расчетной сетки, обоснованы начальные и граничные условия. Выполненное сравнение результатов численного моделирования и расчетов по приближенным методикам показало достаточную сходимость. Сделан вывод о необходимости сравнения результатов численного моделирования с буксировочными и натурными испытаниями катамарана сходных размеров.

Список литературы:

- [1] Этин В.Л., Лукина Е.А., Милавин С.А. «Проектирование речных скоростных грузовых накатных судов катамаранного типа». / 12-ый междунар. научно-промышленный форум "Великие реки-2010". Труды конгресса. Т.2. Н. Новгород, Нижегород. госуд. архит.-строит. ун-т – Н. Новгород: НГАСУ, 2011. – С. 37–44.
- [2] Лукина Е.А., Митрошин С.Г., Битков Д.А. «Обоснование применения накатного судна для паромно-транспортных грузовых перевозок в Волжско-Камском бассейне»./ Вестник ВГАВТ. Вып.28.- Н.Новгород: Изд-во ФГОУ ВПО ВГАВТ, 2009. – С. 56–62.
- [3] Лукина Е.А., Битков Д.А. Оценка допустимой высоты волны от большегрузных накатных судов катамаранного типа при эксплуатации в Волжско-Камском бассейне./Вестник ВГАВТ. – Н.Новгород: Изд-во ФГОУ ВПО ВГАВТ, 2011. -Вып.27. – С. 159–164.
- [4] Этин В.Л., Лукина Е.А., Митрошин С.Г., Сироткин Е.М. Результаты сравнения параметров корабельных волн от судов различных типов с помощью модельных испытаний. / Труды 16-го международного научно-промышленного форума «Великие реки – 2014». Материалы научно-методической конференции профессорско-преподавательского состава, аспирантов, специалистов и студентов «Проблемы использования и инновационного развития внутренних водных путей в бассейнах великих рек». Том 1. – Н. Новгород: изд-во ФГБОУ ВО «ВГАВТ», 2014. 330 с.
- [5] Лебедева М.Н. Катамаран в русле больших скоростей // МИР ТРАНСПОРТА, том 14, № 2, С. 38–47 (2016).
- [6] Кузьмичёв И.К., Лукина Е.А., Митрошин С.Г., Чебан Е.Ю. Оценка волнообразования большегрузного катамарана для внутренних водных путей // Морские интеллектуальные технологии. 2017. Т. 3. № 4 (38). С. 99-105.
- [7] Многокорпусные суда / А.Н. Алексеев [и др.]; под ред. В.А. Дубровского. – Л.: Судостроение, 1978. – 304 с.
- [8] Millward, A., Sproston, J.L., 1988. The prediction of the resistance of fast displacement hull in shallow water. Royal Institution of Naval Architects, Maritime Technology Monograph, No. 4.
- [9] Алферьев М.Я. Транспортные катамараны внутреннего плавания / М.Я. Алферьев, Г.С. Мадорский. – М.: Транспорт, 1976. – 336с.
- [10] Souto-Iglesias A., Zamora-Rodriguez R., Fernandez-Gutierrez D. и Perez-Rojas L. Analysis of the wave system of a catamaran for CFD validation. Experimental Fluids (2007) 42:321–332 DOI 10.1007/s00348-006-0244-4
- [11] Moraes H.B., Vasconcellos J.M., Latorre R.G.. Wave resistance for high-speed catamarans. Ocean Engineering 31 (2004) 2253–2282
- [12] Md Shahjada Tarafdera, Kazuo Suzuki. Computation of wave-making resistance of a catamaran in deep water using a potential-based panel method. Ocean Engineering 34 (2007) 1892–1900.
- [13] Riccardo Broglia, Stefano Zaghi, Andrea Di Mascio. Numerical simulation of interference effects for a high-speed catamaran. J Mar Sci Technol (2011) 16:254–269./ DOI 10.1007/s00773-011-0132-3 [Численное моделирование интерференционного эффекта высокоскоростного катамарана. (Италия, 2011 г.) Режим доступа : <http://www/sciencedirect.com>, свободный.]
- [14] Волновое сопротивление для высокоскоростных катамаранов : пер. с англ. / Г. Морас, Д. Васконселлос, Л. Латорре. [электронный ресурс]/ Государственный университет Рио-де-Жанейро, Бразилия; Нью-Орлеанский университет, США, 2004. – Режим доступа : <http://www/sciencedirect.com>, свободный.
- [15] Лукина Е.А. Анализ литературы по исследованию минимального сопротивления большегрузных катамаранов внутреннего плавания [электронный ресурс] // Труды 15-го международного научно-промышленного форума «Великие реки-2013» (15-18 мая 2013 г.). Выпуск 2013. С.287-291. – Режим доступа : <http://vf-река-море.pdf/2013/PDF/91.pdf>, свободный.

- [16] Mizine I., Karafiath G., Queutey P., Visonneau M. Interference Phenomenon in Design of Trimaran Ship, FAST 2009, 2009.
- [17] Theoretical Manual ISIS-CFD v3.1 Equipe Modélisation Numérique, Laboratoire de Mécanique des Fluides, CNRS-UMR 6598, Ecole Centrale de Nantes, B.P. 92101, 44321 Nantes Cedex 3, France.
- [18] User Manual FINE™/Marine v3.1, Documentation v3.1a NUMECA International, 187-189, Chaussée de la Hulpe 1170 Brussels, Belgium.
- [19] Visonneau M., Queutey P., Deng Gan Bo, Wackers J., Guilmineau E., Leroyer A., Mallol B. Computation of Free-Surface Viscous Flows around Self-Propelled Ships with the Help of Sliding Grids, COMPIT-2012, 2012.
- [20] Roux Y., Wackers J., Dorez L. Slamming computation on the multihull Groupama 3, Innovsail 2010.
- [21] Hochkirch K., Mallol B. On the Importance of Full-Scale CFD Simulations for Ships, 12th International Conference on Computer Applications and Information Technology in the Maritime Industries (COMPIT 2013) – Cortona (Italy) on April 15th -17th.

NUMERICAL SIMULATION OF THE TOWING TESTS EXTRA-CAPACITY CATAMARAN

Cheban Yegor Y., Candidate of Engineering Science, associate professor
Hydrodynamics, ship theory and ship's ecological safety department,
Volga State University of Water Transport

Lukina Evgenia A., Candidate of Engineering Science, associate professor
Hydrodynamics, ship theory and ship's ecological safety department,
Volga State University of Water Transport

Olga Vadimovna M., post graduate student Hydrodynamics, ship theory
and ship's ecological safety department,
Volga State University of Water Transport

Kshtaltnaya Maria N., master student Hydrodynamics, ship theory
and ship's ecological safety department,
Volga State University of Water Transport
5, Nesterov st, Nizhniy Novgorod, 603951

Key words: Computer fluid dynamics, extra-capacity catamaran, towing test, NUMECA FINE/Marine, inland waterways, resistance, wave surface, wave height, interference phenomenon

Abstract. A numerical estimation of the full resistance for a new internal waterways type vessel is given. Creation of a new type of vessels is requires to ensure a combination of high deck area per tonne of cargo capacity and high speed of a river vessel. The value of Froude numbers for large river catamarans corresponds to an interference minimum of the residual drag curve in deep water, which provides a certain reduction in drag and towrope power. The catamaran full resistance curve in the range of subcritical rates in deep water by CFD code NUMECA/FineMarine. Analysis of the wave fields around catamaran is given.

References:

- [1] Etin V.L., Lukina E.A., Milavin S.A. «Proektirovanie rechnykh skorostnykh gruzovykh nakatnykh sudov katamarannogo tipa» / 12-yy mezhdunar. nauchno-promyshlennyy forum «Velikie reki-2010»: rudy kongressa. T.2. N. Novgorod, Nizhegorod. gosud. arkhiv-stroito. un-t – N. Novgorod: NGASU, 2011. – S. 37–44.
- [2] Lukina E.A., Mitroshin S.G., Bitkov D.A. «Obosnovanie primeneniya nakatnogo sudna dlya paromno-transportnykh gruzovykh perevozok v Volzhsko-Kamskom bassejne»./ Vestnik VГАVТ. Vyp.28.- N.Novgorod: Izd-vo FGOU VPO VГАVТ, 2009. – S.56-62.
- [3] Lukina E.A., Bitkov D.A. Otsenka dopustimoy vysoty volny ot bol'shegruznykh nakatnykh sudov katamarannogo tipa pri ekspluatatsii v Volzhsko-Kamskom bassejne./Vestnik VГАVТ. – N.Novgorod: Izd-vo FGOU VPO VГАVТ, 2011. -Vyp.27. – S. 159–164.

- [4] Etin V.L., Lukina E.A., Mitroshin S.G., Sirotkin E.M.. Rezul'taty sravneniya parametrov korabel'nykh voln ot sudov razlichnykh tipov s pomoshch'yu model'nykh ispytaniy. / Trudy 16-go mezhhdunarodnogo nauchno-promyshlennogo foruma «Velikie reki – 2014». Materialy nauchno-metodicheskoy konferentsii professorsko-prepodavatel'skogo sostava, aspirantov, spetsialistov i studentov «Problemy ispol'zovaniya i innovatsion-nogo razvitiya vnutrennikh vodnykh putey v basseynakh velikikh rek». Tom 1. – N. Novgorod: izd-vo FGBOU VO «VGAVT», 2014. 330s.
- [5] Lebedeva M.N. Katamaran v rusle bol'shikh skorostey // MIR TRANSPORTA, tom 14, № 2, S. 38–47 (2016).
- [6] Kuzmichev I.K., Lukina E. A., Mitroshin S. G., Cheban E. Y. Evaluation of wave formation of a large cargo catamaran for inland waterways // Marine intelligent technologies. 2017. T. 3. № 4 (38). С. 99-105.
- [7] Mnogokorpusnye suda / A.N. Alekseev [i dr.]; pod red. V.A. Dubrovskogo. – L.: Sudostroenie, 1978. – 304 s.
- [8] Millward, A., Sproston, J.L., 1988. The prediction of the resistance of fast displacement hull in shallow water. Royal Institution of Naval Architects, Maritime Technology Monograph, No. 4.
- [9] Alfer'ev M.Ya. Transportnye katamarany vnutrennego plavaniya / M.Ya. Alfer'ev, G.S. Madorskiy. – M.: Transport, 1976. – 336s.
- [10] Souto-Iglesias A., Zamora-Rodriguez R., Fernandez-Gutierrez D. и Perez-Rojas L. Analysis of the wave system of a catamaran for CFD validation. Experimental Fluids (2007) 42:321–332 DOI 10.1007/s00348-006-0244-4
- [11] Moraes H.B., Vasconcellos J.M., Latorre R.G. Wave resistance for high-speed catamarans. Ocean Engineering 31 (2004) 2253–2282
- [12] Md Shahjada Tarafdera, Kazuo Suzuki. Computation of wave-making resistance of a catamaran in deep water using a potential-based panel method. Ocean Engineering 34 (2007) 1892–1900.
- [13] Riccardo Broglia, Stefano Zaghi, Andrea Di Mascio. Numerical simulation of interference effects for a high-speed catamaran. J Mar Sci Technol (2011) 16:254–269./ DOI 10.1007/s00773-011-0132-3 [Численное моделирование интерференционного эффекта высокоскоростного катамарана. (Италия, 2011 г.) Режим доступа : <http://www/sciencedirect.com>, свободный.]
- [14] Volnovoe soprotivlenie dlya vysokoskorostnykh katamaranov : per. s angl. / G. Moras, D. Vaskonsellos, L. Latorre. [elektronnyy resurs]// Gosudarstvennyy universitet Rio-de-Zhaneiro, Braziliya; N'yu-Orleanskiy universitet, SShA, 2004. – Rezhim dostupa : <http://www/sciencedirect.com>, svobodnyy.
- [15] Lukina E.A. Analiz literatury po issledovaniyu minimal'nogo soprotivleniya bol'shegruznykh katamaranov vnutrennego plavaniya [elektronnyy resurs] // Trudy 15-go mezhhdunarodnogo nauchno-promyshlennogo foruma «Velikie reki-2013» (15-18 maya 2013 g.). Vypusk 2013. S.287-291. – Rezhim dostupa : <http://vf-reka-more.rf/2013/PDF/91.pdf>, svobodnyy.
- [16] Mizine I., Karafiath G., Queutey P., Visonneau M. Interference Phenomenon in Design of Trimaran Ship, FAST 2009, 2009.
- [17] Theoretical Manual ISIS-CFD v3.1 Equipe Modélisation Numérique, Laboratoire de Mécanique des Fluides, CNRS-UMR 6598, Ecole Centrale de Nantes, B.P. 92101, 44321 Nantes Cedex 3, France.
- [18] User Manual FINETTM/Marine v3.1, Documentation v3.1a NUMECA International, 187-189, Chaussee de la Hulpe 1170 Brussels, Belgium.
- [19] Visonneau M., Queutey P., Deng Gan Bo, Wackers J., Guilmineau E., Leroyer A., Mallol B. Computation of Free-Surface Viscous Flows around Self-Propelled Ships with the Help of Sliding Grids, COMPIT-2012, 2012.
- [20] Roux Y., Wackers J., Dorez L. Slamming computation on the multihull Groupama 3, Innovsail 2010.
- [21] Hochkirch K., Mallol B. On the Importance of Full-Scale CFD Simulations for Ships, 12th International Conference on Computer Applications and Information Technology in the Maritime Industries (COMPIT 2013) – Cortona (Italy) on April 15th -17th.

Статья поступила в редакцию 26.03.2019 г.

Раздел II

**Финансовые и учетно-аналитические
проблемы современной экономики**

Section II

***Financial and accounting-analytical
problems of the modern economy***

УДК 629.12.001.2: 656.66

Соловьева Виталия Геннадьевна, к.э.н., доцент кафедры бухгалтерского учета, анализа и финансов ФГБОУ ВО «ВГУВТ»,

e-mail: quality@vgavt-nn.ru.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Волжский государственный университет водного транспорта» (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»).

603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5

СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К ВНЕДРЕНИЮ ИННОВАЦИОННЫХ УПРАВЛЕНЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ

Ключевые слова: управление, инновации, инновационный менеджмент, интегрированная система менеджмента, система менеджмента качества, стандартизация, соответствие требованиям.

Рассматривается перспектива расширения конкурентных преимуществ предприятия на основе обеспечения эффективности и результативности его процессов. Показан инновационный подход к управлению путем интеграции различных систем менеджмента, учитывающих различные аспекты деятельности. Анализируется вопрос выбора основы для интеграции соответствующих подсистем. Представлено, что внедрение интегрированной системы менеджмента повышает эффективность управленческой деятельности организации. Исследуется данный инструмент совершенствования менеджмента на предприятиях отрасли водного транспорта, деятельность которых жестко регламентирована требованиями международных и национальных нормативно-правовых актов в различных областях.

Свидетельством конкурентных преимуществ предприятия является устойчивый рост эффективности его деятельности, основанный на внедрении инноваций [1].

Стабильность положительной динамики показателей эффективности и результативности характеризует уровень прогрессивности инновационного менеджмента как системы взаимосвязанных действий по достижению стратегических целей на основе использования возможностей по совершенствованию управления инновационными процессами предприятия. Тем не менее, зависимость конкурентоспособности от результатов деятельности, в том числе, напрямую не связанной с инновационной продукцией или услугами, не позволяет считать роль инновационного менеджмента определяющей в обеспечении конкурентных преимуществ. Общая оценка эффективности может быть дана только в отношении системы менеджмента предприятия в инновационной сфере деятельности. Это обусловлено не столько наличием в ее составе всех элементов инновационного менеджмента, сколько большей стратегической ориентацией данной системы ввиду отсроченности использования дохода от инновационной деятельности (рисунок 1). Таким образом, основное внимание следует сосредоточить на тех факторах, в т.ч. нововведениях в сфере управленческих технологий, которые обеспечивают востребованный рынком рост эффективности действующей системы менеджмента (далее – СМ).

Базой внедрения инновационных технологий в управление предприятием, в т.ч. предприятием водного транспорта, служит политика в области стандартизации, основанная на согласованных и прозрачных требованиях стандартов и являющаяся составной частью национальной инновационной политики как одного из компонентов мировой инновационной экосистемы. Документы по стандартизации наиболее точно определяют и специфическую сущность предмета инноваций, без четкого определения которого не представляется возможной системная оценка факторов влияния системы инновационного менеджмента предприятия (далее – СИМ) (таблица 1).

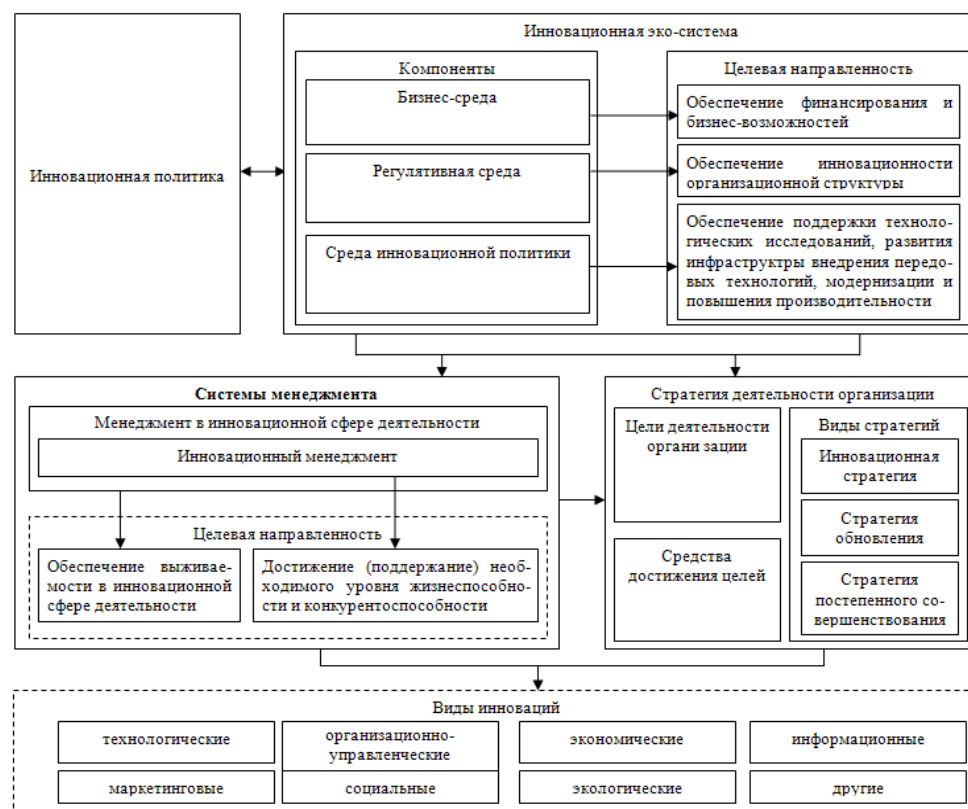


Рис. 1. Организационная схема системы внедрения инноваций

Например, отдельные нормативные документы трактуют инновацию (англ. innovation) как «внедренное новшество, обеспечивающее качественный рост эффективности процессов или продукции, востребованное рынком» [1].

Близким для практики менеджмента современных предприятий видится определение, предлагаемое Организацией экономического сотрудничества и развития, который рассматривает инновацию как «применение новой, значительно улучшенной продукции (материальных товаров и услуг), процессов, новых рыночных методов или новых организационных методов в бизнес-практике, организации рабочих мест или внешних отношений» [1].

Системный подход к инновационному менеджменту определяет потребность в структурировании его инструментальных средств. И здесь, использование информационно-коммуникационных технологий (далее - ИКТ) совершенно обоснованно признается одним из самых эффективных инструментов реализации инноваций, поскольку текущий момент общемирового технологического развития делает объективно необходимым повсеместное использование технических и программных средств вычислительной техники при проектировании и реализации любой системы, в том числе и СИМ.

Тем не менее, несмотря на огромное число очевидных преимуществ от использования ИКТ, оправданным будет отнесение их к чисто техническим инструментам информационной, технологической и эксплуатационной поддержки всех уровней и направлений целенаправленного воздействия менеджмента по обеспечению эффективности деятельности системы [1].

Таблица 1

Направления выявления факторов влияния в рамках СИМ

Элемент системы	Область формирования факторов влияния по отдельным этапам управления инновациями	
	Проектирование	Внедрение
Предмет инноваций	Продукция и услуги	
	-	Процессы
	Стратегия организации	
Субъект инноваций (человек)	Творческое приложение фантазии	Реализованная творческая идея
	Открытия	Проецирование определенного интеллектуального решения при получении нового знания
	Изобретения	
	Рационализация	
Темп внедрения инноваций	-	Радикальные изменения
	-	Постепенные изменения
Природа инноваций	Технологические инновации	
	Нетехнологические инновации	
	Комбинация технологических и нетехнологических инноваций	
Основные свойства инноваций	Новизна	
	Производственная применимость (экономическая обоснованность)	-
	Соответствие запросам потребителей	

Наибольшие же потенциальные возможности для системных улучшений по этапам создания, поддержания и развития инновационной активности предприятия и обеспечения его экономического роста видятся в совершенствовании механизмов менеджмента.

В этой связи и с целью обеспечения соответствия стратегии предприятия предъявляемым требованиям все большее внимание привлекает управленческая технология, основанная на интеграции сертифицированных систем менеджмента. Это не только увеличивает долю нематериальных активов предприятия и свидетельствует об эволюции бизнеса, но и является мощным инструментом развития инновационного потенциала общей СМ.

В перспективности данной концепции развития СМ убеждает и ужесточение конкурентной борьбы со стороны западных и отечественных предприятий, уже зарекомендовавших себя в области управления качеством, экологией и профессиональной безопасностью.

Таким образом, можно с уверенностью утверждать, что внедрение интегрированной системы менеджмента предприятия (далее – ИСМП) обеспечивающей конкурентоспособность предприятия во внешней среде, имеет ряд явных преимуществ для его внутреннего контекста и полностью отвечает требованиям мирового делового сообщества (таблица 2).

Таблица 2

Основные преимущества ИСМП

Объект влияния	Влияние внедрения ИСМП	
	результат	преимущество
Внутренняя среда организации		
Виды деятельности	Согласованность и структурированность	Более высокий уровень общей результативности от согласованных действий
	Оптимизация функциональности в рамках одной СМ	Минимизация функциональной разобщенности
Персонал	Вовлеченность персонала в улучшение деятельности	Высокая степень мотивированности персонала
Документация	Оптимизация объема документации	Минимизация и достаточность документации
Затраты	Уменьшение затрат в сравнении с суммарными затратами по нескольким СМ	Большая экономичность и эффективность по сравнению с независимым внедрением нескольких стандартов на СМ
Внешняя среда организации		
Конкуренты	Поддержка реализации стратегии организации в области конкурентной борьбы	Надежность защиты от конкурентов
		Приоритет над конкурирующими организациями при прочих равных условиях
Имидж	Усиление позиций на рынке путем усовершенствования работы над имиджем	Респектабельность, положительный имидж и высокий статус организации
Заинтересованные стороны (ЗС)	Выполнение всех требований ЗС в отношении управления качеством, охраной окружающей среды и охраной труда	Ускорение получения разрешений, лицензий и других разрешительных документов
	Рост доверия со стороны ЗС	Своевременность получения инвестиций и льготных кредитов
		Минимизация страховых процентных ставок

Тот факт, что при рассмотрении вопросов, касающихся ИСМП, особое место занимают аспекты, связанные со стандартизацией, обуславливает широкое распространение взгляда на них как на совокупность сертификатов соответствия требованиям международных стандартов (далее – МС), например, ISO 9000, ISO 14000, OHSAS 18000 (таблица 3).

Таблица 3

Базовые МС для внедрения ИСМП

МС	Подсистема СМ	Объект управления	Цель обеспечения соответствия требованиям (область потенциального улучшения)
Все отрасли экономики			
ИСО 9001	Система менеджмента качества (СМК) [2]	Качество менеджмента	Решение задач управления качеством
ИСО 14001	Система экологического менеджмента (СЭМ) [3]	Воздействие производства продукции на природу	Снижение уровня рисков ущерба экологии

МС	Подсистема СМ	Объект управления	Цель обеспечения соответствия требованиям (область потенциального улучшения)
OHSAS-18000	СМ профессиональной безопасности и здоровья (СМПБ) [4]	Персонал организации	Рост уровня производительного и безопасного труда персонала
ISO 26000	Система социальной ответственности [5]	Комфортность труда	Выполнение требований социальной среды существования
		Социальная защищенность	
		Реализация социальных гарантий	
		Благотворительность и поддержка общественных движений и этики ведения бизнеса	
ИСО 27000	Система управления информационной безопасностью (СУИБ) [6]	Информация	Обеспечение защиты конфиденциальной информации
ИСО 20252	Система исследования требований и удовлетворенности заинтересованных сторон (СИТУЗС) [7]	Спрос на продукцию	Обеспечение выпуска конкурентоспособной продукции
		Удовлетворенность потребителей	
Отдельные отрасли экономики			
ИСО 22000	СМ безопасности продуктов питания (СМБПП) [8]	Продукция предприятий пищевой промышленности	Гарантии безопасности продукции, чистоты и гигиены производства
ISO 13485	СМ в медицинской промышленности [9]	Медицинские изделия	Гарантии соответствия поставляемых медицинских изделий и связанного с ними обслуживания требованиям потребителя и применимым регулирующим требованиям

Однако, несмотря на все преимущества (включая снижение затрат) внедрение ИСМП является на данный момент выбором крупных организаций, имеющих значительную долю рынка и располагающих значительными ресурсами. Именно такие предприятия, как правило, нацелены на долгосрочную перспективу и их высшее руководство отдает себе отчет в исключительной важности оптимизации процессов, прозрачности системы управления, повышении надежности и эффективности производства.

Тем не менее, обострение экологической ситуации, вопросы охраны труда и прочие социальные проблемы, а также внимание, уделяемое этим аспектам правительством РФ, заставляют менеджмент промышленных предприятий реального сектора экономики уделять им больше внимания и принимать стратегические решения, учитывая их актуальность и злободневность.

Ввиду этого, предприятия водного транспорта также не должны оставаться в стороне от участия в решении данного спектра проблем и всеми возможными способами содействовать снижению рисков, обусловленных действием подобных негативных факторов [11]. Одним из наиболее прогрессивных путей управления рисками в речном порту может стать внедрение ИСМП.

С другой стороны, требования к эффективности деятельности по управлению орга-

низацией ставят вопрос о выборе исходной модели системы управления. В первую очередь, внимание фокусируется на стандарте PAS 99, содержащем спецификацию требований к общей СМ как базовой структуре для интеграции [12]. Целесообразность его использования оправдана для организаций, внедривших или собирающихся внедрить несколько СМ, поскольку зачастую все они имеют некоторые общие элементы, менеджмент которых может осуществляться интегрированным образом. Это позволяет признать корректным их объединение в рамках общей СМ путем интеграции общих требований, установленных стандартами на СМ или техническими условиями.

Отдельные исследователи отмечают, что в PAS 99 дается прозрачный намек на то, какой должна быть модель ИСМП, и обращают внимание не только на то, что сам стандарт моделью разработки СМ не является [13], но отмечают необходимость понимания того факта, что PAS 99 не имеет статус сертификационного стандарта прямого действия (соответствие требованиям данного стандарта не означает соответствия требованиям любого из упомянутых выше стандартов ISO/OHSAS).

Поэтому с учетом всех возможностей, представляемых PAS 99, думается, что взгляд на ИСМП должен быть несколько шире и выходить за рамки вопроса поиска стандарта. Собственно, имеет смысл задаться целью не столько выбора стандарта как основы для интеграции, сколько ставить задачу выработки концепции интеграции, которая ориентирована на стратегический путь развития организации, и уже с этой точки зрения подходить к выбору платформы для интеграции.

Данный подход позволит снизить потенциальные риски, возникающие ввиду невозможности отождествления ИСМП с СМ организации, охватывающей все виды ее деятельности, например, вопросы финансового или инвестиционного менеджмента. Некоторая условность при обобщении данных понятий связана с возникающей в этом случае необходимостью стандартизации всех областей общего менеджмента, что может оказаться неопределенно длительным процессом, который сможет завершиться после разработки стандартов на все области, охватываемые СМ.

Имея целью рост качества управления, целесообразнее проводить параллель между понятиями системы общего менеджмента и СМК, которая не должна рассматриваться в качестве надстройки или одной из подсистем СМ, а может проектироваться как комплекс подсистем экологического менеджмента, менеджмента безопасности и других видов деятельности, реализуемых при обеспечении требований соответствующих стандартов, что, по существу, позволяет рассматривать ее в качестве платформы для проектирования ИСМП.

Исследования показывают, что в настоящее время большинство хозяйствующих предприятий и организаций имеют СМК, сертифицированную в соответствии с требованиями ИСО серии 9000, которая при условии прогрессивности менеджмента по существу является их СМ, поэтому именинно СМК и может стать той моделью, которая должна использоваться в качестве базы для интеграции различных СМ организации. В пользу этого довода могут быть приведены: наличие в ИСО 9001 общих элементов с другими СМ, и цикл PDCA, лежащий в основе системы, и всеобъемлющий охват видов деятельности организации системой менеджмента качества, и, наконец, общность принципов, лежащих в основе формирования элементов СМК (таблица 4).

Использование стандартов ИСО в качестве основы внедрения ИСМ определяется не только огромным успехом данного семейства стандартов в области формирования мировоззрения и продвижения идеологии качества. Следствием этой невероятной общемировой популярности стало превращение их в единую платформу и язык в сфере качества, инструмент, способствующий упрощению процедур взаимодействия, а также средство определения базового уровня уверенности в том, что предприятия и организации предлагают соответствующую требованиям продукцию. Можно с уверенностью говорить о том, что эти стандарты создали базу для разработки других стандартов на СМ: в сфере экологии, охраны здоровья и безопасности, информационной безопасности и энергетики.

Подход с позиции менеджмента качества широко применяется в таких специализированных отраслях, как авиация, телекоммуникации, образование, местное управление и здравоохранение и создает возможности для инновационного совершенствования менеджмента их предприятий.

Таблица 4

Наиболее общие подходы к выбору основы для внедрения ИСМ

Функционирование ИСМП		Принцип	ИСО 9001:2015	Бизнес-преимущества
область	параметр			
1. Проектирование процедур	Использование PDCA в качестве руководства для всех СМ	Системный подход	0.3.2	Повышение предсказуемости и управляемости бизнес-процессов
	Планирование		6	
	Идентификация законодательных и других требований	Ориентация на потребителя	8.2	Обеспечение уверенности в том, что требования потребителей, а также применимые требования выявлены, осознаны и выполняются
2. Управление процедурами	Применение процессного подхода	Процессный подход	0.3	Непосредственное отражение реальных процессов
				Идентификация областей управления для обеспечения эффективности и результативности деятельности
	Политика СМ	Вовлечение работников	5.2	Рост уверенности в обеспечении соответствия требованиям
	Цели		6.2	
	Менеджмент ресурсов	Лидерство руководителя	7.1	Обеспечение результативности СМ
	Обязанности, ответственность и полномочия в организации	Менеджмент взаимоотношений	5.3	Обеспечение соответствия СМ требованиям, сохранение целостности СМ
3. Анализ и оценка процедур	Мониторинг, измерения, анализ и оценка		9.1	Постоянное повышение пригодности, адекватности и результативности СМ
			9.2	
	Анализ со стороны руководства	Лидерство руководителя	9.3	
4. Улучшение процедур	Несоответствия и корректирующие действия	Постоянное улучшение	10.2	Обеспечение соответствия корректирующих действий степени серьезности выявленных несоответствий
	Улучшение		10.3	Выявление потребности и/или возможности как составной части постоянного улучшения

Примером ИСМ предприятия водного транспорта (например, речного порта), может служить СМК, включающая подсистему управления безопасностью судов речного порта (далее – СУБ), регламентирующую деятельность работников порта и членов экипажей судов порта по обеспечению безопасности судоходства и предотвращения загрязнения окружающей среды, а также в случае возникновения связанных с судами опасностей и аварийных ситуаций, и отвечающую требованиям Кодекса внутреннего водного транспорта Российской Федерации [14]. Другим примером интеграции СМ может служить предприятие водного транспорта, деятельность которого регламентируется международными нормативными документами, в частности МК ПДНВ 1978 года [15], одним из требований которой является наличие системы стандартов качества как средства демонстрации способности предприятия обеспечивать потребителей продукцией и услугами в соответствии с их требованиями, а также требованиями международных и национальных нормативных документов в областях управления качеством деятельности членов экипажей морских судов (ЧЭМС).

Внедрение инноваций, а также преобразование предприятия в самообучающуюся систему является необходимыми условиями реализации стратегической цели повышения прибыльности предприятия и роста его общественно-полезной социальной ценности, а текущая мировая тенденция увеличения роли знаний в корпоративном менеджменте обеспечивает гибкость по отношению к нестабильности окружающей среды и эффективность при управлении рисками. В этих условиях именно совокупность МС ИСО серии 9000 должна выступать в качестве организационно-методической базы для внедрения и обеспечения функционирования ИСМП. Эта точка зрения обуславливается соответствием принципов общего менеджмента понятиям и принципам, сформулированным в этих стандартах, и подкрепляется использованием процессного подхода, непосредственно отражающего реальные процессы, осуществляемые в современном бизнесе (в противовес опосредованному стилю, принятому в функциональном подходе). Кроме того, не последнюю роль в формировании этого подхода сыграла первичность ввода в действие стандартов ИСО серии 9000, во многом предопределившая методологию построения других международных стандартов на СМ.

А ввиду того, что модель процессов организации является отражением самой организации, что в широком смысле делает предметом ИСО 9001 качество системы управления ею, становится закономерным рост результативности организации путем внедрения ИСМП на платформе СМК.

Список литературы:

- [1] ГОСТ Р 55901–2013. Национальный стандарт Российской Федерации. Руководящие указания по обоснованию и разработке стандартов на системы менеджмента для инновационных сфер деятельности (утв. и введен в действие Приказом Росстандарта от 17.12.2013 N 2269-ст).
- [2] ISO 9001:2015 Quality management systems – Requirements.
- [3] ISO 14001:2015 Environmental management systems – Requirements with guidance for use.
- [4] ГОСТ Р 54934–2012/OHSAS 18001:2007. Национальный стандарт Российской Федерации. Системы менеджмента безопасности труда и охраны здоровья. Требования (утв. и введен в действие Приказом Росстандарта от 06.07.2012 N 154-ст).
- [5] ISO 26000:2010 Guidance on social responsibility.
- [6] ISO/IEC 27000:2018 Information technology – Security techniques – Information security management systems – Overview and vocabulary.
- [7] ISO 20252:2019 Market, opinion and social research, including insights and data analytics – Vocabulary and service requirements.
- [8] ISO 22000:2018 Food safety management systems – Requirements for any organization in the food chain.
- [9] ISO 13485:2016 Medical devices – Quality management systems – Requirements for regulatory purposes.

- [10] ISO 9004:2018 Quality management – Quality of an organization – Guidance to achieve sustained success.
- [11] ISO 31000:2018 Risk management – Guidelines.
- [12] PAS 99:2012 Specification of common management system requirements as a framework for integration.
- [13] Василевская С.В. Время собирать камни...[Электронный ресурс] //Методы менеджмента качества. – 2010. – № 6. – с. 19–24. – Режим доступа: http://www.qbcentre.spb.ru/pbl/SVasilevskaya_MMK_2010-06.pdf.
- [14] Федеральный закон от 07.03.2001 № 24–ФЗ «Кодекс внутреннего водного транспорта Российской Федерации».
- [15] Международная конвенция о подготовке и дипломировании моряков и несение вахты (ПДНВ). – Международная морская организация, Лондон, 2013. – 413 с.

SYSTEM APPROACH TO THE IMPLEMENTATION OF INNOVATIVE MANAGEMENT TECHNOLOGIES

*Solovyeva Vitalya G., Candidate of Economic Sciences, assistant professor
of the Department of Accounting, Analysis and Finance,
Volga State University of Water Transport
5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603951*

Keywords: management, innovation, innovation management, integrated management system, quality management system, standardization, requirement compliance.

Perceptively, the expanding of the enterprise competitive advantages on the basis of ensuring the efficiency and effectiveness of its processes, an innovative approach to management may involve the integration of various management systems that take into account various aspects of activity. This makes it extremely important to choose the basis for the integration of the relevant subsystems and, thus, is of fundamental importance within the framework of the implementation strategy of the integrated management system. This management improvement tool can also be used at the enterprises of the water transport industry. Their activities are strictly regulated by the requirements of international and national regulatory acts in various fields, for example, in the field of environmental management or safety management. At the same time, the result of the improvement on the basis of the integrated management system introduction is the increase in the efficiency of the organization's management activities.

References:

- [1] GOST R 55901–2013. Natsional'nyy standart Rossiyskoy Federatsii. Rukovodyashchie ukazaniya po obosnovaniyu i razrabotke standartov na sistemy menedzhmenta dlya innovatsionnykh sfer deyatel'nosti (utv. i vveden v deystvie Prikazom Rosstandarta ot 17.12.2013 N 2269-st).
- [2] ISO 9001:2015 Quality management systems – Requirements.
- [3] ISO 14001:2015 Environmental management systems – Requirements with guidance for use.
- [4] GOST R 54934–2012/OHSAS 18001:2007. Natsional'nyy standart Rossiyskoy Federatsii. Sistemy menedzhmenta bezopasnosti truda i okhrany zdorov'ya. Trebovaniya (utv. i vveden v deystvie Prikazom Rosstandarta ot 06.07.2012 N 154-st).
- [5] ISO 26000:2010 Guidance on social responsibility.
- [6] ISO/IEC 27000:2018 Information technology – Security techniques – Information security management systems – Overview and vocabulary.
- [7] ISO 20252:2019 Market, opinion and social research, including insights and data analytics – Vocabulary and service requirements.
- [8] ISO 22000:2018 Food safety management systems – Requirements for any organization in the food chain.
- [9] ISO 13485:2016 Medical devices – Quality management systems – Requirements for regulatory purposes.
- [10] ISO 9004:2018 Quality management – Quality of an organization – Guidance to achieve sustained success.

- [11] ISO 31000:2018 Risk management – Guidelines.
- [12] PAS 99:2012 Specification of common management system requirements as a framework for integration.
- [13] Vasilevskaya S.V. Vremya sobirat' kamni... [Elektronnyy resurs] //Metody menedzhmenta kachestva. – 2010. – № 6. – s. 19–24. – Rezhim dostupa: http://www.qbcentre.spb.ru/pbl/SVasilevskaya_MMK_2010-06.pdf.
- [14] Federal'nyy zakon ot 07.03.2001 № 24–FZ «Kodeks vnutrennego vodnogo transporta Rossiyskoy Federatsii».
- [15] Mezhdunarodnaya konventsiya o podgotovke i diplomirovanii moryakov i nesenie vakhty (PDNV). – Mezhdunarodnaya morskaya organizatsiya, London, 2013. – 413 s.

Статья поступила в редакцию 24.06.2019 г.

Раздел III

**Экономика, логистика, управление
на транспорте**



Section III

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

УДК 656.073.9

Кегенбеков Жандос Кадырханович, к.т.н., доцент, декан факультета
инженерно-экономических наук,
Казахстанско-Немецкий университет (КНУ),
e-mail: kegenbekov@dki.kz

Керимкулова Дина Айдаровна, магистрант факультета
инженерно-экономических наук,
Казахстанско-Немецкий университет (КНУ),
e-mail: dina.aidarovna7@gmail.com
050010, г. Алматы, ул. Пушкина, 111

АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ СЕТИ КАЗАХСТАНА

Ключевые слова: железные дороги, железнодорожный транспорт, международные железнодорожные коридоры, железнодорожная сеть Казахстана, конфигурация железнодорожной сети.

Аннотация. Статья посвящена анализу этапов формирования современной железнодорожной сети Казахстана, а также ее текущему состоянию, конфигурации и положению относительно международных коридоров. Теоретическую и методологическую основу работы составили труды казахстанских и зарубежных специалистов в области транспорта, транспортных перевозок и экономики, посвященные вопросам железнодорожного транспорта и железнодорожной инфраструктуры Казахстана, а также ее включенность в международные транспортные коридоры. В данной работе использовались статистические, картографические и справочные материалы Комитета по статистике Министерства национальной экономики Республики Казахстан, годовых отчетов АО «НК «КТЖ», государственных программ развития транспорта, посланий президента Республики Казахстан. Научно-теоретические положения и выводы, сформулированные в статье, могут быть основой для решения практических задач при определении перспективных направлений развития железнодорожной сети Республики Казахстан. Предложения по спрямлению маршрутов железнодорожных путей могут быть использованы в дальнейших научных исследованиях.

Введение

Железнодорожный транспорт играет в экономике Казахстана важнейшую роль: обеспечивает экономические связи между регионами страны, стоит на первом месте по грузообороту и пассажирообороту, а также играет огромную роль в развитии Казахстана в качестве транзитного государства. Поэтому качество железнодорожной инфраструктуры и ее удобная конфигурация для Казахстана стоят на первом месте. В этих целях были предприняты меры по совершенствованию сети железных дорог.

Целью статьи является анализ истории формирования железнодорожной транспортной инфраструктуры Республики Казахстан и развития железнодорожной сети на современном этапе. Исходя из цели работы, были поставлены задачи: поэтапно рассмотреть историю становления и развития инфраструктуры железнодорожного комплекса и железнодорожной сети Казахстана; проанализировать современную конфигурацию железнодорожной сети Казахстана и ее положение относительно международных коридоров.

В ходе работы применялись методы анализа, сравнения, статистической обработки данных. Данные методы позволили выявить качественные и количественные изменения в области железнодорожного транспорта Казахстана.

1. История становления и развития инфраструктуры железнодорожного транспорта и железнодорожной сети Казахстана условно делится на три этапа строительства и два этапа электрификации железнодорожных путей.

1.1. Первый этап – с начала 20 века до 1922 года

Железнодорожную сеть нашего государства можно считать кровеносной системой, соединяющей все регионы и стратегически важные объекты между собой и другими государствами, обеспечивая стабильное и бесперебойное сообщение в экономических, социальных интересах [1].

Началом строительства первых железных дорог Казахстана считается строительство узколинейной железнодорожной линии Покровская Слобода-Уральск в 1893–1894 гг. Ее общая протяженность в 19 веке составляла 369 км, по территории РК – 113 км. Примерно в это же время было построено 267 км железных дорог на пограничных линиях Казахстана. 190 км дорог были включены в Транссибирскую магистраль и 77 км в Урбах – Астрахань. Данные приграничные дороги проходили по северу и западу Казахстана. Данные дороги не обладали большой значимостью в связи с приграничным расположением. Однако началом истории образования железных дорог нашей родины является 1904 год, известный запуском одной из крупнейших линий – Среднеазиатской дороги Оренбург – Ташкент. Протяженность данной магистрали составляла 1668 км, она соединяла Россию и Узбекистан. В комбинации с путем Красноводск – Самарканд – Ташкент/Андижан данная магистраль снабдила Среднюю Азию и Россию прочной транспортной связью [2].

С момента строительства Среднеазиатского пути социально-экономическое становление Казахстана было сопряжено с прокладыванием путей и возведением прилегающей инфраструктуры.

Благодаря сооружению железных путей практически все области страны были соединены, был налажен товарооборот с соседними государствами. В период с 1914 по 1917 года были проложены часть будущей Туркестано-Сибирской магистрали – Семиреченская дорога Арысь Пишпек, дорога Челябинск – Троицк – Кустанай (166 км через Казахстан), Алтайская железная дорога (122 км через Казахстан). Также до 1918 года действовала узколинейная дорога Экибастуз – Ермак длиной в 117 км. В 1918 году суммарная длина путей составляла около 2,6 тысячи км или около 19% существующей сети.

1.2. Второй этап – с 1922 года по 1945 год

В период Советского союза был реализован существенный объем строительства железнодорожных путей. За период с 1918 по 1945 год было проложено более 40% современной транспортной сети Казахстана или около 5,6 тыс. км. Построенная за 1920–1922 гг. линия Петропавловск – Кокчетав, была удлинена до города Караганда через станции Курорт Боровое и Акмолинск (1926–1931 гг.). В этот же период были построены линии Кулунда – Павлодар (1924 г.), Атырау – Доссор (1926 г.). Последняя благоприятствовала формированию нефтепромыслов Эмбы. Знаменательным событием в истории становления транспортного комплекса Казахстана стало прокладывание Туркестано-Сибирской магистрали (1927–1930 гг.). Ее общая длина составила 1444 км. Турксиб, соединив Центральную Азию и Сибирь, благоприятствовал расцвету экономики страны, а также освоению ранее нетронутых земель. На его основном протяжении построены магистрали Кулунда – Тобол (0,7 тыс. км), Петропавловск – Чу (1,1 тыс. км), Аксарайская – Никельтау (0,7 тыс. км). В 30-е годы были проложены линии Акмолинск – Караганда, Караганда Балхаш (490 км), имеющие большую значимость для прогресса индустрии центральной области страны, линия Чимкент – Ленгер – для южной области. Следующей, значимой для развития рудной промышленности востока, стала линия Локоть – Защита, далее протянувшаяся до Зырянска и Лениногорска (1930 г.). В 1936–1939 гг. был построен жизненно важный участок Уральск – Илецк, соединив Центральную Россию и Казахстан. С началом Великой

Отечественной Войны данные пути доказали огромное значение в достижении общей победы. Так линия Гурьев – Кандагач – Орск связала нефтепромыслы Эмбы с Уралом и усовершенствовала связь между областями России (1936–1944). Участок Акмолинск – Карталы (1939–1943 гг.) предоставляла результативную поставку карагандинского топлива на Южный Урал. В период войны участки дорог Коксу – Текели – Талдыкорган, Атасу – Каражал вступили в эксплуатацию. Так протяженность железнодорожный путей Казахстана доросла до отметки 10 тысяч километров. За данный период была обеспечена надежная транспортная связь с угольными месторождениями Караганды, центрами цветной металлургии (Жезказган, Балхаш, Усть – Каменогорск, Лениногорск и др.).

1.3. Третий этап – с 1946 года по 1990 год

Формирование существующей сети железных дорог с окончанием строительства всех магистральных тупиковых линий, обеспечивающих железнодорожную связь с наиболее важными промышленными центрами страны, в основном было закончено в промежутке 1946–1990 гг.

Послевоенное время также характеризуется продлением прокладывания железных путей. В 1950 г. Транссибирская и Туркестано-Сибирская магистрали были соединены с участком Моинты – Шу (440 км). Так сформировалась меридионально направленная линия, проходящая через Петропавловск, Кокчетав, Акмолинск, Караганда, Шу. Следующим немаловажным участком Южно-Сибирской магистрали являлся путь Акмолинск – Павлодар (546 км). Его строительство (1953 г.) и дальнейшее использование способствовало расцвету угольного бассейна Экибастуз и прилегающих районов (в период с 1953 по 1956 гг. объем перевозок на севере страны возрос в 4 раза). С началом освоения целины в 50-х гг. начали интенсивно прокладываться железные пути на севере и центре страны. Так, за 1955–1961 гг. проложен путь Есиль – Аркалык (224 км), 1959 г. – Кустанай – Тобол, 1960 г. – Тобол – Джетыгара. За период освоения целины плотность железнодорожных путей возросла в 2 раза.

В 1958 г. была сформирована широкомасштабная Казахская железная дорога (11 тыс. км). Данная дорога связывала пути, лежащие в меридиональном и широтном направлении. Благодаря этому были связаны Сибирь, Поволжье, Урал и Средняя Азия. Для развития пустынного района запада в 60-х гг. проложены пути Макат – Мангышлак, Мангышлак – Узень (900 км). Благодаря эффективному использованию участка Гурьев – Астрахань возобновились связи между Россией и Казахстаном. В конце 70-х гг. на базе Казахской дороги сформировались Западно-Казахстанский, Алматинский, Целинный пути. В этот период было налажено железнодорожное сообщение с регионами России и Китайской Народной Республикой (КНР). Этому уделялось пристальное внимание. Так, в 1959 г. была проложена линия Актогай – Дружба. В период 1956–1960 гг. обе стороны прокладывали пути для соединения дорог соседних стран. В 1990 году железные пути состыковались и сформировали пограничный переход, который соединил станции Дружба и Алашанькоу. С началом продвижения грузовых составов начал свою работу Северный коридор Трансазиатской магистрали и перегрузочные мощности приграничной станции Дружба. Следующие важные события происходили с конца 1991 года.

1.4. Электрификация железных дорог Казахстана

Электрификация железнодорожных путей является неотъемлемой ступенью совершенствования технических показателей железнодорожного транспорта. Благодаря электрификации увеличивается провозная способность, производительность труда, безопасность локомотивов, а также снижается себестоимость перевозок. Электрификация также смягчает воздействие транспорта на окружающую среду и гарантирует более высокую надежность работы в суровых климатических условиях. Центральным Комитетом Коммунистической партии Советского Союза было принято решение «О Генеральном плане электрификации железных дорог», рассчитанном на 15 лет с 1956

по 1970 год. Согласно данному документу планировалось электрифицировать около 40 тыс. км основных путей[3].

1.4.1. *Электрификация в период 60–70-х гг.* Первой электрифицированной линией является путь ИсильКуль – Макушино (272 км, 1961 г.). Окончание работ на данном участке стало последним этапом электрификации Транссибирской магистрали. За период 60–70-х гг. прошлого века были электрифицированы пути: Караганда – Целиноград (1963–1964 гг., 270 км); Целиноград – Атбасар (1966 г., 229 км); три участка Казахской железной дороги (1967 г., 480 км); Атбасар – Есиль (1968 г., 148 км); Тобол – Есиль (1969 г., 288 км). Огромные экономические центры Советского союза угольный бассейн Караганды и металлургическая база Урал были связаны благодаря электрификации железнодорожных путей. В два раза увеличился объем перевозок, ускорился оборот подвижного состава, безопасность движения составов стал на уровень выше, кроме того улучшились условия труда работников.

Помимо главного назначения, электрификация также косвенно повлияла на обеспечение электроэнергией прилегающих совхозов. Последующая электрификация железных дорог Казахстана была прервана на десятилетие, она возобновилась с появлением трех самостоятельных управлений железными дорогами.

1.4.2. *Электрификация с конца 70-х до конца 80-х гг.* В связи с усиленным развитием угольного бассейна Экибастуз (1953 г.), вызванным вводом в непрерывное использование линии Целиноград – Экибастуз – Павлодар, открылась дорога местного угля на электростанции Урала, Сибири, Казахстана. Рост добычи и спроса стал причиной улучшения пропускной способности данного участка в начале 60-х гг. Однако к началу 70-х гг. данных изменений стало недостаточно, строительство второй линии от Целинограда до Павлодара не смогло обеспечить необходимый объем вывозимого угля. Так, с 1977 года начался второй этап электрификации железных дорог. Были электрифицированы участки: Целиноград – Ерментау (1979 г., 147 км); Целиноград – Аккуль (1982 г.); доведена электротяга до станций Боровое (1983 г.), Кокчетав (1984 г.), Новоишимская, Пресногорьевская. Благодаря электрификации данных участков открылся путь с большой пропускной способностью для Экибастузского угля на Урал (932 км), вес поездов возрос до 9 тыс. тонн (максимум – 30 тыс. тонн).

Электрификация линии Караганда – Моинты (1980–1983 гг) упростила транспортировку Карагандинского и Экибастузского угля, однако вопрос пропуска транзитного груза по направлению Тобол – Целиноград – Караганда – Чу – Арысь – Ташкент оставался нерешенным. Так, в период 1984–198 гг. проводилась деятельность на линиях Моинты – Сарышаган, Сарышаган – Чиганак, Чиганак – Чу (450 км). Подобные работы проводились на линии Ташкент – Ченгельды – Арысь (1985–1986 гг), Арысь – Чу (1989 г.). До распада Советского Союза были электрифицированы участки Арысь – Чимкент – Джамбул (350 км). Последующие работы электрификации до Алма-Аты были проведены после провозглашения независимости Казахстана.

Железнодорожные линии, построенные в 20 веке, особенно в период Великой Отечественной войны, сыграли большую роль в объединении производственных мощностей и источников сырья, затем в послевоенный период, период освоения целины обеспечили продуманную национальную логистику. Таким образом, железные дороги практически обеспечили становление и развитие хозяйства страны в плане транспортной логистики. После распада Советского Союза в постсоветских республиках начались системные реформы, предусматривающие переход хозяйства к рыночной экономике. Так в 1997 году начались изменения в этой отрасли. Республиканской государственное предприятие «Қазақстан темір жолы» было создано в 1997 году Постановлением Правительства РК №129 «О реорганизации предприятий железных дорог РК». Объединились 3 государственных предприятия: Управление Алматинской железной дороги, Целинной железной дороги и Западно-Казахстанской железной дороги. Конечным результатом этого объединения являлось улучшение структуры регулирования перевозочным процессом и упразднение избыточных подразделений, т.е.

управление железнодорожной отраслью начало производиться на основе научного понимания транспортной логистики.

2. Современная конфигурация железнодорожной сети Казахстана и ее положение относительно международных коридоров

Железнодорожный транспорт на сегодняшний день стоит на втором месте по грузо – и пассажирообороту после морского в мире и на первом месте в Казахстане. На сегодняшний день около 70% грузооборота в республике приходится на железнодорожный транспорт. Если учитывать те факты, что Казахстан не имеет выхода к океану, располагает огромной площадью, этот вид транспорта будет оставаться основным в грузовых перевозках на большие расстояния и в пассажирских перевозках на короткие расстояния [4].

После провозглашения независимости Республики Казахстан в 1991 году были построены новые железнодорожные линии, такие как: «Аксу – Дегелен», «Хромтау – Алтынсарин», «Шар – Усть-Каменогорск», «Узень – госграница с Туркменистаном», «Жетыген – Коргас». Участки «Аксу – Дегелен», «Хромтау Алтынсарин» соединили север страны с востоком и западом соответственно. Строительство участка «Шар – Усть-Каменогорск», начатое в 2005 году и завершенное в 2008 году, соединила Восточный Казахстан с Туркестано-Сибирской магистралью. До строительства этого участка были трудности и неудобства с сообщением с другими областями государства, так как для того, чтобы добраться по железным путям до конечного пункта приходилось дважды пересекать казахстанско-российскую границу в станции Локоть. После окончания прокладки участка «Шар – Усть-Каменогорск» этот вопрос был решен. С 2009 по 2011 гг. строились 2 объекта – «Узень – госграница с Туркменистаном» и «Жетыген – Коргас». Этот проект был реализован между Казахстаном, Узбекистаном, Ираном. Протяженность линии на казахстанской земле – 146 км. В рамках программы «Нурлы Жол» и «Транспортной стратегии до 2015 и до 2020 годов» были реализованы такие проекты как: «Узень – Берекет – Горган», «Жезказган – Бейнеу», «Боржакты – Ерсай», «Алматы – Шу», «Хоргос-Восточные ворота», закончено строительство паромного комплекса в порту «Курык». Итак, за период с 1998 года по 2016 год построено более 2,5 тыс. км новых железнодорожных линий и сформирована оптимальная конфигурация железнодорожной сети [5].

По эксплуатационной длине железных дорог РК занимает 3 место в СНГ после Российской Федерации и Украины. На сегодняшний день эксплуатационная протяженность железных дорог составляет 16 104 км (включая дороги других стран на территории РК и дороги Казахстана, проходящие по территории других государств); 15529 км (без учета путей РК, проходящих по территории других государств, и путей других государств, проходящих по территории Казахстана) [5]. Общая протяженность железнодорожной сети РК составляет – 16 104 км, из них 4900,3 км – двухколейные и многоколейные пути (33,7%), 4217 км – электрифицированные пути (29%) (Таблица 1) [6]. Анализируя протяженность эксплуатационных железных дорог с 2011 по 2017 годы, можно сделать вывод, что протяженность железнодорожных путей Казахстана увеличилась почти на 1700 км. Однако, если рассматривать прирост по отдельным областям, наблюдается увеличение только в некоторых регионах. На первом месте – Карагандинская область, прирост – 527 км, за 2017 год было проложено 395 км железных путей в Актюбинской области, 171 км в Мангистауской области. В Алматинской области прирост составил 302 км, в Кызылординской области – 116 км. Прирост протяженности ЖД линий именно в этих регионах объясняется строительством железных дорог в данный отрезок времени, соединяющих отдаленные станции.

При большой протяженности сети железных дорог она неравномерно распределена по территории страны. Густота железнодорожных путей Казахстана на конец 2016 года составила 5,7 км на 1000 кв. км территории (+3.6% к 2015 году). По отдельным регионам плотность колеблется в пределах 4,2–7,9 км/ 1000 кв. км. Наименьшая

плотность сети в Западном, Центральном регионах, наибольшая – в Северном и Южном [7].

Таблица 1

**Эксплуатационная длина железнодорожных путей общего пользования
(включая дороги других стран на территории Казахстана и
дороги Казахстана, проходящие по территории других государств), км**

Год	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Республика Казахстан	14 892	15 333	15 341	15 341	15 341	16 104	16,614
Акмолинская	1 559	1 559	1 559	1 559	1 559	1 559	1559
Актюбинская	1 444	1 444	1 444	1 444	1 444	1 499	1839
Алматинская	1 099	1 394	1 402	1 402	1 402	1 401	1401
Атырауская	742	742	742	742	742	742	742
Западно-Казахстанская	431	431	431	431	431	431	431
Жамбылская	1 103	1 104	1 104	1 104	1 104	1 104	1104
Карагандинская	1 940	1 940	1 940	1 940	1 940	2 467	2467
Костанайская	1 271	1 271	1 271	1 271	1 271	1 336	1336
Кызылординская	755	755	755	755	755	871	871
Мангистауская	785	926	926	926	926	926	1097
Южно-Казахстанская	552	552	552	552	552	552	552
Павлодарская	925	925	925	925	925	925	925
Северо-Казахстанская	807	807	807	807	807	807	807
Восточно-Казахстанская	1 206	1 209	1 209	1 209	1 209	1 209	1209
Дороги РК на территории других стран	275	275	275	275	275	275	275

Источник: Официальный сайт Комитета по статистике Министерства национальной экономики Республики Казахстан stat.gov.kz [6]

По плотности железнодорожной сети Казахстан уступает в 1,5-3 раза таким странам, как Вьетнам и Индия, в десятки раз – странам Европы. Низкая плотность сети (в частности, наличие тупиковых и недостающее количество спрямляющих линий) в прошлом приводило к увеличению транспортировки грузов в межрегиональном сообщении и к росту транспортных расходов. Это было характерно для экономических связей Центрального и Северного региона с Западным. Однако с начала 2000-х годов по настоящее время были проложены железнодорожные пути, соединившие отдаленные районы страны.

Отрезки Аркалык – Шубарколь (Карагандинская область), Жезказган Саксаульская (Карагандинская и Актюбинская области), Шалкар – Бейнеу (Актюбинская и Мангистауская области), соединяющиеся географически, открывают перспективы товарообмена, но наиболее важное расширяют экспортный потенциал страны. В Алматинской области благодаря строительству линии «Коргас – Жетыген» значительно сократился путь перевозки грузов. На территории Мангистауской области также сократился путь вследствие прокладывания пути «Узень – Госграница с Туркменистаном». Строительство линий именно в этих областях объясняется их высоким транзитным потенциалом на основе реализации продуманной транспортно-логистической стратегии (Рисунок 1).

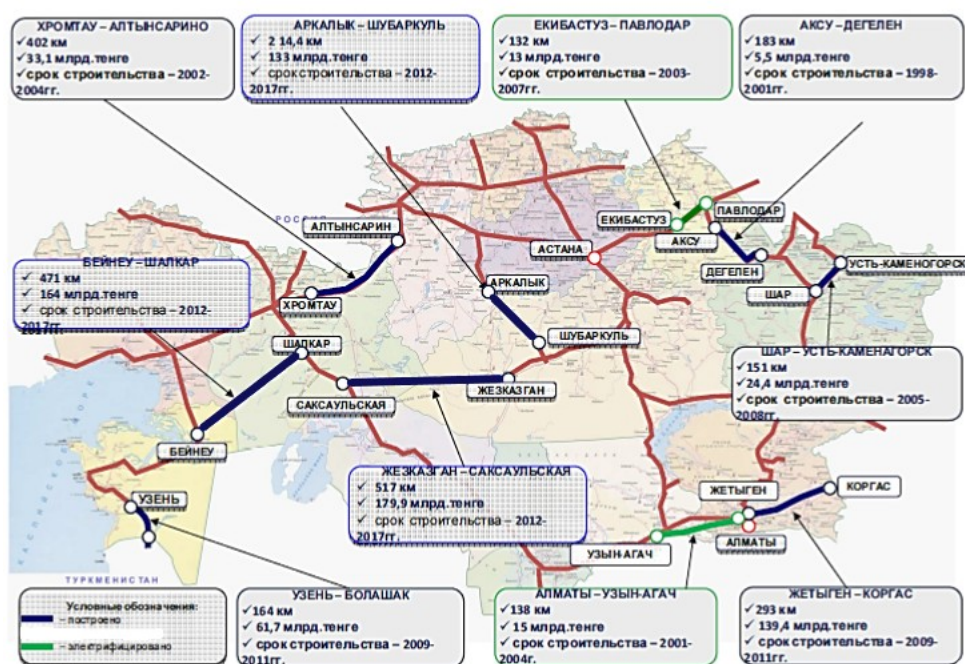


Рис. 1. Развитие сети железных дорог [8]

При рассмотрении структуры перевозок железнодорожным транспортом выявлены такие цифры: 59% – перевозки во внутреннем сообщении, 30% экспортные поставки, и менее 10% – импортные и транзитные перевозки. Из анализа данных показателей следует вывод: транзитный потенциал казахстанской магистральной сети железных дорог реализуется на низком уровне. Это объясняется высоким износом техники и подвижного состава Республики, невысоким качеством ремонта. Износ составляет 60%. Для сравнения – в Российской Федерации эта цифра составляет 58%. Кроме того, следует учитывать человеческий фактор, а именно уровень квалификации специалистов этой отрасли, в Казахстане данный показатель низкий.

2.2. Железнодорожные транспортные коридоры

По территории нашего государства на базе уже имеющейся транспортной инфраструктуры протягиваются железнодорожные транспортные коридоры – такие, как Северный, Центральный и Южный коридоры Трансазиатской железной дороги, TraCECA (англ. Transport Corridor Europe-Caucasus-Asia) и Север-Юг. Ввод в эксплуатацию в 1992 году пограничного перехода Достык – Алашанькоу, соединившего сеть железных дорог Китая и Казахстана, создал реальные возможности для формирования новых направлений Трансазиатской железной дороги через территорию Казахстана, обеспечивающих наряду с Транссибом альтернативные морскому транспорту маршруты перевозок в евроазиатском сообщении.

Трансазиатская железная дорога (далее ТАЖМ) является транснациональным проектом, который связывает все сети перевозок грузов в Азии и Европе. Значительная часть сети ТАЖМ уже действует, однако имеются небольшие трудности. Это разница в размере колеи железнодорожной сети в разных странах. Ширина колеи является параметром первостепенной важности, так как от него зависит надежность прохождения подвижного состава по пути. На континенте Евразия есть 4 основных вида колеи: 1435 мм, 1520 мм, 1524 мм, 1676 мм. Разница в ширине колеи железных дорог влияет на скорость передвижения составов, на время, затрачиваемое на перевозку грузов, то есть пропускная способность снижается из-за необходимости перегрузки.

Решением данной проблемы являются пункты, на которых меняется ширина колеи и тележек. Всего таких пунктов 8, один из них расположен на станциях Достык и Хоргос на приграничной зоне [9].

ТАЖМ подразделяется на Северный, Центральный и Южный коридоры. Северный коридор ТАЖМ обладает огромными экспортными возможностями, проходя через индустриально развитые области страны. Северный путь считается одним из ведущих интернациональных транзитно-транспортных коридоров в нашем государстве. Северный коридор реализует внутригосударственные перевозки, перевозки импортно-экспортных грузов (почти 40%), и транзитные (примерно 10%). Большим плюсом в конкуренции за трансконтинентальные перевозки предстает уменьшение расстояния, что является причиной уменьшения времени доставки. Однако стоит учитывать тот факт, что средняя скорость движения грузовых составов на территории Казахстана составляет около 40 км/ч, данная скорость недостаточна и перечеркивает плюсы сокращения расстояния. Протяженность данного коридора составляет 11 516 км, он пролегает по территории таких стран, как Российская Федерация, Республика Казахстан и Китайская Народная Республика. Протяженность коридора на территории нашей страны составляет 1718 км [10].

Кроме станций Петропавловск – Астана – Дружба, имеется ответвление Дема – Карталы – Тобол – Астана длиной 1308 км. Большая часть транзитных перевозок на этом коридоре совершается между РФ и КНР, это объясняется тем, что альтернативных казахстанским путям коридоров не имеется, и данный участок ТАЖМ является кратчайшим из России в Синьцзян – Уйгурский автономный район Китая. Северный коридор ТАЖМ: Западная Европа – Китай, Корейский полуостров и Япония через Россию и Казахстан (на участке Достык – Актогай – Саяк – Моинты – Астана – Петропавловск (Пресногорьковская)) [9]. Центральный ТАЖМ протягивается через юго-восточные и южные регионы страны. Центральный коридор ТАЖМ: Центральная Азия – Россия и страны ЕС (казахстанские участки Сарыагаш – Арысь – Кандыагаш – Озинки). Данный коридор имеет весомую значимость для транзитных перевозок. Протяженность 9654 км. Южный коридор ТАЖМ: Юго-Восточная Европа Китай и Юго-Восточная Азия через Турцию, Иран, страны Центральной Азии и Казахстан (на участке Достык – Актогай – Алматы – Шу – Арысь – Сарыагаш). Протяженность 10 989 км.

ТРАСЕКА – интернациональный проект, направленный на экономическое сотрудничество, торговлю, развитие транспортного сообщения между странами Европейского союза и Центральной Азии, Южного Кавказа, Причерноморья. Целью стран-участниц данного проекта является реализация геополитических и экономических возможностей с помощью развития транспортных сетей ТРАСЕКА, улучшение инвестиционной среды стран, их интеграция, способствование максимальному выходу на мировые рынки. Кроме экономических целей, ТРАСЕКА обеспечивает безопасность дорожного движения и грузов, охрану окружающей среды, улучшает транспортную политику.

Преимущество коридора состоит в том, что данный маршрут почти в 2 раза короче морского трансокеанского от портов страны восходящего солнца до Западной Европы. Также коридор проходит через страны богатые полезными ископаемыми, энергоресурсами, в том числе Казахстан, поэтому изрядная часть грузоперевозок – это сырьевые грузы. Основываясь на карте транспортного коридора ТРАСЕКА, участок длиной 1097 км, пролегающий через территорию нашего государства, включает в себя станции: Актау – Бейнеу – Макат – Кандыагаш – Арыс – Дружба [11].

Технико-экономические параметры ТРАСЕКА. Проанализировав содержание транспортного коридора ТРАСЕКА, были выявлены некоторые недостатки данной сети, также как и в ТАЖМ. Это разница в ширине казахстанской и китайской колеи, которая требует временных и материальных затрат. Кроме того, при пересечении

Каспийского моря необходимы паромные переправы, для которых также требуются ресурсы.

На сегодняшний день железнодорожный коридор ТРАСЕКА расценивается международным сообществом как естественный транзитный мост нашего континента, или по-другому как Воссозданный Шелковый Путь. Дорожная карта настоящего Шелкового Пути для Казахстана реализуется благодаря строительству инфраструктуры, формированию обоюдовыгодных отношений. Транспорт, логистика, транспортная логистика, улучшение транзита – это одна из основ развития Шелкового Пути. Реализация проектов инфраструктуры транспорта является одним из пунктов стратегического плана «Казахстан – Новый Шелковый Путь». Согласно данному плану наше государство в скором будущем должно стать значительным транзитным хабом Центральной Азии, обеспечивающий стабильный поток грузов из Азии в Европу [12], [13].

Транспортный коридор Север – Юг один из транспортных коридоров Евразии, связующий Южную Азию и страны Балтии, протяженностью более 7 тыс. км. Целью создания данного коридора выступает привлечение транзитных потоков груза из южной Азии в Европу.

Создание данного коридора позволило уменьшить расстояние перевозок почти в 2 раза (из Юго-восточной Азии в Хельсинки за 20–25 дней), при сравнении с морским путем через Суэцкий канал (45–60 дней). Уменьшение расстояния маршрута также снизило стоимость перевозки контейнеров. Благодаря этим факторам, предполагается увеличение грузопотока из стран Средней Азии в Европу. Маршрут включает в себя использование водного и железнодорожного транспорта [14], [15].

В рамках реализации данного проекта на территории Казахстана и Туркменистана был возведен участок железной дороги Узень – Берекет – Горган, что позволило данному региону, находящемуся в географической ловушке, выйти в морское пространство. Созвучие нашей государственной программы «Нурлы Жол» с международными интересами позволило полно использовать транзитный потенциал Западного региона [16].

Казахстан имеет большие перспективы политического и экономического характера в южном направлении, а именно – выход казахстанской экспортной и транзитной продукции на рынки государств Ближнего Востока через порты Персидского залива, Южной Азии и Африки. Путь через Иран является наиболее коротким [17]. Перевозка грузов по линии Узень (Казахстан) – Берекет (Туркменистан) – Горган (Иран) – Персидский залив является оптимальной в связи со снижением стоимости перевозок и сокращением времени транспортировки. Коридор «Север – Юг» укорочен на 600 км в сравнении с настоящим коридором Бейнеу – Дашогуз – Туркменабат – Теджен – Серахс – Мешхед [18], [19]. Ввод в эксплуатацию данного коридора вдоль восточного побережья Каспийского моря повлечет за собой беспроигрышные результаты для всех прилегающих государств, в том числе, находящихся в географической ловушке, в виде прочной и бесперебойной дороги на мировой рынок.

Заключение

Железнодорожная сеть Республики Казахстан в недавнем прошлом входила в состав единой сети железных дорог бывшего СССР, в рамках которого ее административное деление по политическим соображениям осуществлялось без строгого учета границ союзных республик. Поэтому в настоящее время по территории суверенного Казахстана помимо казахстанских железных дорог проходят участки дорог, находящиеся в административном подчинении других государств. Главные магистрали Казахстана, располагаясь меридионально, соединяли нашу сырьевую базу с Россией, при этом внутренняя связь между регионами Казахстана была слабой. Это является историческим фактом и представляет определенные сложности при эксплуатации железных дорог и выполнении перевозок. После распада СССР и становления Казахстана

как независимого государства, вектор развития транспортной логистики был направлен на соединение отдаленных регионов Казахстана путем строительства дополнительных железнодорожных веток. «Аксу – Дегелен», «Хромтау Алтынсарин», «Шар – Усть-Каменогорск», «Узень – гос. граница с Туркменистаном», «Жетыген – Коргас», «Жезказган – Бейнеу», «Аркалык Шубарколь» и др. укоротили расстояние между внутренними регионами Казахстана, а также расстояние между приграничными государствами. Итак, за период с 1998 года по 2016 год построено более 2,5 тыс. км новых железнодорожных линий и сформирована современная конфигурация железнодорожной сети.

Основным фактором, повлиявшим на формирование нынешней сети железных дорог, является развитие и размещение производственных объектов, крупных городов и административных центров в целях улучшения внутрирайонных, межрайонных, межобластных транспортно-экономических связей. Кроме того, строительство дополнительных веток способствует снижению транспортных расходов. Однако на сегодняшний день все еще существуют населенные пункты и центры добычи сырья/производства, которые все еще не соединены железнодорожными путями между собой. Например: Саксаульская – Аркалык, Жезказган – Тараз, Жезказган – Шымкент, Жезказган – Алматы, Жезказган – Туркестан, Жезказган – Кызылорда, Уральск Атырау, Семипалатинск – Караганда, Павлодар – Петропавловск, Актобе Аркалык – Караганда, Балхаш – Семипалатинск, Балхаш – Павлодар. Данные перспективные направления железнодорожных путей могли бы снизить нагрузку на существующие пути, образуя более густую сеть железных дорог и, следовательно, больше вариантов следования железнодорожных составов как во внутреннем, так и в транзитном направлении. Казахстан, являясь внутриконтинентальной страной, использует все свои преимущества, а именно транзитность, для развития международных железнодорожных перевозок.

По территории нашего государства протягиваются железнодорожные транспортные коридоры – Северный, Центральный и Южный коридоры Трансазиатской железной дороги, ТгаСЕСА и Север-Юг. Данные инициативы нацелены на привлечение транзитных грузов. Преимуществами данных коридоров является значительная экономия во времени транспортировки груза из Восточной, Юго-Восточной, Средней Азии в Европу. Однако небольшим сдерживающим фактором в осуществлении международных перевозок является разница в ширине колеи в странах следования, это требует дополнительного времени на перегрузку контейнеров. Не имея выхода к морю, Казахстан сделал все возможное, чтобы выйти из этой «транспортной ловушки» в плане развития инфраструктуры. Сейчас дело стоит за институциональными мерами – развитием логистики и теми, которые будут способствовать упрощению пересечения границ, оформления документов, ускорению всех данных процессов.

Список литературы:

- [1] Дроздов П.А. Основы логистики: учебное пособие. – Минск, 2008. – 211
- [2] Касымбек Ж.М. Государственное регулирование развития транспортного комплекса Республики Казахстан, автореферат. – Алматы, 2009. С.
- [3] Исингарин Н., Амирова А. Электрификация: золотые страницы истории железных дорог Казахстана, статья // Официальный сайт коммуникационной компании TLKMedia // <http://transexpress.kz/ru/magazines.php?id=265/> (был доступен 18 мая 2019 г.)
- [4] Балгабеков Т.К. Транспортные коридоры Казахстана: проблемы и перспективы // Труды БГТУ, научный журнал. – 2012. – № 2 (149). – С. 103–106.
- [5] Балгабеков Т.К., Келисбеков А.К., Абетов Д.Б. О Транспортных коридорах Казахстана // Мир транспорта. – 2012. – №4. – С. 96–101.
- [6] Железнодорожный транспорт//Официальный сайт Комитета по статистике Министерства национальной экономики Республики Казахстан//<http://stat.gov.kz/getfmg?id=ESTAT099950/> (был доступен 15 мая 2019 г.)

- [7] Плотность железных дорог//Официальный сайт Статистической базы данных ЕЭК ООН/<https://w3.unece.org/PXWeb/tu/Table?IndicatorCode=47#lastperiod=0> (был доступен 19 мая 2019 г.)
- [8] Саипов А.А., Дарибай Т.О., Нысанкулова Л. М. География инфраструктуры транспортно-коммуникационного комплекса Казахстана. (Учебно-методическое пособие. ЕНУ им. Л.Н. Гумилева). Астана: 2016. – 76 с.
- [9] Государственная программа развития и интеграции инфраструктуры транспортной системы Республики Казахстан до 2020 года
- [10] Бекмагамбетов М., Смирнова С., Транспортная система Республики Казахстан:(современное состояние и проблемы развития).-Алматы, 2005. – 446 с.
- [11] Саипов А.А. Ауэзова З.Т. География индустриально-инновационного развития Казахстана (методическое пособие для учителей географии) Астана: ЕНУ им. Л. Н. Гумилева. Мастер По, 2013. – 151 с.
- [12] Анализ транспортной отрасли Республики Казахстан за 2016 год//Официальный сайт Казахстанской фондовой биржи (KASE). – 30 декабря 2016 г. // https://kase.kz/files/ra_rfca_reports/rfca_automotive_industry_2016.pdf/ (был доступен 1 мая 2019 г.)
- [13] Годовой отчет за 2017 год//Официальный сайт АО «НК «КТЖ». – 31 декабря 2017 г. // https://www.railways.kz/upload/docs/Отчет_КТЖ_за_2017_год.pdf/ (был доступен 5 ноября 2018 г.)
- [14] Государственная программа по развитию транспортной инфраструктуры в Республике Казахстан на 2010 -2014 годы. – Астана, 2010 г.
- [15] Межправительственное соглашение по сети трансазиатских железных дорог. – Москва, 2006 г.
- [16] Годовой отчет АО НК «КазМунайГаз» за 2016 год, 2016 г.
- [17] Назарбаев Н.А. «Новая экономическая политика «Нурлы Жол» – путь в будущее» [Электронный Ресурс]: Послание Президента РК. – Астана
- [18] Стратегия развития АО «НК «КТЖ» до 2020 года, 2010 г.
- [19] Государственная программа инфраструктурного развития «Нурлы Жол» на 2015–2019 годы.

ANALYSIS OF THE CURRENT STATE OF THE RAILWAY NETWORK OF KAZAKHSTAN

Kegenbekov Zhandos K., candidate of technical sciences, associate Professor,
dean of the Faculty of Engineering and Economic Sciences,
Kazakh-German University

Kerimkulova Dina A., master student,
Kazakh-German University
111, Pushkin St, Almaty, 050010

Key words: Railways, railway transport, international railway corridors, railway network of Kazakhstan, railway network configuration.

Abstract. The article is devoted to the analysis of the stages of formation of the modern railway network of Kazakhstan, as well as its current state, configuration and position relative to international corridors. Theoretical and methodological basis of the work was made by the works of Kazakhstan and foreign experts in the field of transport and economy, devoted to the issues of railway transport and railway infrastructure of Kazakhstan, as well as its inclusion in international transport corridors. Statistical, cartographic and reference materials of the Committee on statistics of the Ministry of national economy of the Republic of Kazakhstan, annual reports of JSC «NC «KTZ», state programs of transport development, messages of the President of the Republic of Kazakhstan were used in this work. Scientific and theoretical provisions and conclusions formulated in the article can be the basis for solving practical problems in determining the future directions of development of the railway network of the Republic of Kazakhstan. Proposals for the straightening of railway routes can be used in further research.

References:

- [1] Drozdov P.A. Osnovy logistiki: uchebnoe posobie. – Minsk, 2008. – 211
- [2] Kasymbek ZH. M. Gosudarstvennoe regulirovanie razvitiya transportnogo kompleksa Respubliki Kazakhstan, avtoreferat. – Almaty, 2009. S.
- [3] Isingar N., Amirova A. Elektrifikaciya: zolotyie stranicy istorii zheleznyh dorog Kazakhstan, stat'ya//Oficial'nyj sajt kommunikacionnoj kompanii TLKMedia//<http://transexpress.kz/ru/magazines.php?id=265/> (byl dostupen 18 maya 2019 g.)
- [4] Balgabekov T.K. Transportnye koridory Kazakhstan: problemy i perspektivy // Trudy BGTU, nauchnyj zhurnal.-2012.- № 2 (149).-S.103-106.
- [5] Balgabekov T.K., Kelisbekov A.K., Abetov D.B. O Transportnyh koridorah Kazakhstan // Mir transporta.- 2012. – №4.- S.96-101.
- [6] ZHeleznodorozhnyj transport//Oficial'nyj sajt Komiteta po statistike Ministerstva nacional'noj ekonomiki Respubliki Kazakhstan//<http://stat.gov.kz/getImg?id=ESTAT099950/> (byl dostupen 15 maya 2019 g.)
- [7] Plotnost' zheleznyh dorog//Oficial'nyj sajt Statisticheskoy bazy dannyh EEK OON//<https://w3.unece.org/PXWeb/ru/Table?IndicatorCode=47#lastperiod=0> (byl dostupen 19 maya 2019 g.)
- [8] Saipov A.A., Daribaj T.O., Nysankulova L.M. Geografiya infrastruktury transprotno-kommunikacionnogo kompleksa Kazakhstan. (Uchebno-metodicheskoe posobie. ENU im. L.N. Gumileva). Astana: 2016. – 76 s.
- [9] Gosudarstvennaya programma razvitiya i integracii infrastruktury transportnoj sistemy Respubliki Kazakhstan do 2020 goda
- [10] Bekmagambetov M., Smirnova S., Transportnaya sistema Respubliki Kazakhstan:(sovremennoe sostoyanie i problemy razvitiya).-Almaty, 2005. – 446 s.
- [11] Saipov A.A. Auezova Z.T. Geografiya industrial'no-innovacionnogo razvitiya Kazakhstan (metodicheskoe posobie dlya uchitelej geografii) Astana: ENU im. L. N. Gumileva. Master Po, 2013.- 151 s.
- [12] Analiz transportnoj otrasli Respubliki Kazakhstan za 2016 god//Oficial'nyj sajt Kazhastanskoy fondovoj birzhi (KASE). – 30 dekabrya 2016 g. // https://kase.kz/files/ra_rfca_reports/rfca_automotive_industry_2016.pdf/ (byl dostupen 1 maya 2019 g.)
- [13] Godovoj otchet za 2017 god//Oficial'nyj sajt AO «NK «KTZH». – 31 dekabrya 2017 g. //https://www.railways.kz/upload/docs/Otchet_KTZH_za_2017_god.pdf/ (byl dostupen 5 noyabrya 2018 g.)
- [14] Gosudarstvennaya programma po razvitiyu transportnoj infrastruktury v Respublike Kazakhstan na 2010–2014 gody. – Astana, 2010g.
- [15] Mezhpriavitel'stvennoe soglasenie po seti transaziatskih zheleznyh dorog. – Moskva, 2006g.
- [16] Godovoj otchet AO NK «KazMunajGaz» za 2016 god, 2016 g.
- [17] Nazarbaev N.A. «Novaya ekonomicheskaya politika «Nurlyzhol» – put' v budushchee» [Elektronnyj Resurs]: Poslanie Prezidenta RK.- Astana
- [18] Strategiya razvitiya AO «NK «KTZH» do 2020 goda, 2010 g.
- [19] Gosudarstvennaya programma infrastrukturnogo razvitiya «Nurly ZHol» na 2015-2019 gody

Статья поступила в редакцию 20.07.2019 г.

УДК 656.6

Сергеев Сергей Николаевич, Руководитель ФБУ «Администрация Камводпуть»,
e-mail: kamvodput@mail.ru

614000, г. Пермь, ул. Советская, 20а

Уртминцев Юрий Николаевич, профессор, д.т.н.

ФГБОУ ВО «ВГУВТ», e-mail: yurtm@jandex.ru

Железнов Сергей Вячеславович, доцент, к.т.н.

ФГБОУ ВО «ВГУВТ», e-mail: sergezhelezno@yandex.ru

Малышкин Александр Георгиевич, профессор, д.т.н. ФГБОУ ВО «ВГУВТ»

603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5,

КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ РАЗВИТИЯ ВОДНОТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ НА ВОДНЫХ ПУТЯХ МЕСТНОГО ЗНАЧЕНИЯ

Ключевые слова: системный анализ, концептуальное моделирование, транспортная система, водные пути местного значения, судоходство, воднотранспортная инфраструктура, перераспределение грузопотоков, общественная эффективность.

Аннотация. В последние десятилетия в России резко ухудшилось использование малых рек для судоходства. Большинство региональных грузопотоков перешло на автомобильный транспорт, в результате чего значительно увеличилась нагрузка на сухопутную транспортную сеть и экологическую среду. В статье рассматривается проблема развития водных путей местного значения (малые реки) и переключения на них части грузопотоков с автомобильного транспорта. Исследовано влияние организации речных перевозок на транспортную систему района в целом и внешнее окружение. Разработан методологический подход для комплексной оценки социально-экономического, общественного и экологического эффекта от развития региональной воднотранспортной подсистемы. Использование данного подхода позволяет оценить целесообразность возобновления судоходства на малых реках и определить рациональные параметры флота и водного пути.

Актуальность проблемы. Внутренний водный транспорт отличается от автомобильного более высокой пропускной способностью, низкой стоимостью строительства и содержания путей. Экологический вред от эксплуатации речного транспорта в десятки раз ниже, чем автомобильного. Однако несмотря на наличие бесспорных преимуществ, внутренний водный транспорт не выдерживает конкуренции с автомобильным транспортом из-за ограниченной доступности и сезонности работы. В результате на автомобильный транспорт, начиная с 1990 года, переключилась значительная часть грузопотоков с водных путей. Объем перевозок внутренним водным транспортом за период с 1990 по 2015 г. уменьшился в 4,6 раза; протяженность внутренних водных путей с гарантированными габаритами судовых ходов сократилась почти в 2 раза; уменьшились габариты судовых ходов. За этот же период протяженность автомобильных дорог увеличилась в 1,5 раза, а средняя дальность автомобильных перевозок возросла в 2 раза. Все это привело к перегрузке дорог, повышенному износу, росту затрат на текущий и капитальный ремонты, росту социального напряжения в обществе. Размер вреда автомобильным дорогам от пробега одного большегрузного автомобиля установлен от 18,4 руб./км для дорог III категории, до 85 руб./км для дорог IV–V категорий [1].

В Европейской части РФ в районах с интенсивно развивающейся промышленностью и густой сетью автомобильных дорог практически все крупные магистральные реки имеют многочисленные боковые притоки с относительно небольшими глубинами

ми – до 1,5 м. Их относят к 5–7 классам водных путей местного значения. Такие реки, как Ока, Ветлуга, Верхняя Вятка, Уфа и многие другие до 1990г. активно использовались в транспортных целях. В настоящее время судоходство на водных путях местного значения в европейской части России практически свернуто. Расчистка дна и углубление русел малых рек прекращены, путевые работы не производятся, отсутствуют плавучая и береговая обстановка.

Проблема развития водного транспорта в районах, прилегающих к водным путям местного значения – это сложная комплексная проблема, требующая привлечения знаний из разных областей транспортной науки: моделирование транспортных систем, экономика, организация и управление на транспорте, взаимодействие видов транспорта, организация и технология перевозок, внутренние водные пути, дноуглубительные работы и сооружения на внутренних водных путях, автомобильные дороги.

В 40–70-е годы прошлого столетия проблема целесообразности транспортного использования малых рек исследовалась Звонковым В.В. [2], Матлиным Г.М. [3], Юминым Н.А. [4], Зачесовым В.П. [5] и др. Решались вопросы гидрологических возможностей транспортного использования рек, согласования габаритов судового хода и флота, установления границ зон обслуживания рек местного значения. В этих исследованиях водный транспорт рассматривался отдельно от внешнего окружения как изолированная система. Критерием принятия решений служили показатели себестоимости перевозок и приведенных затрат. Последствия организации судоходства на этих реках для смежных видов транспорта, бюджета, общественной и экологической сферы практически не учитывались.

В настоящее время улучшению судоходных условий малых рек посвящены работы [6–8]. Разработаны технические, технологические и экологические рекомендации по обустройству рек для судоходства. Уделяется внимание вопросам переключения грузопотоков на водный транспорт [9], [10].

В отношении методов исследования транспортных систем в работе [11] подчеркивается: «ни описательные, ни экономико-математические методы исследования, используемые современной транспортной наукой, не отвечают в полной мере требованиям, предъявляемым сегодня к разработкам по проблеме единой транспортной системы. Только системный метод исследования адекватен природе таких развивающихся объектов, как единая транспортная система и ее элементы – железнодорожные узлы и станции, морские и речные порты, аэропортовые комплексы и другие объекты транспортной инфраструктуры».

Методология системного анализа, принципы моделирования систем, структурное моделирование освещены в работах: [12–14].

Полезность концептуального моделирования отмечается в работе [15]: «Концептуальное моделирование – это сравнительно новое актуальное и активно развивающееся научное направление в области теории, методологии, технологии и средств моделирования сложных систем, к которым относятся транспортные системы. Концепт для транспортных систем выступает как результат обобщения их свойств, признаков, закономерных связей и делает возможным развитие концептуального моделирования как на фазе создания их моделей, так и использования».

В работах [16], [17] отмечается, что внутренние водные пути – это часть транспортной инфраструктуры страны. Изучены ключевые проблемы и факторы развития воднотранспортной инфраструктуры. В работе [18] обобщен опыт реализации инфраструктурных транспортных проектов в 5 наиболее развитых странах мира. В качестве примера отмечается, что правительство Великобритании в 2003 г. установило пять критериев для оценки эффективности проектов, которые применяет до сих пор: проект должен вносить вклад в борьбу с изменением климата, обеспечивая снижение выбросов углерода в атмосферу; обеспечивать эффективность транспортных сетей; способствовать обеспечению равных возможностей для всех граждан; способствовать созданию благоприятной для человека окружающей среды; способствовать повыше-

нию безопасности граждан. Отметим, что переключение грузопотоков с автомобильного на водный транспорт полностью отвечает перечисленным критериям.

В отношении оценки инфраструктурных проектов отмечается также, что издержки и выгоды должны оцениваться с позиций всего общества. Поэтому необходимо оперировать понятием общественной эффективности. Учитывать социальные, экологические факторы и внешние эффекты[19].

Выводы:

1) В настоящее время отсутствуют научно обоснованные методики комплексного обоснования включения в транспортные системы регионов внутренних водных путей местного значения, оптимизирующие соотношение параметров инфраструктуры и флота и учитывающие интересы владельцев транспортной инфраструктуры, перевозчиков и потребителей транспортных услуг.

2) Разработка проблемы эффективного функционирования и развития водного транспорта в районах, прилегающих к водным путям местного значения, является актуальной задачей и представляет практический и научный интерес.

3) Имеющиеся научные исследования создают достаточную базу для решения указанной проблемы.

Постановка цели и задач исследования

Фактическое состояние дел в региональных транспортных системах характеризуется: постоянным ростом средней дальности и интенсивности автомобильных перевозок, высокой скоростью износа дорожной сети, ростом затрат на ее содержание и ремонты, низкой пропускной способностью дорожной сети при подъездах к городам, социальным напряжением, ростом загрязнения окружающей среды автомобильным транспортом. При этом имеющиеся, пригодные для организации судоходства реки, для перевозок не используются. Необходимое (объективно обусловленное) положение дел: сокращение средней дальности и интенсивности автомобильных перевозок, снижение скорости износа дорог и затрат на их содержание и ремонты, снятие социального напряжения, снижение загрязнения окружающей среды, использование водных путей местного значения для перевозок грузов и пассажиров.

Причина расхождений между фактическим и необходимым (желаемым) положением дел это – рост интенсивности и средней дальности автомобильных перевозок, который вызывает негативные экономические, социальные и экологические последствия. Одним из способов частичного устранения этой причины может стать обустройство для организации судоходства имеющихся в данном географическом районе водных путей местного значения с последующим переключением части автомобильных перевозок на водный транспорт.

Рабочая гипотеза: существует некоторое сочетание местных условий и параметров воднотранспортной системы, при которых достигается максимальная общественная эффективность переключения части грузопотоков с сухопутной транспортной сети на водные пути местного значения.

Предмет исследования: влияние организации перевозок по водному пути местного значения на показатели работы транспортной системы в целом и внешне окружение.

Цель исследования: разработка научно обоснованного инструмента комплексного обоснования организации перевозок на водных путях местного значения, оптимизирующего соотношение габаритов пути и эксплуатационно-технических характеристик флота и обеспечивающего баланс интересов государства, потребителей транспортных услуг и предприятий речного транспорта.

Для достижения указанной цели необходимо решить следующие задачи:

1) Обосновать методологический подход к исследованию влияния организации судоходства на реках местного значения на транспортную систему прилегающего района и интересы внешнего окружения;

- 2) Построить концептуальную модель внешнего окружения транспортной системы и установить параметры, определяющие последствия внедрения в нее воднотранспортной подсистемы;
- 3) Разработать математическую модель транспортной системы, включающей воднотранспортную подсистему;
- 4) Провести проверку адекватности математической модели;
- 5) Разработать алгоритм и программу, пригодные для практического использования;
- 6) Разработать практические рекомендации по обоснованию целесообразности развития воднотранспортных систем на водных путях местного значения.

Концептуальное моделирование

На схеме (рис. 1) отображена транспортная система с системным окружением (внешняя среда), разделенным на три сферы: государство, социально-экономическая сфера и сфера экологии. Под термином «государство» имеются в виду региональные государственные органы власти, осуществляющие экономико-организационную и социальную функции и обеспечивающие безопасность, в том числе, экологическую. Социально-экономическая сфера – совокупность отраслей, предприятий, организаций, определяющих образ и уровень жизни людей в регионе. Сфера экологии – вся система региональной общественной жизни, связанная с регулированием и взаимодействием общества с естественной окружающей средой.

Перечисленные элементы внешней среды связаны между собой и взаимодействуют с транспортной системой региона.



Рис. 1. Структура транспортной системы и внешнего окружения

Процессы, происходящие во внешнем окружении, порождают требования и ограничения к преобразованиям транспортной системы региона. Прогнозируемое развитие социально-экономической сферы определяет перспективную нагрузку на транспортную систему, сфера экологии накладывает природные ограничения на параметры развития транспортной инфраструктуры, государство, учитывая потребности развития, ожидаемые эффекты, наличные ресурсы и природные ограничения, определяет возможности и планирует затраты на развитие транспортной и социальной инфраструктуры. Сама транспортная система, в свою очередь, состоит из подсистем видов транспорта, каждая из которых включает такие элементы, как транспортные предприятия, пути, транспортные средства и терминалы. Причем, характеристики отдельных

элементов подсистем влияют на транспортную систему в целом и опосредованно – на внешнее системное окружение.

Задача комплексного обоснования целесообразности включения речного транспорта в планы развития транспортной системы региона и оптимального соотношения параметров воднотранспортной инфраструктуры и флота, может быть решена путем построения, анализа и моделирования всей системы, охватывающей пространство от элементов воднотранспортной подсистемы (нижний уровень) до внешнего окружения транспортной системы (верхний уровень).

Моделируемая физическая реальность (объект) это – населенный географический район с протекающей по нему рекой, естественным природным окружением, населенными пунктами, производственными предприятиями, социальными объектами, системой управления, сетью сухопутных путей, обслуживающих транспортные потребности этого района.

Исследуемая проблема относится к классу слабоструктурированных или смешанных, содержащих количественные (экономические) и качественные оценки (социальные и экологические). Для решения таких проблем применяется системный анализ. Задача системного анализа состоит в создании концептуальной модели системы, в которой должно быть установлено соотношение между элементами и их связями, т.е. слабоструктурированную проблему необходимо превратить в хорошо структурированную, к решению которой можно приложить аппарат исследования операций. И далее, не прибегая к экспериментам на реальном географическом районе, подтвердить рабочую гипотезу о целесообразности разгрузки сухопутной транспортной сети районов путем переключения части грузопотоков на водные пути местного значения с условием оптимизации параметров воднотранспортной инфраструктуры и флота.

Разработку концептуальной модели оценки целесообразности развития воднотранспортной подсистемы на водном пути местного значения предлагается реализовать по следующей схеме:

1) Создать концептуальную модель системы в макроскопическом представлении: внешнее окружение и транспортная система без структуризации на подсистемы. При этом вся транспортная система представляется одной подсистемой сухопутного транспорта. Состояние системы в этом представлении характеризуется множеством параметров – S ;

2) Внедрить в созданную концептуальную модель второй блок транспортной системы – подсистему речного транспорта, без структурирования на элементы. Состояние системы в этом представлении характеризуется множеством параметров – S_1 ;

3) Сравнить полученные множества параметров: $S_1 / S = \Delta S$, где ΔS – разность множеств. Параметры, попавшие в множество ΔS , характеризуют влияние включения речного транспорта на всю систему в макроскопическом представлении.

4) Исследовать параметры множества ΔS и выявить основные параметры, определяющие влияние воднотранспортной подсистемы на систему в целом – множество – S_2 . Классифицировать выявленные параметры на ситуационные, нормативные и переменные, управляя которыми можно влиять на эффективность системы;

5) Исследовать отношения между параметрами множества S_2 ; сформулировать критерии оптимизации, целевую функцию и формализовать концептуальную модель влияния воднотранспортной системы на внешнее окружение.

В соответствии с предложенной схемой на первом этапе необходимо создать модель системы в макроскопическом представлении: внешнее окружение и транспортная система (сухопутная) без структуризации на подсистемы и их элементы.

Целевая функция такой системы – обеспечение инфраструктурных условий развития социально-экономической сферы с максимальной эффективностью. Каждый элемент системы должен выполнять свою функцию (задачу) по достижению общей цели системы. Все параметры элементов системы должны находиться во взаимосвязи

между собой, оказывать взаимовлияние друг на друга и зависеть от свойств входящих в систему элементов.

Концептуальная модель системы может быть создана на основе общеизвестных представлений из области экономики и эксплуатации транспорта.

При создании концептуальной модели системы нами использован метод структурного моделирования, при котором достигается подобие между структурой моделируемой системы и структурой модели и появляется возможность изучения взаимосвязей элементов.

Предлагаемая структурно-матричная модель взаимодействия транспортной системы с внешним окружением приводится на рис. 2.

ВХОДЫ ВЫХОДЫ		Социально-экономическая сфера		Государство					Сухопутная транспортная система			Экологическая сфера		
		Зсэр	Осэс	Пл	Лс	Нсэс	Нс	Ос	Гс	Лп	Зс	Всэс	Вс	Вп
Социально-экономическая сфера	$P(T, Z_{сэр})$			↗										
	$ЧДс(П)$													
	$Эсоц(П)$													
	$H(П)$					↗								
	$G(П)$								↗					
	$L(П)$				↗									
	$Lп(П)$									↗				
Государство	$Зсэр(Пл)$	↗												
	$ЧДб(Нсэс, Нс)$													
	$Зс(Лс)$										↗			
	$B(Лс, Ос)$												↗	
Сухопутная транспортная система	$ЧДа(Г, Лп)$													
	$Hс(Г, Лп)$						↗							
	$B(Г, Лс)$													↗
Экологическая сфера	$Осэс$		↗											
	$Ос$							↗						
	$Усэс(П)$													
	$Ус(Лс)$													
	$Усп(А)$													

Рис. 2. Структурно-матричная модель взаимодействия сухопутной транспортной системы с внешним окружением

В предлагаемой модели (рис. 2) социально-экономическая сфера (СЭС) это – саморазвивающийся элемент. Здесь возникают потребности развития производства и потребления Пл, ведущие к увеличению нагрузки на транспортную систему. СЭС решает задачу 1 – развитие с максимальной экономической эффективностью (чистый доход системы $ЧДс \Rightarrow \max$) и социальной эффективностью (социальный эффект $Эсоц \Rightarrow \max$).

Государство это – управляющий элемент, получающий информацию от всех остальных элементов системы и преобразующий ее в управляющую информацию. Здесь решается задача 2 – развитие инфраструктуры транспорта с максимальной бюджетной эффективностью (чистый бюджетный доход $ЧДб \Rightarrow \max$).

Транспортная система это – управляемый элемент, который в соответствии с управляющей информацией, синтезирует информацию о необходимой провозной способности, потребности в подвижном составе и способах организации перевозок. Здесь решается задача 3 – организация перевозок с максимальной эффективностью ($ЧДа \Rightarrow \max$).

Сфера экологии – это преобразуемый, пассивный элемент, устанавливающий для всех остальных элементов системы природные ограничения по размещению объектов социально-экономической сферы и развитию инфраструктуры транспорта и перевозок. Здесь решается задача 4 системы – минимизация ущерба экологической сфере ($\Sigma Y \Rightarrow \min$).

Общая для всей системы цель – устойчивое развитие с максимальной экономической эффективностью $\Sigma ЧД = ЧДс + ЧДб + ЧДд \Rightarrow \max$, максимальной социальной эффективностью $\Sigma соц \Rightarrow \max$ и минимальным экологическим ущербом $\Sigma Y = Y_{сэс} + Y_{сп} \Rightarrow \min$.

Определяющим состояние социально экономической системы (СЭС) на некий прогнозируемый момент времени (Т) параметром является прогноз социально-экономического развития (СЭР) района на этот момент времени – $\Pi(T, Зсэр) = \Pi_L$, зависящий от усилий государства, направленных на это развитие: энергетическая, коммунальная, бытовая и социальная инфраструктуры – $Зсэр$. От прогнозов СЭР зависят: количество пассажиров и грузов, которые будут предъявлены к перевозке – $G(\Pi) = G_c$, требования к развитию сухопутной транспортной сети $L(\Pi) = L_c$, средняя дальность перевозок $L_p(\Pi) = L_p$, и воздействие развития объектов СЭС в рамках природных ограничений (Осэс) на экологическую сферу $B(\Pi, Осэс) = B_{сэс}$.

Параметры СЭС Π_L и L_c являются входными для системы «государство», на основе которых планируются выходные параметры системы: затраты государства на обеспечение условий развития СЭС – $Зс(\Pi_L) = Зсэр$, затраты на развитие сухопутной транспортной сети – $Зс(L) = Зс$ и, связанное с транспортным строительством в рамках природных ограничений – $Ос$, воздействие на экологическую сферу $B(L_c, Ос) = B_c$.

Параметры СЭС – G_c и L_p являются входными для сухопутной транспортной системы, на их основе планируются транспортная работа (приведенный грузооборот) – $A = G_c * L_p$, налоги – $Нс(G, L_p) = Нс$ и воздействие транспортной деятельности на экологическую сферу $B(G_c, L_p) = B_p$.

Сфера экологии определяет природные возможности и ограничения развития всей системы: $Осэс$ – для развития объектов СЭС, $Ос$ – для развития транспортной сети, $Оп$ – для работы транспорта. Эта система генерирует экологические эффекты от воздействия на нее других систем: $Y(\Pi) = Y_c$ – реакция на развитие объектов СЭС, $Y(L) = Y_c$ – реакция на развитие транспортной сети, $Y(A) = Y_p$ – реакция на транспортную работу.

СЭС на государственные инвестиции в объеме $Зсэр$, создает эффект для системы «государство»: в виде налогов – $Нсэс$. Транспортная система реагирует на инвестиции в инфраструктуру – $Зс$ созданием эффектов: для государства – налоги $Нс$, для СЭС – удовлетворение перспективных потребностей в перевозках – A .

Предлагаемая структура (рис. 2) и морфологическое описание взаимосвязей элементов представляют концептуальную модель системы. Разработанная концептуальная модель позволяет перейти к изучению ее реакции на внесение изменений в ее структуру.

В соответствии с предложенной схемой в созданную модель (рис. 2) внедрен второй блок транспортной системы – подсистема речного транспорта (рис. 3).

Внедрение речного транспорта привело к изменениям во всей системе:

1) В подсистеме СЭС изменилось среднее расстояние перевозок сухопутным транспортом. Для части потока, переключаемой в смешанное автомобильно-водное сообщение – G_r , расстояние сухопутных перевозок будет состоять из расстояний подвоза-вывоза из речных терминалов – $L_{п1}(\Pi) = L_{пс1}$ и расстояния перевозок по реке – $L_{п2}(\Pi) = L_{пр}$. Для оставшейся части потоков среднее расстояние сухопутных перевозок останется прежним. Изменился грузооборот, разделившись на две части: сухопутный – $A_1(G, L_{пс1}) = G_c * L_{пс}$; речной – $A_r(G_r, L_{пр}) = G_r * L_{пр}$. Изменился чистый доход $ЧДс \Rightarrow ЧДс_1$ за счет разницы тарифов речного и сухопутного транспорта, а также за счет усложнения логистики.

2) В подсистеме «государство» добавились затраты на развитие и содержание речной инфраструктуры, $3r(Lr)=3r$. Увеличилось воздействие на экологическую сферу в связи с обустройством для судоходства речного пути и портов $B(Lr, Or)=Br$. Изменился чистый бюджетный доход за счет сокращения налогов от деятельности сухопутного транспорта и появления налогов от деятельности речного транспорта $ЧДб \Rightarrow ЧДб_1$.

ВХОДЫ ВЫХОДЫ		Социально-экономическая сфера		Государство										Сухопутная транспортная система			Речная транспортная система				Экологическая сфера				
		Зсэр	Осэс	Пл	Лс	Нсэс	Нс1	Гп, Гф	Нг	Ос	Or	Гс	Лнс1	Зс1	Гр	Лг	Лнг	Зг	Всэс	Вс	Вг	Вп1	Вгп		
Социально-экономическая сфера	П(Т,Зсэр)	→ Задача 1- развитие с максимальной экономической и социальной Эсоц1=>max эффективностью																							
	ЧДс1(П); Эсоц1																								
	Н(П)																								
	G(П)																								
	Gr																								
	L(П)																								
	Lnc1																								
Государство	Lnr																								
	B(П, Осэс)																								
	Зсэр(Пл)																								
	Зс(Лс, Лнс1)																								
	ЧДб1(Нсэс,Нс1,Нг)	→ Задача 2- управление развитием СЭС и транспортной инфраструктуры с максимальной эффективностью ЧДб1=> max																							
	Lr(Or)																								
	Зг(Лг,Нг,Гф)																								
B(Лс, Ос)																									
Сухопутная транспортная система	B(Лг, Or)																								
	ЧДа1(G,Лнс1)																								
	Нс1(G,Лнс1)																								
	B(G,Лнс1)																								
Речная транспортная система	Гп, Гф																								
	ЧДг(Gr,Лнг)																								
	Нг(Gr,Лнг)																								
	B(Gr,Лнг)																								
Экологическая сфера	Осэс																								
	Ос																								
	Or																								
	Усэс(П)																								
	Ус(Лс)																								
	Усп1(A1)																								
	Уг(Лг)																								
	Угп(Gr,Лнг)																								
																			Задача 5- сохранение экологической сферы с минимальным экологическим ущербом ΣУг1=>min						

Рис. 3. Структурно-матричная модель взаимодействия смешанной транспортной системы с внешним окружением

3) В сухопутной транспортной подсистеме в соответствии с изменившейся для части потоков схемой доставки, произошли изменения грузооборота, налогов и вредного воздействия на экологическую сферу. Изменилась задача системы: добавилось взаимодействие с речной транспортной подсистемой с максимальным сокращением дальности перевозок. Изменился чистый доход $ЧДа \Rightarrow ЧДа_1$.

4) Задача речной транспортной подсистемы – организация речных перевозок во взаимодействии с сухопутной транспортной подсистемой. Выполнение этой задачи добавило в общую систему эффекты: для СЭС – социальный эффект – $Эсоц_1$; для государства – налоги $Нг(Gr, Lnr)=Нг$ и требуемые габариты судового хода – $Гп$ и судов – $Гф$, от которых зависит размер инвестиций в обустройство речного пути; для сухопутной транспортной подсистемы – сокращение средней дальности перевозок $Ln \Rightarrow Lnc_1$; для экологической сферы – воздействие на экологическую сферу деятельности речного транспорта $B(Gr, Lnr)=Br$. Подсистема генерирует собственный чистый доход – $ЧДг$.

5) В экологической сфере к природным ограничениям для СЭС и сухопутной транспортной подсистемы добавились ограничения для речной подсистемы – Or . Изменился экологический ущерб от деятельности сухопутного транспорта $Y(A_1)=Y_{cn1}$ и добавились эффекты от обустройства реки $Yr(Lr)=Yr$ и от деятельности речного транспорта $Y(Gr, Lnr)=Yrn$.

В социально-экономической сфере неизменными остались: планы развития – Пл, налоги – Н, количество предъявляемых к перевозке грузов – G , дислокация пунктов потребления или перераспределения грузов L , воздействие развития СЭС на экологическую сферу – В. Внедрение воднотранспортной подсистемы не оказывает существенное влияние на показатели развития СЭС.

В подсистеме «государство» не изменяются затраты на развитие инфраструктуры СЭС – $Зсэр$, сухопутную транспортную инфраструктуру – $Зс$ и связанные с ними воздействия на экологическую сферу $Всэс$, $Вс$. То есть внедрение воднотранспортной подсистемы не влияет на планы развития дорожной сети и социально-экономической инфраструктуры.

Множества параметров, характеризующих взаимодействие сухопутной транспортной системы $\{S\}$ и смешанной транспортной системы $\{S_1\}$ с системным окружением приведены на рис. 4а и 4б.

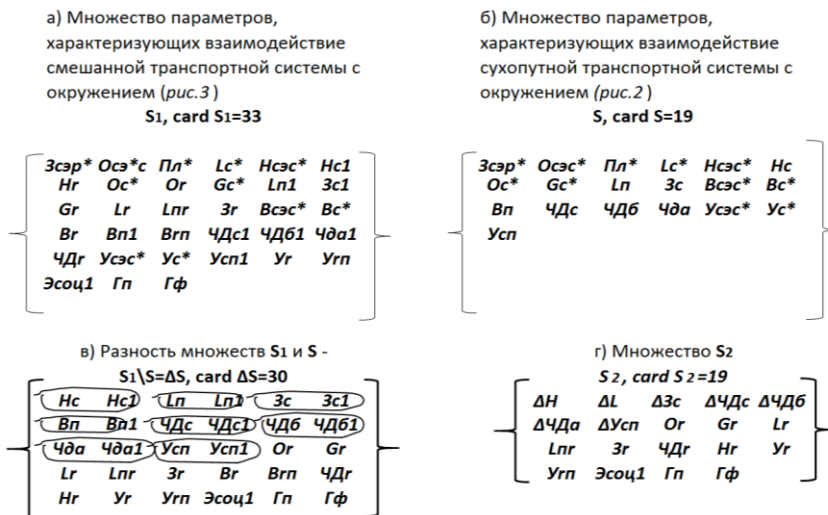


Рис. 4. Анализ множеств параметров структурно-матричных моделей

Далее следует сравнить полученные множества параметров: $S_1 \setminus S = \Delta S$, где ΔS – разность множеств. Эта операция выполнена на рис. 4в.

На рис. 4 в множествах S и S_1 выделены знаком (*) 11 не изменившихся параметров. Эти параметры не зависят от изменений, вносимых в транспортную систему речным транспортом, т. е. это – постоянные параметры системы, константы. В множестве S_1 не содержатся 8 параметров, имеющих в множестве S . Таким образом, разность множеств $\Delta S = S_1 / S$ содержит 33–11+8=30 параметров, так или иначе отражающих влияние включения речного транспорта в модель взаимодействия транспортной системы с внешним окружением.

Из этих 30 параметров 14 – это новые параметры, не относящиеся к модели прямого сухопутного сообщения S . Эти параметры появились в связи с включением в модель S_1 подсистемы речного транспорта.

Оставшиеся 16 параметров множества ΔS , из которых 8 принадлежат множеству S_1 и 8 принадлежат множеству S , отражают влияние включения в транспортную систему речного транспорта на родственные параметры. В множестве ΔS эти 8 пар пара-

метров обведены (рис. 4в). Таким образом, множество ΔS можно уменьшить, заменив выделенные пары их разностями. Например, пара Ln, Ln_1 (средняя дальность перевозок) может быть заменена разностью $Ln_1 - Ln = \Delta Ln$, налоги $Hc_1 - Hc = \Delta Hc$ и т.д.

В множестве ΔS параметры Bn, Bn_1, Br и Brn отражают воздействие сухопутной и водной транспортных систем на окружающую среду. Для дальнейшего анализа важны не показатели воздействия, а эффекты этого воздействия – $У$. Поэтому из множества ΔS параметры Bn, Bn_1, Br и Brn можно исключить, сосредоточившись на их проявлениях через эффекты – $У$. Таким образом, количество параметров, отражающих влияние внедрения воднотранспортной подсистемы на всю систему в целом, составит 19 – множество S_2 (рис. 4е).

Внедрение воднотранспортной системы отражается на следующих 19 параметрах:

1) ΔH – Сокращение налоговых поступлений от деятельности сухопутного транспорта в результате сокращения грузооборота;

2) ΔL – Сокращение средней дальности перевозок сухопутным транспортом. Часть прямых дальних перевозок заменяется короткими подвозом и вывозом из портов;

3) ΔZc – Сокращение бюджетных затрат на развитие и содержание сухопутной сети в части расходов на содержание. Подключение речного транспорта не отменяет потребности в развитии сухопутной сети (капитальные вложения остаются прежними), но расходы на ее содержание уменьшаются в связи с частичной разгрузкой;

4) $\Delta Усп$ – Экологический эффект от снижения воздействия сухопутного транспорта на экологическую сферу;

5) Hr – Налоговые поступления от реализации услуг, связанных с речным транспортом;

6) $Уr$ – Экологический эффект от работ по обустройству реки для судоходства;

7) Gr – Количество перевозок речным транспортом;

8) Lr – Протяженность обустраиваемого участка реки;

9) Lpr – Средняя дальность перевозок по реке;

10) Zr – Затраты на создание судоходных условий на участке реки и расходы по его содержанию;

11) $Уrn$ – Экологический эффект от деятельности речного транспорта;

12) Or – Природные ограничения по использованию реки для судоходства;

13) $\Delta ЧДс$ – Дополнительный чистый доход потребителей транспортных услуг за счет разницы тарифов;

14) $\Delta ЧДб$ – Изменение чистого бюджетного дохода из-за инвестирования в водный путь и расходов по его содержанию, сокращения расходов по содержанию дорожной сети и изменения налоговой базы;

15) $\Delta ЧДа$ – Уменьшение чистого дохода сухопутного транспорта из-за сокращения средней дальности перевозок;

16) $ЧДr$ – Чистый доход речного транспорта;

17) $Эсоц_1$ – Социальный эффект от сокращения нагрузки на дороги и развития деятельности речного транспорта;

18) $Гп$ – характеристики судового хода и обустройства речного участка;

19) $Гф$ – габариты судов.

Перечисленные параметры множества S_2 характеризуют поведение системы S при внедрении в нее подсистемы речного транспорта. Анализ взаимосвязей между этими параметрами позволит формализовать модель влияния воднотранспортной подсистемы на транспортную систему района и внешнее окружение.

Смешанная сухопутно-водная транспортная система представляет собой упорядоченную пару $W = W(r, S_2)$, где S_2 – множество параметров (рис. 2, 4в), r – множество отношений между S_2 -параметрами.

В табл. 1 на основе общеизвестных представлений приводятся отношения между параметрами множества S_2 . Из табл. 1 следует, что отношения между 18 параметрами множества характеризуются 12 зависимостями ($r=12$): f_1-f_{12} . При этом 6 параметров

множества S_2 не зависят от 12 остальных параметров этого множества. Это 5 постоянных параметров системы и управляемая переменная – $\Gamma\phi=X$. К постоянным относятся 5 ситуационных параметров: планируемое к переключению на речной транспорт количество перевозок – Gr , средняя дальность речных перевозок – Lnr , сокращение дальности сухопутных перевозок – ΔLc , протяженность речного участка – Lr и природные ограничения по использованию реки для судоходства – Or . Эти 5 параметров определяются конкретными местными условиями и выясняются в процессе анализа местной ситуации (планируются в соответствии с прогнозами социально-экономического развития конкретного района, конфигурацией сухопутной транспортной сети, характеристик местных водных путей и портов). Параметр, представляющий множество характеристик планируемых к использованию судов – $\Gamma\phi$, может варьироваться при выборе типов судов, планируемых к использованию на рассматриваемом речном участке. Поэтому его целесообразно назначить управляемой переменной $X=\Gamma\phi$, изменяемой в пределах, допустимых по природным ограничениям: $X < Or$.

Классификация параметров множества S_2 на ситуационные, зависимые переменные и выделение управляемой переменной позволяют перейти к формализации концептуальной модели.

Цель транспортной системы – транспортное обеспечение потребностей СЭР с максимальной эффективностью. Поэтому основной показатель (критерий) состояния системы – это ее эффективность – W . Для таких проектов определяется общественная эффективность, характеризующая проект с точки зрения всей системы в целом.

Учитывая, что критерий экономической эффективности – чистый дисконтированный доход за период от $i=0$ до $i=I$ лет, а также необходимость учета социальных и экологических последствий, целевая функция модели влияния воднотранспортной подсистемы на эффективность системы в целом определяется комплексной функцией:

- экономическая – $\sum \Delta W_i = \sum \Delta C_i + \sum \Delta D_i + \sum \Delta A_i + \sum \Delta R_i = > max$;
- социальная – $\sum \Delta c_i = > max$; (1)
- экологическая – $\sum (\Delta Y_{сп_i} + Y_{r_i} + Y_{rn_i}) = > min$.

В общем виде разработанная концептуальная модель влияния воднотранспортной подсистемы на эффективность системы в целом формулируется следующим образом:

определить сочетание ситуационных параметров: количество переключаемых на водный транспорт перевозок – Gr , протяженность обустраиваемого речного участка – Lr , сокращение средней дальности автомобильных перевозок – ΔL , средняя дальность речных перевозок – Lnr , фактические габариты русла реки – Γ , планируемые габариты судового хода – $\Gamma_{п}$ габариты судов – $\Gamma\phi$, при котором обеспечивается наилучшее значение комплексной функции цели за период $i=I$ лет, учитывая взаимосвязи:

$$\begin{aligned} \Delta C_i &= f_3(\Delta L, Gr); \Delta D_i = f_4(\Delta H; \Delta 3c, 3r, Hr); \Delta A_i = f_5(\Delta L, Gr); \\ \Delta R_i &= f_8(Gr, Lnr, \Gamma n, X); \Delta H = f_1(\Delta L, Gr,); \Delta 3c = f_2(\Delta L, Gr); 3r = f_7(Lr, \Gamma n); \\ Hr &= f_9(Gr, Lnr, \Gamma n, X); \Gamma n = f_{12}(Or, X), \Delta Y_{cn} = f_6(\Delta L, Gr), \Delta Y_r = f_{10}(Lr, \Gamma n), \\ \Delta Y_{rn} &= f_{11}(Gr, Lnr), \text{ при ограничении: } \Gamma n < Or. \end{aligned}$$

Ограничение $\Gamma n < Or$ означает, что характеристики планируемых к использованию речных судов не должны превышать природных ограничений.

Комплексной функцией цели (1) может быть реализована с использованием принципа Парето с учетом значимости показателей экономической, социальной и экологической эффективности. Значимость (вес) показателей зависит от ситуации, сложившейся в конкретном районе на момент принятия решения. Например, если в районе сложилась напряженная экологическая ситуация, то значимость экологического критерия должна назначаться более высокой, чем экономического и социального; если население перекрывает дороги из-за их перегруженности большегрузным автотранспортом (как это было в г. Уфа, 2017 г.), то максимальная значимость должна присваиваться социальному критерию. Возможны такие ситуации, когда при отрицательном

значении экономического критерия $\Sigma \Delta W_i$ (внедрение воднотранспортной системы ухудшает экономические показатели) может быть принято положительное решение с учетом более высокой значимости экологического и социального критериев. В такой ситуации экономические потери следует рассматривать, как цену, уплаченную за улучшение экологической и социальной обстановки в районе.

Таблица 1

Отношения между параметрами множества S_2

Зависимости Параметры	Параметры																	
	ΔH	ΔL	$\Delta 3c$	$\Delta \text{ЧДс}$	$\Delta \text{ЧДб}$	$\Delta \text{ЧДа}$	$\Delta \text{Усп}$	Or	Gr	Lr	Lnr	$3r$	ЧДr	Hr	Yr	Yrn	Γn	$X = \Gamma \Phi$
$\Delta H = f_1(\Delta L, Gr, Lnr)$		f_1							f_1		f_1							
ΔL																		
$\Delta 3c = f_2(\Delta L, Gr)$		f_2							f_2									
$\Delta \text{ЧДс} = f_3(\Delta L, Gr)$		f_3							f_3									
$\Delta \text{ЧДб} = f_4(\Delta H, \Delta 3c, 3r, Hr)$	f_4		f_4									f_4		f_4				
$\Delta \text{ЧДа} = f_5(\Delta L, Gr)$		f_5							f_5									
$\Delta \text{Усп} = f_6(\Delta L, Gr)$		f_6							f_6									
Or																		
Gr																		
Lr																		
Lnr																		
$3r = f_7(Lr, \Gamma n)$											f_7						f_7	
$\text{ЧДr} = f_8(Gr, Lnr, \Gamma n, X)$									f_8		f_8						f_8	f_8
$Hr = f_9(Gr, Lnr, \Gamma n, X)$									f_9		f_9						f_9	f_9
$Yr = f_{10}(Lr, \Gamma n)$											f_{10}						f_{10}	
$Yrn = f_{11}(Gr, Lnr)$									f_{11}		f_{11}							
$\Gamma n = f_{12}(Or, X)$								f_{12}										f_{12}
$\Gamma \Phi = X$																		

Модель может быть сформулирована в зависимости от решаемой задачи. Например, при заданных ситуационных параметрах определить оптимальные габариты пути и типы флота, или при заданных характеристиках флота, габаритах судового хода и прочих ситуационных параметрах можно установить количество водных перевозок – Gr , обеспечивающих требуемую экономическую эффективность, или определить размеры зоны тяготения грузопотоков к освоению речным транспортом, установив оптимальное значение дальности автомобильных перевозок в смешанном сообщении – $Lnc_1 = Ln - \Delta L$ и пр.

Представленная концептуальная модель позволяет перейти к созданию научно-обоснованного инструмента комплексного обоснования организации перевозок на водных путях местного значения, оптимизирующего соотношение габаритов пути и эксплуатационно-технических характеристик флота и обеспечивающего баланс интересов государства, потребителей транспортных услуг и предприятий речного транспорта.

Для практического использования модели необходимо решить следующие задачи:

- 1) раскрыть и формализовать взаимосвязи, входящих в модель параметров и их зависимость от характеристик элементов подсистем (функции $f_1 - f_{12}$);
- 2) создать математическую модель системы;
- 3) провести проверку адекватности математической модели;
- 4) разработать алгоритм и программу, пригодные для практического использования;

5) разработать практические рекомендации по обоснованию целесообразности развития воднотранспортных систем на водных путях местного значения.

На решение перечисленных задач направлены дальнейшие исследования авторов.

Список литературы:

- [1] Постановление правительства РФ от 16 ноября 2009 г. n 934.
- [2] Звонков В.В. К вопросу комплексного использования малых рек. М. Речиздат, 1940
- [3] Матлин Г.М. Техничко-экономическое обоснование габаритов водных путей (методическое руководство). М. ЦНИИЭВТ, 1959
- [4] Юмин Н.А., Чегодаева А.А. Выбор оптимальной глубины судового хода на малых реках с использованием ЭВЦМ. Труды НИИВТ, вып. 40, Новосибирск, 1968.
- [5] Зачесов В.П. Транспортное использование малых рек Сибири. М. Транспорт, 1985, с-94
- [6] Чалов Р.С. Управление русловыми процессами как основа совершенствования водных путей. Вестник московского университета серия 5 География, Издательство московского университета, № 3, 2017
- [7] Гладков Г.Л., Теоретические основы расчетного обоснования путевых мероприятий на судоходных реках. Журнал университета водных коммуникаций, Выпуск 2(6), Санкт-Петербург, 2010.
- [8] Гладков Г.Л. Обеспечение условий судоходства на внутренних водных путях. Наука и транспорт. 2014, №1: Морской и речной транспорт, стр. 8–14.
- [9] Буянова Л.Н., Королева Е.А. Инновационные подходы к управлению грузопотоками на водном транспорте. Transport Business in Russia, №5, 2017
- [10] Пантина Т.А., Королева Е.А. Обоснование стратегических направлений развития водного транспорта новгородской области. Журнал университета водных коммуникаций. Санкт-Петербург, Выпуск 2, 2009.
- [11] Персианов В.А., Сакульева Т.Н. Сущность системного подхода и его применение на транспорте. Вестник университета (ГУУ), № 12, 2014.
- [12] Данелян Т. Я. Структурное моделирование, Статистика и математические методы в экономике №6, 2014
- [13] Спицнадель В.Н. Основы системного анализа: учебное пособие. – СПб.: «изд. Дом «Бизнес-пресса», 2000 г. – 326 с.
- [14] Беяева М.А. Моделирование систем. М.: МГУП имени Ивана Федорова. – 188 с., 2012 г.
- [15] Власюк Т.А. Моделирование взаимодействия железнодорожного и автомобильного транспорта по обслуживанию пассажиропотоков в крупных городах. Транспорт: наука, техника, управление 2013 г., № 7
- [16] Галин А.В. Внутренние водные пути как часть транспортной инфраструктуры страны, Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. – 2014. – №1(23). – С. 120–124.
- [17] Мустакаева Е. А. Классификация факторов развития инфраструктуры внутреннего водного транспорта. Журнал университета водных коммуникаций. Выпуск 2, 2013.
- [18] Инвестиции в развитие транспортной инфраструктуры РwС – «Прайсвотерхаус Куперс Раша Б.В.», 2012, ru.investinrussia.com.
- [19] Гулакова О.И. Теоретико-методологические основы измерения общественного эффекта инфраструктурных проектов. Вестник НГУ. серия: Социально-экономические науки. 2012. том 12, выпуск 4.

CONCEPTUAL MODEL OF EVALUATING THE VITALITY OF DEVELOPMENT OF WATER TRANSPORT SYSTEMS ON WATERWAYS OF LOCAL VALUE

Sergeev Sergey N., *Rukovoditel' FBU «Administraciya Kamvodput'»,
20a, Sovetskaya st, Perm', 614000*

Urtmintsev Yuriy N., *professor, Doctor of Engineering Science
Volga State University of Water Transport*

Zheleznov Sergey V., *docent, Candidate of Engineering Science
Volga State University of Water Transport*

Malishkin Aleksandr G., *professor, Doctor of Engineering Science*

Volga State University of Water Transport
5, Nesterov st, Nizhniy Novgorod, 603951

Keywords: system analysis, conceptual modeling, transport system, local waterways, shipping, water transport infrastructure, the redistribution of cargo traffic, public efficiency.

Annotation. In recent decades, the use of small rivers for navigation has deteriorated sharply in Russia. Most regional traffic flows have shifted to road transport, resulting in a significant increase in the burden on the land transport network and the environment. The article deals with the problem of development of waterways of local importance (small rivers) and switching to them part of the traffic from road transport. The influence of the organization of river transport on the transport system of the region as a whole and the external environment is studied. A methodological approach for a comprehensive assessment of the socio-economic, social and environmental impact of the development of the regional water transport subsystem is developed. The use of this approach makes it possible to assess the feasibility of resuming navigation on small rivers and to determine the rational parameters of the fleet and waterway.

References:

- [1] Postanovlenie pravitel'stva RF ot 16 noyabrya 2009 g. n 934.
- [2] Zvonkov V.V. K voprosu kompleksnogo ispol'zovaniya mal'kh rek. M. Rechizdat, 1940
- [3] Matlin G.M. Tekhniko-ekonomicheskoe obosnovanie gabaritov vodnykh putej (metodicheskoe rukovodstvo). M. CNIEVT, 1959
- [4] Yumin N.A., Chegodaeva A.A. Vybora optimal'noj glubiny sudovogo hoda na mal'kh rekah s ispol'zovaniem EVCМ. Trudy NIIVT, vyp. 40, Novosibirsk, 1968.
- [5] Zachesov V.P. Transportnoe ispol'zovanie mal'kh rek Sibiri. M. Transport, 1985, s-94
- [6] Chalov R.S. Upravlenie uslovnyimi processami kak osnova sovershenstvovaniya vodnykh putej. Vestnik moskovskogo universiteta seriya 5 Geografiya, Izdatel'stvo moskovskogo universiteta, №3, 2017
- [7] Gladkov G. L., Teoreticheskie osnovy raschetnogo obosnovaniya putevykh meropriyatij na sudohodnykh rekah. Zhurnal universiteta vodnykh kommunikacij., Vypusk 2(6), Sankt-Peterburg, 2010.
- [8] Gladkov G. L. Obespechenie uslovij sudohodstva na vnutrennih vodnykh putyakh. Nauka i transport. 2014, №1: Morskoj i rechnoj transport, str. 8-14
- [9] Buyanova L.N., Koroleva E.A. Innovacionnye podhody k upravleniyu gruzopotokami na vodnom transporte. TransportBusinessinRussia, №5, 2017
- [10] Pantina T.A., Koroleva E.A. Obosnovanie strategicheskikh napravlenij razvitiya vodnogo transporta novgorodskoj oblasti. Zhurnal universiteta vodnykh kommunikacij. Sankt-Peterburg, Vypusk 2, 2009.
- [11] Persianov V.A., Sakul'eva T.N. Sushchnost' sistemnogo podhoda i ego primenenie na transporte. Vestnik universiteta (GUU), № 12, 2014.
- [12] Danelyan T. YA. Strukturnoe modelirovanie, Statistika i matematicheskie metody v ekonomike №6, 2014
- [13] Spicnadel' V. N. Osnovy sistemnogo analiza: uchebnoe posobie. – SPb.: «izd. Dom«Business-pressa», 2000 g. – 326 s.
- [14] Belyaeva M.A. Modelirovanie sistem. M.: MGUP imeni Ivana Fedorova. – 188 s., 2012g.
- [15] Vlasyuk T.A. Modelirovanie vzaimodejstviya zheleznodorozhnogo i avtomobil'nogo transporta po obsluzhivaniyu passazhiropotokov v krupnykh gorodakh. Transport: nauka, tekhnika, upravlenie 2013 g., № 7
- [16] Galin A.V. Vnutrennie vodnye puti kak chast' transportnoj infrastruktury strany, Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova. – 2014. – №1(23). – С. 120-124.
- [17] Mustakaeva E. A. Klassifikaciya faktorov razvitiya infrastruktury vnutrennego vodnogo transporta. Zhurnal universiteta vodnykh kommunikacij. Vypusk 2, 2013.
- [18] Investicii v razvitie transportnoj infrastruktury RWS – «Prajsvoterhaus Kupers Rasha B.V.», 2012, ru.investinrussia.com.
- [19] Gulakova O.I. Teoretiko-metodologicheskie osnovy izmereniya obshchestvennogo effekta infrastrukturykh proektov. Vestnik NGU. seriya: Social'no-ekonomicheskie nauki. 2012. tom 12, vypusk 4.

Статья поступила в редакцию 11.07.2019 г.

Раздел IV

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



Section IV

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

УДК 656.61.052:378.147

Бажанкин Юрий Владимирович, доцент кафедры судовождения и безопасности судоходства ФГБОУ ВО «ВГУВТ»,

e-mail: fsz@vgavt-nn.ru

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Волжский государственный университет водного транспорта» (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»)

603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТРЕНАЖЕРА НАВИГАЦИОННОЙ ПРОКЛАДКИ В УЧЕБНОМ ПРОЦЕССЕ

Ключевые слова: тренажер, качество обучения, точность определения места судна, навигационная прокладка.

Аннотация. В настоящий момент в морской индустрии широко используются тренажеры для подготовки моряков по программам, предусмотренным Международной конвенцией о подготовке и дипломировании моряков и несении вахты (ПДНВ). Однако тренажерная подготовка может использоваться и для отработки частных навыков. В данной статье рассматривается опыт применения тренажера навигационной прокладки для оценки эффективности использования такого тренажера. В качестве стандартных задач для исследования выбрано определение места судна по двум визуальным ориентирам, а также расчет курса и времени прибытия (по счислению с учетом течения). Приведены условия постановки задач, а также результаты их выполнения обучающимися. Выполнен анализ полученных результатов. Представлено краткое описание интерфейса тренажера навигационной прокладки NS-3000. По результатам исследования делается вывод о преимуществах использования тренажера в процессе обучения перед традиционными способами обучения методом классической навигации.

Введение

В настоящее время в России действуют порядка 70 [1] учебно-тренажерных центров для подготовки членов экипажей судов. Однако такие центры проводят обучение по программам, разработанным в соответствии с Международной конвенцией ПДНВ. Как показывает практика, использование тренажерной подготовки в процессе обучения студентов для отработки базовых навыков, необходимых в работе судоводителя значительно повышает качество овладения такими навыками.

В данной статье рассмотрено использование тренажера навигационной прокладки NS-2005, производства Конструкторского бюро морской техники «Вектор» [2] для отработки навыка определения места судна по двум визуальным пеленгам, а также счисления пути судна с учетом течения.

1. Интерфейс тренажера

Пульт обучаемого (рис. 1) состоит из окна с изображением выбранного имитатора навигационного прибора (с левой стороны экрана) и информационной панели (с правой стороны экрана) [3], [4].

Информационная панель состоит из следующих окон:

- окно задания упражнения, где в текстовом виде представлено задание на выполнение;
- окно полей ввода ответов;
- кнопка вызова калькулятора;
- кнопки переключения имитаторов приборов.

На окне с изображением имитаторов бинокля, секстана, визуального пеленгатора (рис. 2) расположены следующие органы управления:

- переключатели управления углом обзора;
- переключатели шага перемещения;
- кнопки управления наблюдателем.

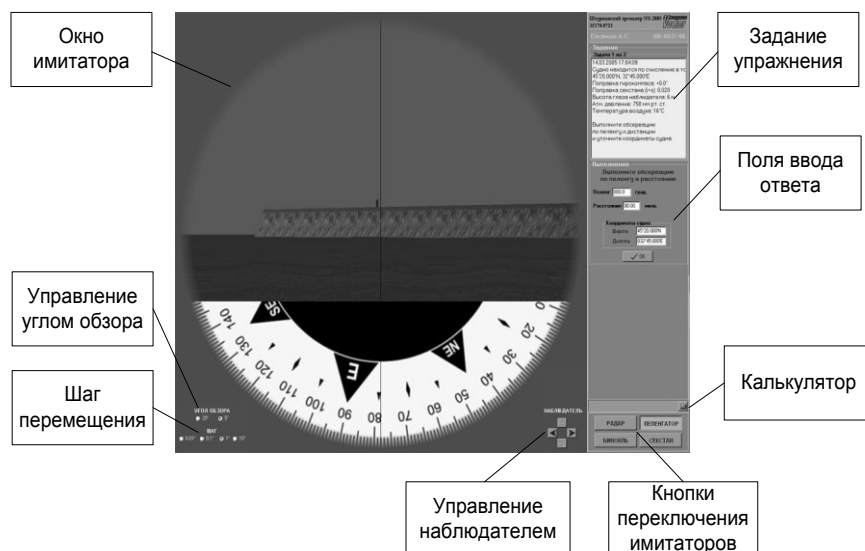


Рис. 1. Окно пульта обучаемого

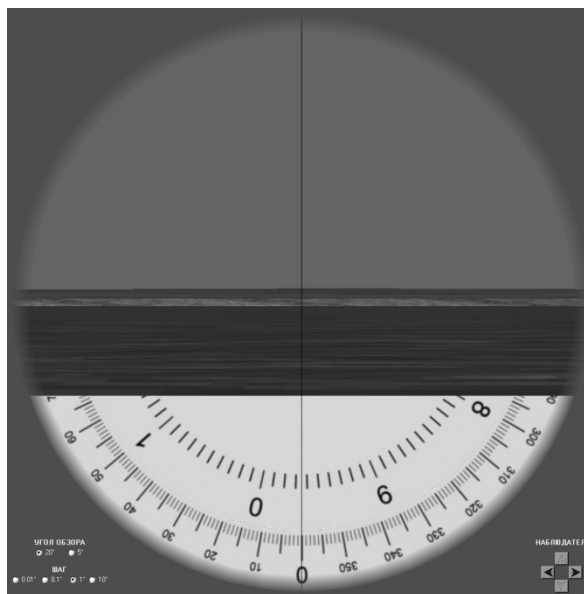


Рис. 2. Имитатор репитера гирокомпаса

В тренажере навигационной прокладки NS-2005 реализованы следующие типы упражнений:

Плавание по счислению:

Расчет координат судна: при решении данной задачи необходимо, пользуясь бумажными навигационными картами и условиями задачи, рассчитать и ввести в про-

грамму следующие параметры:

- широту путевой точки;
- долготу путевой точки;
- пройденный путь относительно воды.

Расчет координат и отсчет лага: при решении данной задачи необходимо, пользуясь бумажными навигационными картами и условиями задачи, рассчитать и ввести в программу следующие параметры:

- широту путевой точки;
- долготу путевой точки;
- пройденный путь относительно воды;
- отсчет лага.

Расчет курса и времени прибытия: при решении данной задачи необходимо, пользуясь бумажными навигационными картами и условиями задачи, рассчитать и ввести в программу следующие параметры:

- время прибытия в путевую точку;
- курс по гирокомпасу;
- пройденный путь относительно воды;
- отсчет лага.

Обсервация – при выполнении данного типа упражнения необходимо, пользуясь имитаторами бинокля, секстана, визуального пеленгатора и РЛС, выполнить определение места судна, уточнить координаты судна, и полученные данные ввести в поле ввода ответов упражнения.

Упражнение данного типа требует выполнить обсервацию заданным инструктором способом:

- по пеленгу и дистанции,
- по двум пеленгам,
- по двум дистанциям,
- по трем пеленгам,
- по трем дистанциям,
- по двум горизонтальным углам;

По каждому типу задачи необходимо:

- Ввести полученные отсчеты (пеленги и дистанции);
- Рассчитать и ввести координаты судна (широту и долготу)

Проводка судна при выполнении данного типа упражнения обучаемому необходимо выполнить проводку судна по заданному инструктором маршруту с максимальной точностью попадания в каждую маршрутную точку. В процессе выполнения упражнения обучаемому выдаются показания:

- Судовых часов;
- Имитатора приемника GPS;
- Гирокомпаса;
- Лага;
- Эхолота.

Пользуясь имитаторами бинокля, секстана, визуального пеленгатора и РЛС, обучаемому необходимо определить новые параметры движения судна (гирокомпасный курс и скорость по лагу), а также задать время проведения следующей обсервации.

В настоящей работе рассмотрено выполнение двух типов задач:

- определение места судна по двум пеленгам;
- расчет курса и времени прибытия (по счислению с учетом течения).

2. Постановка задачи по определению места судна

Условия задачи: студенту необходимо, находясь в какой-то точке тренажерной сцены, опознать имеющиеся ориентиры, измерить значения пеленгов двух ориенти-

ров, выполнить прокладку пеленгов на карте и определить координаты обсервованной точки.

По условиям задачи судно находится в случайно выбранной точке района радиусом 2 морские мили. Центр района задается инструктором при составлении задачи. Таким образом, при каждом повторении решения задачи студентом, истинное место судна смещается и текущие условия задачи не повторяются, что позволяет отрабатывать именно навык, а не конкретный случай.

Оценим теоретическую радиальную среднюю квадратическую погрешность (СКП) при определении места судна для точки, заданной инструктором. Координаты судна, заданные инструктором, вокруг которых происходит разброс точек выдаваемых обучаемым: $\varphi = 44^{\circ}42,8'N$ $\lambda = 34^{\circ}54,2'E$. Для того, чтобы привести все выполненные задачи к единой системе, студентам предписывается измерять значения пеленгов на маяки Меганом и Башенный. Оценка радиальной СКП места судна выполняется по формуле (1) [5]:

$$M_0 = \frac{m_{\Pi}^0}{57,3^{\circ} \sin \Theta} \sqrt{D_1^2 + D_2^2}, \quad (1)$$

где: m_{Π}^0 – СКП измерения визуального пеленга;

Θ – угол между пеленгами;

D_1^2 – дистанция до первого ориентира;

D_2^2 – дистанция до второго ориентира.

В соответствии с «Наставлением по штурманской службе на судах Минречфлота РСФСР» СКП измерения визуального пеленга составляет $0,7^{\circ}$ [6]. Дистанция от заданной точки до мыса Меганом составляет 9,0 морских миль, дистанция до маяка Башенный – 8,7 морских миль. Острый угол пересечения пеленгов равен $75,3^{\circ}$, что входит в пределы рекомендуемой разницы пеленгов.

Таким образом, теоретическая радиальная СКП места судна рассчитанная по формуле (1) будет равна 0,16 морской мили или 1,6 кабельтова с вероятностью $P=63,2\%$ или 0,32 морской мили или 3,2 кабельтова с вероятностью $95,4\%$.

3. Результаты выполнения задач

В процессе проведения исследований были записаны результаты определения места судна 30 студентами. Каждый студент выполнял по 5 попыток. В результате обработки данных были получены отклонения рассчитанного обучаемым места судна от его истинного значения.

В качестве вероятнейшего значения ошибки определения места судна обучаемыми было взято среднее арифметическое из всех ошибок в данной попытке. Результаты представлены в виде табл. 1.

Таблица 1

№ попытки	1	2	3	4	5
Среднее значение ошибки, кбт.	9,40	6,80	3,17	1,44	1,01
Мах. значение ошибки, кбт.	19,40	17,60	12,30	4,00	2,00
Min. значение ошибки, кбт.	1,30	1,10	0,70	0,30	0,20

Для наглядности результатов, представим данные в графическом виде на рис. 3.

Как видно из приведенных данных, точность определения места судна резко па-

дает с увеличением количества выполненных подходов к отработке задачи. Также значительно уменьшается размах между максимальным и минимальным значением ошибки.

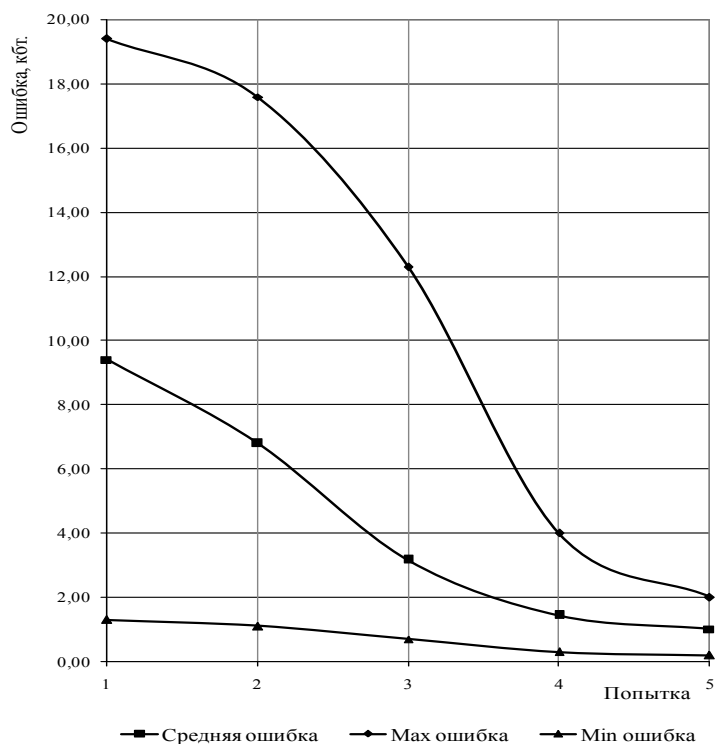


Рис. 3. Значения ошибок определения места судна

Из характера кривых, представленных на рис. 3, видно, что уже к четвертому подходу происходит «насыщение» навыка. Кроме того, существуют объективные причины невозможности увеличения точности определения места судна, связанные с масштабом используемой карты и погрешностями измерения и прокладки навигационных параметров.

4. Постановка задачи по счислению пути судна

Условия задачи: студенту необходимо, выполнив графические построения на карте, рассчитать параметры движения судна (гирокомпасный курс, путь относительно воды, отсчет лага и время плавания) из одной путевой точки в другую. Путевые точки задаются инструктором при составлении задания. Координаты таких точек при выдаче тренажером студенту случайным образом варьируются в пределах окружности радиусом в 1 морскую милю относительно заданной инструктором точки. Также случайным образом формируются направление и скорость постоянного течения, действующего на тренажерное судно.

Для самоконтроля графические построения проверяются с помощью таблиц «Course and distance (speed) over the ground» пособия [7]. По введенным обучаемым параметрам движения судна система рассчитывает конечные координаты точки прибытия и, сравнивая их с заданными, определяет отклонение полученной точки.

Определим теоретическую радиальную СКП счислимого места судна при следующих условиях: путевой угол (ПУ) между маршрутными точками $275,3^\circ$, дистанция

8,5 морских мили. Скорость судна 8 узлов, истинный курс (ИК) 270°. Скорость течения 0,9 узла, направление течения 330,0°. радиальная СКП счислимого места определяется по формуле (2) [8]:

$$M_c = \pm t \cdot \sqrt{\left(\frac{v_{\Delta L} \cdot m_{\Delta L}}{100}\right)^2 + \left(\frac{m_{K_T}^0 \cdot v_T}{57,3^0}\right)^2 + (m_{v_T})^2}, \quad (2)$$

где: t - время плавания по счислению;

$v_{\Delta L}$ - скорость судна по лагу, уз.;

$m_{\Delta L}$ - результат действия ошибки в поправке лага, принимается 3% у хорошо выверенного лага;

$m_{K_T}^0$ - результат действия ошибки в направлении учитываемого течения, град., в хорошо изученных районах принимается 25 град.;

m_{v_T} - результат ошибки в скорости учитываемого течения, принимается равным 33 % от скорости течения.

Таким образом, теоретическая радиальная СКП счислимого места судна, рассчитанная по формуле (2), будет равна 0,49 морской мили или 4,9 кабельтова с вероятностью $P = 63,2\%$ или 0,98 морской мили или 9,8 кабельтова с вероятностью 95,4 %.

5. Результаты выполнения задачи по счислению пути судна

В процессе проведения исследований были записаны результаты определения места судна 30 студентами. Каждый студент выполнял по 4 попытки. В результате обработки данных были получены отклонения рассчитанного обучаемым места судна от его истинного значения.

В качестве вероятнейшего значения ошибки определения места судна обучаемыми было взято среднее арифметическое из всех ошибок в данной попытке. Результаты представлены в виде табл. 2.

Таблица 2

№ попытки	1	2	3	4
Среднее значение ошибки, кбт.	2,28	2,14	1,84	0,40
Мах. значение ошибки, кбт.	8,00	7,10	5,20	1,20
Min. значение ошибки, кбт.	0,80	0,50	0,10	0,10

Для наглядности результатов представим данные в графическом виде на рис. 4.

Как видно из полученных результатов, в целом динамика улучшения навыка схожа с динамикой навыка по определению места судна. Кроме того, даже максимальная погрешность в полученном счислимом месте судна гораздо меньше теоретической погрешности рассчитанной по формуле (2).

Выводы

Очевидно, что традиционный подход к проведению практических занятий, связанных с отработкой навыков по определению места судна тоже ведет к увеличению точности с увеличением количества повторений. Однако использование тренажера навигационной прокладки имеет следующие плюсы:

- отрабатывается не выполнение конкретной задачи с определенными параметрами, а навык выполнения комплекса процедур, связанных с определением места судна;
- в комплекс процедур входит не только нанесение места судна по известным

значениям навигационных параметров, но и опознание ориентиров на местности и на карте, измерение и исправление навигационных параметров;

– условия задачи случайным образом варьируются, что исключает возможность заимствования результатов у другого обучаемого;

– возможность автоматизированной оценки качества выполнения задачи, что исключает фактор субъективности преподавателя;

– автоматизированное ведение журнала результатов выполнения задач, что позволяет проводить развернутый анализ динамики навыков каждого обучаемого.

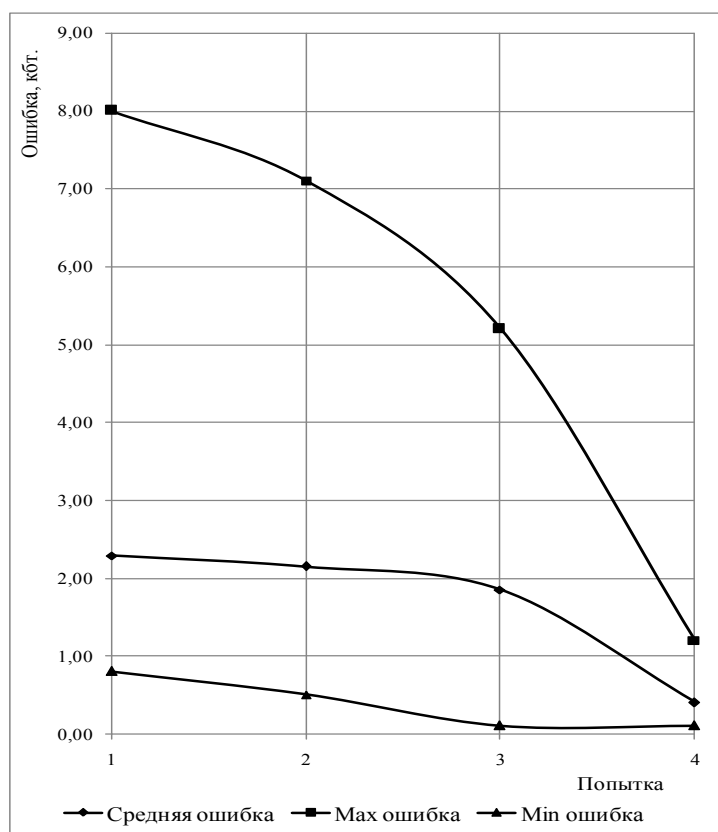


Рис. 4. Значения ошибок определения числимого места судна

Таким образом, использование тренажера навигационной прокладки позволяет повысить качество овладения компетенцией, связанной с определением места судна по наземным ориентирам и указанной в правиле II/1 Международной Конвенции ПДНВ [9].

К сожалению, на российском рынке подобные тренажеры весьма скудно представлены, что затрудняет проведение конкурсов на закупку подобных решений образовательными организациями.

Список литературы:

- [1] Татьяна Дмитриева. Развитие учебно-тренажерной подготовки моряков в России. Морские вести России. <http://www.morvesti.ru/tems/detail.php?ID=29531>
- [2] ООО КБ «Вектор» <http://www.vector-marine.ru/ru/produktsiya/trenazhernaya-produktsiya/ns-3000>
- [3] Конструкторское бюро морской электроники «Вектор». Тренажер навигационной прокладки NS-2005. Руководство инструктора. Таганрог 2006 г.

- [4] Бажанкин Ю.В. Использование тренажера навигационной прокладки. / Ю.В. Бажанкин. - Н.Новгород: изд-во ФБОУ ВПО «ВГАВТ», 2014. – 25 с.
- [5] Дмитриев, В.И., Григорян В.Л., Котенин В.А. Навигация и лоция: учебник для вузов. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2007. – 471 с.
- [6] Наставление по штурманской службе на судах Минречфлота РСФСР. Ч. III (НШСМ-86) / МРФ РСФСР. – Л.: Транспорт, Ленинградское отделение, 1987. – 144 с.
- [7] Brown's nautical almanac. Edited by T. Nigel Brown. Brown, Son & Fergusson, LTD. 4-10 Darnley street, Glasgow, G41 2SD, 2010.
- [8] Основы морского судоходства. Учебник для вузов / Фат'янов Р.Н., Семёнов Ю.К., Костюков Б.Н., Милославская Е.П. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Транспорт, 1985. 344 с.
- [9] International Convention STCW (Standards of Training, Certification, & Watchkeeping for Seafarers) including 2010 Manila amendments. International Maritime Organization; 4th ed., 2017 edition (January 1, 2018). ISBN-13: 978-9280116359

USING OF NAVIGATIONAL PLOTTING SIMULATOR FOR TRAINING PROCESS

Bazhankin Yuriy V., *Candidat of Engineering Science, Associate Professor
of the Department of Ship Handling and Safety of Navigation
Volga State University of Water Transport,
5, Nesterov st, Nizhniy Novgorod, 603951*

Keywords: *simulator, quality of training, accuracy of ship position fix, navigational plot.*

Annotation. *Nowadays simulators are widely used in maritime industry for STCW courses training. However, simulators may be used for particular skills training. This article describes experience of using of navigational plot simulator to evaluate efficiency of using this kind of simulator. Fixing by two beacons and dead reckoning with set and drift were taken as standard task for trainees. Conditions of task as well as results are shown in the article. The analysis of obtained results is done. Review of NS-3000 navigational plotting simulator is presented. The conclusion about advantages of using navigational plotting simulator over traditional methods of teaching Navigation is made.*

References

- [1] Tat'jana Dmitrieva. Razvitiye uchebno-trenazhernoj podgotovki morjakov v Rossii. Morskij vestnik Rossii. <http://www.morvesti.ru/tems/detail.php?ID=29531>
- [2] ООО КВ «Вектор» <http://www.vector-marine.ru/ru/produktsiya/trenazhernaya-produktsiya/ns-3000>
- [3] Конструкторско-объёмно-морской электроники «Вектор». Trenazhernavigacionnoj prokladki NS-2005. Rukovodstvo instruktora. Taganrog 2006 g.
- [4] Bazhankin Ju.V. Ispol'zovanie trenazhera navigacionnoj prokladki. / Ju.V. Bazhankin. - N. Novgorod: izd-vo FBOU VPO «VGA VT», 2014. – 25 s.
- [5] Dmitriev, V.I., Grigorjan V.L., Kotenin V.A. Navigacija i locija: uchebnik dlja vuzov. – M.: IKC «Akademkniga», 2007. – 471 s.
- [6] Nastavlenie poshturmanskoslužbe na sudah Minrechflota RSFSR. Ch. III (NShSM-86) / MRF RSFSR. – L.: Transport, Leningradskoe otделение, 1987. – 144 s.
- [7] Brown's nautical almanac. Edited by T. Nigel Brown. BROWN, SON & FERGUSSON, LTD. 4-10 Darnley street, Glasgow, G41 2SD, 2010.
- [8] Osnovymorskogosudovozhdenija. Uchebnik dlja vuzov / Fat'janov R.N., Semjonov Ju.K., Kostjukov B.N., Miloslavskaja E.P. – 2-e izd., pererab. idop. – M.: Transport, 1985. 344 s.
- [9] International Convention STCW (Standards of Training, Certification, & Watchkeeping for Seafarers) including 2010 Manila amendments. International Maritime Organization; 4th ed., 2017 edition (January 1, 2018). ISBN-13: 978-9280116359

Статья поступила в редакцию 31.05.2019 г.

УДК 656.62 (338.4)

Казаков Николай Николаевич, проректор по учебной работе

УО «БелГУТ», e-mail: koliandr@tut.by

Учреждение образования «Белорусский государственный университет транспорта» (УО «БелГУТ»)

246653, Республика Беларусь, г. Гомель, ул. Кирова, 34

ИНСТРУМЕНТАРИЙ МОДЕЛИРОВАНИЯ СОСТОЯНИЯ ВОДНОТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ В УСЛОВИЯХ ЕЕ ИННОВАЦИОННОГО РАЗВИТИЯ

Ключевые слова: воднотранспортная система, методология, инструментарий моделирования, инновационное развитие, имитационная модель, модульный принцип, алгоритм, ключевые показатели эффективности, трудоемкость моделирования

Аннотация. В статье содержатся обоснования по выбору инструментария, который целесообразно использовать при моделировании состояния региональной воднотранспортной системы в условиях ее инновационного развития. Охарактеризована актуальность исследования для условий Республики Беларусь и ее подотрасли водного транспорта. Приведена характеристика принципа актуализации методологии обеспечения инновационных процедур подотрасли и предложен алгоритм их реализации. Выполнено обоснование выбора метода моделирования состояний вектора развития воднотранспортной системы для условий Республики Беларусь и охарактеризованы параметры моделирования. Приведены принципы формирования имитационной модели воднотранспортной системы и предложен алгоритм моделирования ее состояния в среднесрочной перспективе. Обозначена проблема оптимизации трудоемкости имитационного моделирования при обеспечении достаточной детализации модели и приемлемой точности изысканий. Даны предложения по совершенствованию инструментария в направлении использования возможностей искусственных нейронных сетей.

Введение

В обеспечении темпов развития экономики Республики Беларусь на период до 2030 года, установленных важнейшими стратегическими документами национального уровня [1, 2], транспортный комплекс играет крайне важное значение. Задачи развития отрасли намечены к реализации в соответствии со стратегией развития транспортного комплекса до 2030 года [3], где главным составляющим эффектом является развитие всех видов транспорта с инновационными темпами.

Воднотранспортная система Республики Беларусь, имея ярко выраженную специфику (компактность, обособленность бассейнов, высокая меандрируемость русел, низкая эффективность основной деятельности), обладает значительным потенциалом развития. В долгосрочных интересах государства водному транспорту уделена весомая роль участника транспортно-логистических схем доставки в зоне тяготения IX транспортного коридора с формированием ряда макроэкономических эффектов.

Для успешного решения данной задачи необходимо реализовать целый ряд проектов развития подотрасли, которые в своей совокупности формируют вектор развития воднотранспортной системы страны. Именно поэтому для минимизации макроэкономических рисков требуется: во-первых, актуальная методологическая база обеспечения эффективности перевозок водным транспортом [4]; во-вторых, инструментарий моделирования различных состояний развития воднотранспортной системы Республики Беларусь в период до 2030 года.

Принцип актуализации методологической базы обеспечения эффективности перевозок внутренним водным транспортом Республики Беларусь

В современных условиях развития экономики страны, отраслей ее промышленности, транспортного комплекса в составе транспортных коридоров, рассматривать вопросы развития отдельного элемента (воднотранспортной системы), ориентируясь исключительно на внутренние показатели эффективности, является некорректным. В этой связи ключевое значение на разработку варианта развития воднотранспортной системы в перспективе оказывают характеристика и параметры внешних инвестиций.

С другой стороны, внешние или внутренние инвестиции в развитие отрасли могут поступать в нее при обеспечении определенного уровня их эффективности. Таким образом, можно утверждать, что процесс развития воднотранспортной системы должен формировать синергетический эффект, формируемый эффектами региона (объединений стран, страны, ее областей, районов, населенных пунктов), инвесторов (внешних и внутренних) и логистических партнеров (смежные виды транспорта, грузовладельцы, другие участники транспортно-логистических схем доставки).

Несмотря на сложность получаемой системы (количество элементов и связей, различные параметры функционирования, схемы распределения ресурсов и проч.), максимизировать синергетический эффект от ее реализации можно исключительно посредством обеспечения максимальной эффективности использования основных средств каждой подсистемы [5]. Именно по этой причине в основу развития внутреннего водного транспорта Республики Беларусь в период до 2030 года должен быть положен принцип обеспечения эффективности использования его основных средств (транспортного флота), применяемых в составе транспортно-логистических схем с участием железнодорожного транспорта с ограничениями по размерам инвестиционных ресурсов и характеристикам развития инфраструктурных подсистем.

Вследствие высокой стоимости и сложности объекты развития региональных транспортных систем (транспортной инфраструктуры и подвижного состава) имеют длительный инвестиционный цикл и поэтому их невозможно оперативно приспособить к меняющимся условиям, среди которых самыми весомыми в долгосрочной перспективе являются: структура грузопотоков (грузовая база), требования внешних систем (в т.ч. наднационального уровня), темпы развития инноваций в регионе (отрасли, смежных отраслях). Это вызывает необходимость при выработке вектора развития тщательного обоснования структуры, объемов, направлений грузопотоков и динамики их изменения в перспективе, а также выбора мер по развитию инфраструктурных объектов и конкретных сроков осуществления этих мер.

Руководствуясь вышеуказанным требованием, приняв за основу разработки вектора развития воднотранспортной системы двухуровневую модель обеспечения инновационных процедур [6], позволяющую осуществлять оптимизацию инвестиционной политики на верхних иерархических уровнях, а также реализуя алгоритм реализации процедур инновационного развития региональной воднотранспортной системы, охарактеризованный ниже, актуализируется методологическая база обеспечения инновационного развития воднотранспортной системы Республики Беларусь до 2030 года с максимальным эффектом.

Алгоритм реализации процедур инновационного развития воднотранспортной системы Республики Беларусь

Процедура обеспечения инновационного развития региональной воднотранспортной системы должна базироваться на методологии оценки синергетического эффекта по ключевым показателям эффективности [7, 8] и быть итеративной. Алгоритм такой процедуры представлен на рис. 1.

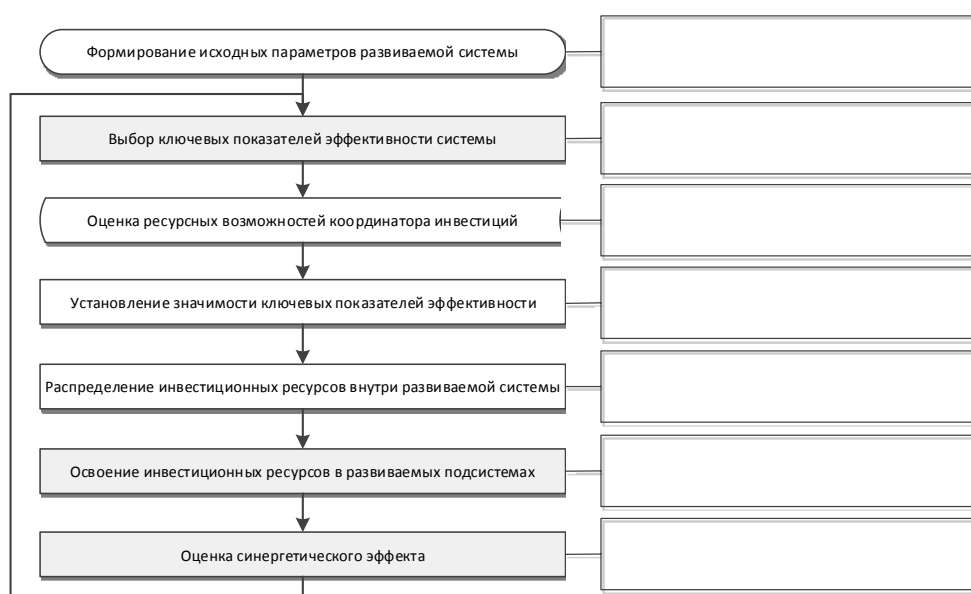


Рис. 1. Алгоритм реализации процедур инновационного развития региональной воднотранспортной системы

По результатам исследования теоретико-методологических аспектов развития эксплуатационной науки водного транспорта, тенденций, характерных для воднотранспортной системы Республики Беларусь и с учетом задач ее развития до 2030 года [9], в качестве ключевых показателей эффективности в первом приближении целесообразно использовать множество

$$\{P_{BBT}\} = \{p_e, \eta_G, \eta_{Gl}, r\}, \quad (1)$$

где p_e – валовая производительность работы флота на перевозках, т·км/кВт·сут;

η_G, η_{Gl} – доли участия внутреннего водного транспорта в транспортной деятельности страны, соответственно в размере перевозок и грузообороте, %;

r – инвестиционный ресурс на реализацию варианта развития, млн USD.

Выбор метода моделирования состояния воднотранспортной системы в условиях ее инновационного развития

Выбор в качестве ключевых показателей эффективности модели инновационного развития воднотранспортной системы множества $\{P_{BBT}\}$ требует существенной детализации решения рассматриваемой задачи с позиции технологического и инвестиционного обеспечения процедур транспортно-логистического проектирования [10].

В данной сфере могут быть применимы различные методы и способы решения оптимизационной задачи. Однако тот факт, что развитие внутреннего водного транспорта Республики Беларусь, с одной стороны, рассматривается как задача, формирующая эффект в среднесрочной перспективе, причем флотом, которого нет в наличии в настоящее время и эффективность его использования во многом определяется технологией взаимодействия со смежными видами транспорта, а с другой стороны – исследуемая система обладает достаточно простой топологией, определяет целесообразность применения в качестве инструмента исследования поведения развиваемой системы, метода имитационного моделирования с параметрами, представленными на рис. 2.

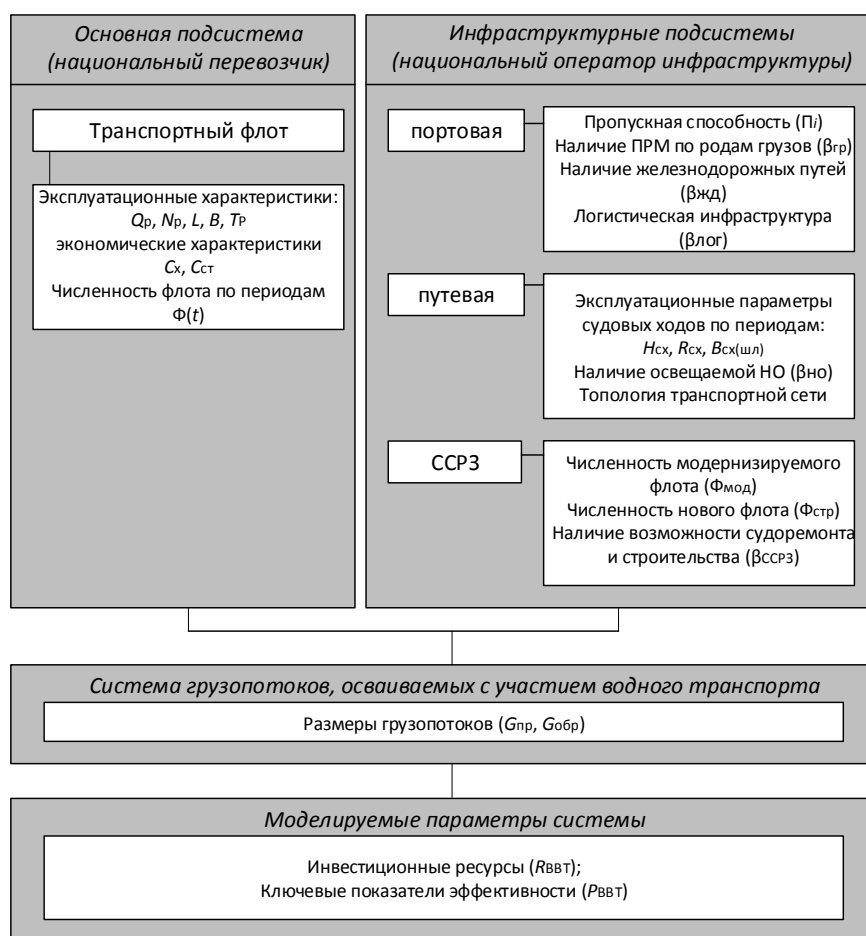


Рис. 2. Параметры моделирования состояния воднотранспортной системы

Принципы формирования имитационной модели региональной воднотранспортной системы

При моделировании работы развиваемой системы в целях алгоритмической унификации использовался принцип построения универсальных имитационных моделей [11–13]: все элементы изучаемой системы математически описываются единообразно в виде модуля, процесс функционирования которого представлен последовательной сменой его состояний, описываемых выражением

$$M^j = \left[\begin{array}{c} S^{j-1} \xrightarrow{A_{пер}^j} S^j \\ I^j \xrightarrow{A_{преоб}^j} F^j \end{array} \right]. \quad (2)$$

В результате нагрузки I^j на модуль M^j посредством алгоритма перехода одного состояния модуля в другое $A_{пер}^j$ вырабатывается вектор нового состояния модуля S^j , а посредством алгоритма преобразования $A_{преоб}^j$ нагрузки в выходящий поток в модуле вырабатывается вектор F^j выходящего потока. То есть модуль j -го порядка может быть однозначно задан совокупностью векторов I^j, F^j, S^j , алгоритмов $A_{пер}^j, A_{преоб}^j$, задач b , решаемых модулем и множеством моментов моделируемого времени t :

$$M_b^j = (t, I^j, F^j, S^j, A_{пер}^j, A_{преоб}^j). \quad (3)$$

Следовательно, математической моделью системы, используемой для формального описания сопряжения модулей, являются множества

$$\bigcup_{i=1}^{n_{вх}} I, \bigcup_{i=1}^{n_{вых}} F, \bigcup_{i=1}^{n_{сост}} S, \bigcup_{i=1}^{n_{пер}} A_{пер}, \bigcup_{i=1}^{n_{преоб}} A_{преоб}, \quad (4)$$

где $n_{вх}$, $n_{вых}$ – соответственно, количество входящих и выходящих потоков системы;

$n_{сост}$ – количество возможных состояний системы;

$n_{пер}$, $n_{преоб}$ – количество алгоритмов перехода одного состояния в другое и алгоритмов преобразования входящих потоков в выходящие.

На основании модульного принципа задается структура имитационной модели воднотранспортной системы (модуля 0-го порядка), которая объединяет в себя:

– модули, адекватно описывающие элементарные технологические операции (оформление документов, постановка судна на рейд, перевалка из вагонов в суда, маневровые операции с вагонами и т.п.) – модули 4-го порядка;

– модули, характеризующие операции перевозочного процесса (обслуживание железнодорожного подвижного состава на технической станции, движение флота по участку водного пути; паузка и т.п.), состоящие из элементарных модулей – модули 3-го порядка;

– модули, адекватно описывающие работу мультимодальных грузовых линий, состоящие из модулей 3-го порядка – модули 2-го порядка;

– модули, описывающие взаимодействие мультимодальных грузовых линий в течение одного навигационного периода, состоящие из модулей 2-го порядка – модули 1-го порядка.

При формировании имитационной модели работы воднотранспортной системы в составе транспортно-логистических схем доставки, элементарные операции (модули 4-го порядка) и принципы их взаимодействия в составе модулей 3-го – 1-го порядков могут быть приняты из [14].

Тогда принцип формирования модуля 0-го порядка состоит в изменениях входящего потока I^j на уровне 1-го порядка, которые определяются состоянием инфраструктурных подсистем на момент времени t и вариантом развития воднотранспортной системы по параметрам, представленным на рис. 2.

Алгоритм имитационного моделирования работы воднотранспортной системы до 2030 года

Постановка задачи реализации процедур инновационного развития воднотранспортной системы Республики Беларусь (см. рис. 1) и принципов имитационного моделирования значений ее параметров может быть реализовано посредством алгоритма представленного на рис. 3.

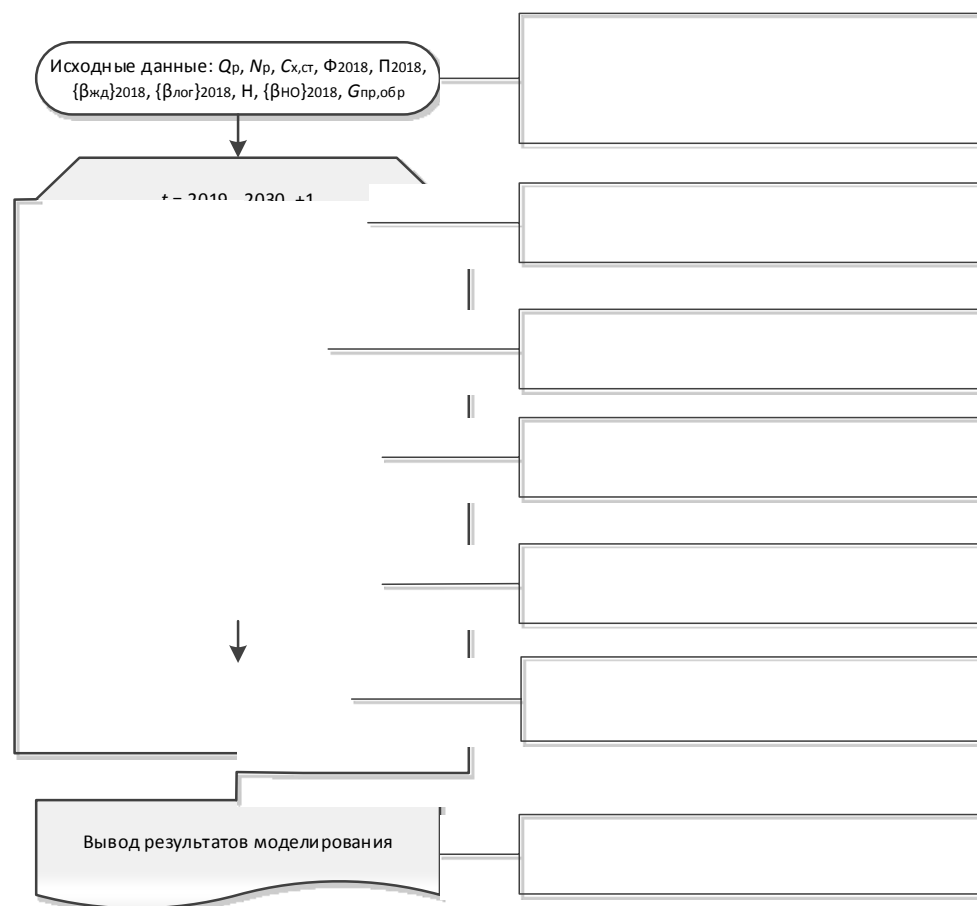
Несложно заметить, что актуальность модели и ее соответствие требуемому уровню опережающего развития отрасли определяет частота пересмотра ключевых показателей эффективности [15].

Проблема снижения трудоемкости имитационного моделирования воднотранспортной системы

При реализации имитационной модели такой сложной системы, как подотрасль водного транспорта, среди прочих, актуальной становится проблема снижения трудоемкости решения задачи с сохранением оптимальной детализации.

На рис. 4 представлены зависимости продолжительности времени моделирования от количества итераций и сложности моделируемой системы, определяемой количеством элементарных модулей: 523 – в качестве элементарных модулей были приняты

Затраты времени моделирования во многом определяются техническими возможностями, требуемой точностью, а в составе предложенного автором подхода (см. рис. 3) и частотой пересмотра ключевых показателей эффективности системы.



Так, при самой слабой детализации моделируемой системы (523 элементарных модуля) для 300 итераций и при реализации модели на том же программно-аппаратном комплексе при частоте пересмотра ключевых показателей эффективности равной 3 (2020, 2025 и 2030 годы) время моделирования составило 4118 минут (при единичном моделировании – 59 минут).

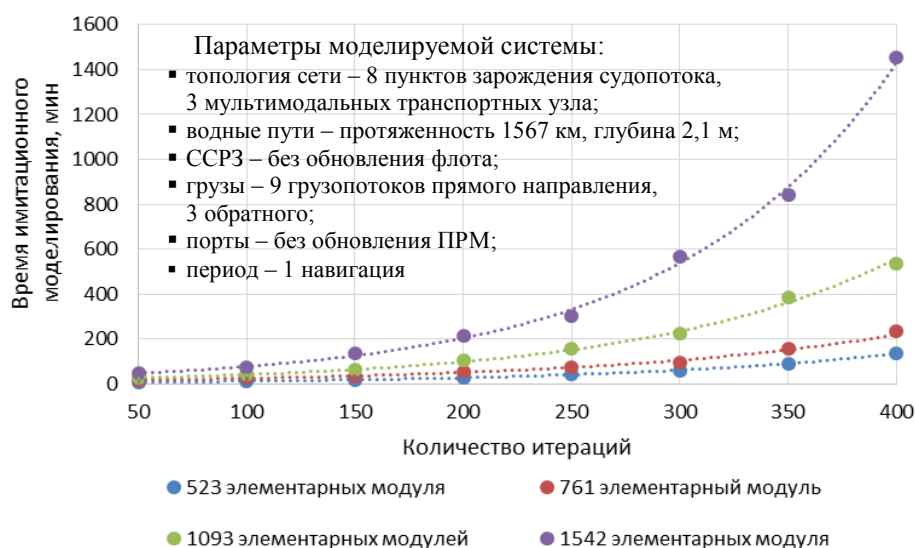


Рис. 4. Зависимость затрат времени от сложности моделируемой системы

Предложения по развитию инструментария моделирования воднотранспортной системы

С позиции рассматриваемой в статье проблемы важно отметить то, что с одной стороны, растущий уровень развития информационных технологий и программного обеспечения, реализующего принципы имитационного моделирования, позволяет сегодня создавать модели очень высокой сложности [16–18]. Но с другой стороны, оптимизация технологий, требующая интеграции на различных стадиях жизненного цикла, вариативность принятия решений по реализации технологии с позиции интересов различных координаторов инвестиционных ресурсов, участников технологического цикла, обеспечивают многократный рост сложности модели, и требует весьма значительных затрат ресурсов.

Одним из способов реализации компромиссного подхода к решению данной проблемы является совмещение опыта применения методов имитационного моделирования, сформированного за многолетнюю практику и хорошо зарекомендовавшего себя при исследованиях поведения сложных систем с возможностями применения технологий искусственных нейронных сетей, широко применяемых в настоящее время [19–23].

Выбор данного метода, помимо прочих аспектов, послуживших его широкому применению, объясняется простотой адаптации структуры и принципов формирования имитационной модели, построенной по модульному принципу, к структуре нейронной сети. Помимо этого, нейронная сеть оптимально сочетает в себе такие характеристики, как быстроедействие и высокая аппроксимирующая способность, позволяя оценивать влияние качественных и количественных параметров в динамике, что идеально сочетается с актуализацией методов оптимизации развития региональных транспортных систем с процедурами инновационного развития.

Список литературы:

[1] Национальная стратегия устойчивого социально-экономического развития Республики Беларусь на период до 2030 года (одобр. протоколом заседания Совета Министров Республики Беларусь от 02 мая 2017 №10).

- [2] Государственная программа развития транспортного комплекса Республики Беларусь на 2016–2020 годы (утв. Постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 28 апреля 2016 г. № 345).
- [3] Стратегия инновационного развития транспортного комплекса Республики Беларусь до 2030 года (утв. Приказом Министерства транспорта и коммуникаций Республики Беларусь от 25.02.2015 № 57-Ц).
- [4] Казаков Н.Н. Актуализация модели инновационного развития воднотранспортной системы // Сборник трудов Международной научно-практической конференции «Транспортные системы: тенденции развития». – М.: МИИТ, 2016. – С. 167–171.
- [5] Инновационный потенциал национальной экономики: приоритетные направления реализации: монография / М.М. Брутян, Е.Э. Головчанская, Т.Е. Даниловских и др. / Под общ. ред. С.С. Чернова. – Новосибирск: Издательство ЦРНС, 2015. – 164 с.
- [6] Казаков Н.Н. Модель реализации процедур инновационного развития региональной транспортной системы // Экономическое развитие регионов и приграничных территорий Евразийского экономического союза (ЕАЭС): сб. науч. тр: Брянск: БГТУ, 2017. – С. 29–34.
- [7] Laursen K. My precious: The role of appropriability strategies in shaping innovative performance / K. Laursen, A. Salter. // Duid Working Paper № 2, 2015. – P. 214–219.
- [8] Комлев Н.Х. Система ключевых показателей эффективности как инструмент совершенствования менеджмента организации // Теория и практика общественного развития. №20. – Краснодар : Издательский дом «Хорс», 2015. – С. 107–109.
- [9] Анализ состояния водного транспорта и разработка задач его инновационного развития / Отчет о выполнении научно-исследовательской работы №8450 от 28.06.2013 – Гомель : БелГУТ, 2013. – 116 с.
- [10] Волюнец Л.М. Научно-методические подходы к сбалансированию показателей устойчивого развития мультимодальных перевозок грузов в международном сообщении // Экономика транспортного комплекса. №32. – Харьков : ХАДИ, 2018. – С. 137 – 150.
- [11] Низамутдинов М.М., Ямилова Л.С. К вопросу о подходах к построению модели экономики регионов // Проблемный анализ и государственно-управленческое проектирование. М.: Ассоциация независимых экспертов «Центр изучения кризисного общества» – 2010. – Т. 3, №4. – С. 52–63.
- [12] Майоров Н. Н. Факторы выбора имитационного моделирования, как универсального средства, для исследования транспортных процессов [Текст] // Проблемы и перспективы экономики и управления : материалы Междунар. науч. конф. (г. Санкт-Петербург, апрель 2012 г.). – СПб.: Реноме, 2012. – С. 224–228.
- [13] Kazakov N. Simulation modeling the group of the multimodal cargo lines including water transport. Transportas (Transport Engineering), Vol XXI. Technika. – Vilnius. – 2006. – №2. – P. 88–94.
- [14] Казаков Н.Н., Терещенко О.А. Имитационное моделирование работы мультимодальной грузовой линии // Вестник Белорусского государственного университета транспорта : Наука и транспорт. – Гомель: БелГУТ – 2008. – № 1. – С. 38–43.
- [15] Volynets L.M. Philosophical and economic approaches to the functioning and sustainable development of transport / L.M.Volynets, I.I.Khalatska, Y.V.Maliarenko // ADVANCES OF SCIENCE: Proceedings of articles the international scientific conference (28 September 2018). – Czech Republic, Karlovy Vary – Ukraine, Kyiv. – 2018. – P. 745–750.
- [16] Карпов Ю. Г. Имитационное моделирование систем. Введение в моделирование с AnyLogic 5 – СПб.: БХВ Петербург, 2006. 400 с.
- [17] Rosales C., Whipple J., Blackhurst J. The Impact of Out-of-Stocks and Supply Chain Design on Manufacturers: Insights from an Agent-Based Model. Transportation Journal, № 57(2), P. 137–162.
- [18] Saroj A., Roy S., Guin A., Hunter M., Fujimoto R. Smart city real-time data-driven transportation simulation // Proceedings of the 2018 Winter Simulation Conference M. Rabe, A.A. Juan, N. Mustafee, A. Skoogh, S. Jain, and B. Johansson, eds. 2018. Geteborg, Sweden. P. 857–868.
- [19] Hinton G., Salakhutdinov R. Reducing the Dimensionality of Data with Neural Networks // Science, 2006. Vol. 313, № 5786. P. 504–507.
- [20] Windisch D. Loading Deep Networks Is Hard: The Pyramidal Case // Neural Computation. 2005. Vol. 17, № 2. P. 487–502.
- [21] Witczak M, Korbicz J, Mrugalski M., et al. A GMDH Neural Network-Based Approach to Robust Fault Diagnosis: Application to the DAMADICS Benchmark Problem // Control Engineering Practice. 2006. Vol. 14, № 6. P. 671–683.

[22] Abadi M., Agarwal A. Barham P. TensorFlow: Large-Scale Machine Learning on Heterogeneous Distributed Systems // Proceedings of the 12th USENIX Symposium on Operating Systems Design and Implementation (OSDI '16) (Savannah, GA, USA, November, 2–4, 2016). 2016. P. 265–283.

TOOL MODELING OF THE CONDITION OF THE WATER TRANSPORTATION SYSTEM OF THE REPUBLIC OF BELARUS IN THE CONDITIONS OF ITS INNOVATIVE DEVELOPMENT

Kazakov Nikolay N., Candidate of Engineering Science, Vice Rector for
Academic Affairs of the Belarusian State University of Transport,
34, Kirov st, Gomel, 246653

Keywords: *water transport system, methodology, modeling tools, innovative development, simulation model, modular basis, algorithm, key performance indicators, modeling labor intensity.*

Annotation. *The article contains the rationale for choosing a methodology that is purposeful and advisable to use when modeling the state of a regional water transport system in terms of its innovative development. It also highlights the relevance of the research for the conditions of the Republic of Belarus and its sub-sector of water transport is also documented. In addition, the characteristic of the principle of updating the methodology of providing innovative procedures of the sub-sector is provided and an algorithm for their implementation is proposed. Moreover, the substantiation of the choice of the method for modeling the states of the vector of development of the water transport system for the conditions of the Republic of Belarus is carried out and the parameters of the simulation are characterized. Furthermore, the principles of the formation of a simulation model of a water transport system are given and an algorithm for modeling its state in the medium term is proposed. The problem of optimizing the complexity of simulation modeling while ensuring sufficient detail of the model and an acceptable accuracy of the survey is also supported and indicated. Finally, suggestions for improving the toolkit in the direction of using the capabilities of artificial neural networks are given.*

References:

- [1] Nacional'naja strategija ustojchivogo social'no-jekonomicheskogo razvitija Respubliki Belarus' na period do 2030 goda (odobr. protokolom zasedanija Soveta Ministrov Respubliki Belarus' ot 02.05.2017 №10).
- [2] Gosudarstvennaja programma razvitija transportnogo kompleksa Respubliki Belarus' na 2016 – 2020 gody (utv. Postanovleniem Soveta Ministrov Respubliki Belarus' ot 28.04.2016. № 345).
- [3] Strategija innovacionnogo razvitija transportnogo kompleksa Respubliki Belarus' do 2030 goda (utv. Prikazom Ministerstva transporta i kommunikacij Respubliki Belarus' ot 25.02.2015 № 57-C).
- [4] Kazakov N.N. Aktualizacija modeli innovacionnogo razvitija vodnotransportnoj sistemy // Sbornik trudov Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii «Transportnye sistemy: tendencii razvitija». – M.: MIIT, 2016. – P. 167–171.
- [5] Innovacionnyj potencial nacional'noj jekonomiki: prioritetye napravlenija realizacii : monografija / M.M. Brutjan, E.Je. Golovchanskaja, T.E. Danilovskih i dr. / Pod obshh. red. S.S. Chernova. – Novosibirsk: Izdatel'stvo CRNS, 2015. – 164 pp.
- [6] Kazakov N.N. Model' realizacii procedur innovacionnogo razvitija regional'noj transportnoj sistemy // Jekonomicheskoe razvitie regionov i prigranichnyh territorij Evrazijskogo jekonomicheskogo sojuza (EAJeS): sb. nauch. tr. Brjansk: BG TU, 2017. – P. 29–34.
- [7] Laursen K. My precious: The role of appropriability strategies in shaping innovative performance / K. Laursen, A. Salter. // Duid Working Paper № 2, 2015. – P. 214–219.
- [8] Komlev N.H. Sistema ključevyh pokazatelej jeffektivnosti kak instrument sovershenstvovanija menedzhmenta organizacii // Teorija i praktika obshhestvennogo razvitija. №20. – Krasnodar : Izdatel'skij dom «Hors», 2015. – P. 107–109.

- [9] Analiz sostojanija vodnogo transporta i razrabotka zadach ego innovacionnogo razvitija / Otchet o vypolnenii nauchno-issledovatel'skoj raboty №8450 ot 28.06.2013 – Gomel' : BelGUT, 2013. – 116 pp.
- [10] Volynec L.M. Nauchno-metodicheskie podhody k sbalansirovaniju pokazatelej ustojchivogo razvitija mul'timodal'nyh perevozok gruzov v mezhdunarodnom soobshhenii // Jekonomika transportnogo kompleksa. №32. – Har'kov : HADI, 2018. – P. 137–150.
- [11] Nizamutdinov M.M., Jamilova L.S. K voprosu o podhodah k postroeniju modeli jekonomiki regionov // Problemnyj analiz i gosudarstvenno-upravlencheskoe proektirovanie. M.: Associacija nezavisimyh jekspertov «Centr izuchenija krizisnogo obshhestva» – 2010. – T. 3, №4. – P. 52–63.
- [12] Majorov N.N. Faktory vybora imitacionnogo modelirovanija, kak universal'nogo sredstva, dlja issledovanija transportnyh processov [Tekst] // Problemy i perspektivy jekonomiki i upravlenija : materialy Mezhdunar. nauch. konf. (g. Sankt-Peterburg, aprel' 2012 g.). – SPb.: Renome, 2012. – P. 224–228.
- [13] Kazakov N. Simulation modeling the group of the multimodal cargo lines including water transport. Transportas (Transport Engineering), Vol XXI. Technika. – Vilnius. – 2006. – №2. – P. 88–94.
- [14] Kazakov N.N., Tereshhenko O.A. Imitacionnoe modelirovanie raboty mul'timodal'noj gruzovoj linii // Vestnik Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta transporta: Nauka i transport. – Gomel': BelGUT – 2008. – № 1. – P. 38–43.
- [15] Volynets L.M. Philosophical and economic approaches to the functioning and sustainable development of transport / L.M.Volynets, I.I.Khalatska, Y.V.Maliarenko // ADVANCES OF SCIENCE: Proceedings of articles the international scientific conference (28 September 2018). – Czech Republic, Karlovy Vary – Ukraine, Kyiv. – 2018. – P. 745–750.
- [16] Karpov Ju. G. Imitacionnoe modelirovanie sistem. Vvedenie v modeli-rovani s AnyLogic 5 – SPb.: BHV Peterburg, 2006. 400 pp.
- [17] Rosales C., Whipple J., Blackhurst J. The Impact of Out-of-Stocks and Supply Chain Design on Manufacturers: Insights from an Agent-Based Model. Transportation Journal, № 57(2), P. 137–162.
- [18] Saroj A., Roy S., Guin A., Hunter M., Fujimoto R. Smart city real-time data-driven transportation simulation // Proceedings of the 2018 Winter Simulation Conference M. Rabe, A.A. Juan, N. Mustafee, A. Skoogh, S. Jain, and B. Johansson, eds. 2018. Geteborg, Sweden. P. 857–868.
- [19] Hinton G., Salakhutdinov R. Reducing the Dimensionality of Data with Neural Networks // Science. 2006. Vol. 313, № 5786. P. 504–507.
- [20] Windisch D. Loading Deep Networks Is Hard: The Pyramidal Case // Neural Computation. 2005. Vol. 17, № 2. P. 487–502.
- [21] Witczak M, Korbicz J, Mrugalski M., et al. A GMDH Neural Network-Based Approach to Robust Fault Diagnosis: Application to the DAMADICS Benchmark Problem // Control Engineering Practice. 2006. Vol. 14, № 6. P. 671–683.
- [22] Abadi M., Agarwal A. Barham P. TensorFlow: Large-Scale Machine Learning on Heterogeneous Distributed Systems // Proceedings of the 12th USENIX Symposium on Operating Systems Design and Implementation (OSDI '16) (Savannah, GA, USA, November, 2–4, 2016). 2016. P. 265–283.

Статья поступила в редакцию 04.07.2019 г.

УДК 656.62; 629.122

Платов Александр Юрьевич, д.т.н., профессор кафедры Управления транспортом
ФГБОУ ВО «ВГУВТ», e-mail: platoff@mail.ru

Васильева Оксана Юрьевна, аспирант кафедры Управления транспортом
ФГБОУ ВО «ВГУВТ», e-mail: vasilieva.ox@gmail.com

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
образования «Волжский государственный университет водного транспорта»
(ФГБОУ ВО «ВГУВТ»)

603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5

АНАЛИЗ ПРИМЕНИМОСТИ МЕТОДОВ РАСЧЕТА КОЭФФИЦИЕНТА ОСТАТОЧНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ДЛЯ СУДОВ ВНУТРЕННЕГО ПЛАВАНИЯ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИОННО-ЭКОНОМИЧЕСКОМ ОБОСНОВАНИИ НОВЫХ СУДОВ

Ключевые слова: речные суда, сопротивление воды, эксплуатационно-экономическое обоснование, методы расчёта сопротивления, пересчет с прототипа, коэффициент остаточного сопротивления, эффективная мощность главных двигателей.

Аннотация. Статья посвящена анализу методов расчета коэффициента остаточного сопротивления для судов внутреннего плавания в аспекте применимости этих методов для эксплуатационно-экономического обоснования новых судов. Показано, что существующие методы, как отечественные, так и зарубежные, обладают значительной погрешностью при сравнении их с модельными испытаниями. Отмечено, что прогнозная оценка величины погрешности и её знака при применении прямых методов расчета невозможна. Отмечено «нефизичное» поведение некоторых методов. Выдвинуты предположения о причинах такого поведения. На основании анализа делается вывод, что существующие в настоящее время прямые методы расчёта остаточного сопротивления для задач обоснования речных грузовых судов в общем случае неприменимы.

Одним из важнейших элементов эксплуатационно-экономического обоснования речных грузовых судов является определение ходовых качеств судна, для чего требуются алгоритмы вычисления тяги движителей и сопротивления воды движению судна.

Наиболее надежный способ прогнозирования сопротивления воды – модельные испытания – предполагает знание главных относительных размерений судов и потому не годится для решения задачи эксплуатационно-экономического обоснования, в которой такие размерения являются искомыми.

Расчётные методы прогнозирования сопротивления воды, как известно, представлены двумя группами: методами пересчёта с прототипа и методами прямого расчёта.

Задача вычисления сопротивления воды движению судна являлась предметом большого количества исследований, как в нашей стране, так и за рубежом. Тем не менее, можно утверждать, что эта задача до сих пор не имеет окончательного решения. Причиной этого является сложность гидродинамических явлений, возникающих при движении судна и отсутствие удовлетворительных для практики приближённых аналитических решений, касающихся вихревого и волнового сопротивлений.

Основная проблема при использовании существующих методов расчёта сопротивления речных судов состоит в том, что эти методы обладают значительной погрешностью, причём для них невозможна оценка ни величины погрешности, ни даже её знака. Данное утверждение основано на результатах небольшого исследования, которое описывается ниже.

В отечественных публикациях, посвящённых ходовым расчётам для речных судов, можно найти описание 15 методов расчёта сопротивления (Таблица 1), созданных не ранее 60-х годов, когда уже строились и проектировались суда, предназначенные для плавания в Единой глубоководной системе европейской части нашей страны.

К этим методам относятся методы прямого расчёта Л.И. Фомкинского [1], А.Б. Карпова [2], проблемной лаборатории гидромеханики НИИВТ (два варианта) [3; 4], метод В.В. Вьюгова [5], метод Е.М. Сироткина [6], метод ЛИВТ [6], метод Г.Н. Сиротиной [7], метод Б.М. Сахновского [8].

Таблица 1

Методы расчета сопротивления

№	Название и год публикации	Принцип расчёта	Границы применимости
1	Метод Фомкинского (1972 г.)	Фруд	$6,3 \leq L/B \leq 7,7$; $4,5 \leq B/T \leq 5,5$; $0,7 \leq \delta \leq 0,9$; $0,1 \leq Fr \leq 0,22$
2	Метод Карпова (1967 г.)	Фруд	$3,0 \leq B/T \leq 7,0$; $0,6 \leq \delta \leq 0,85$; $0,1 \leq Fr \leq 0,2$
3	Метод НИИВТ (1970 г.)	Хьюз	$5,0 \leq L/B \leq 10,0$; $3,0 \leq B/T \leq 8,0$; $0,5 \leq \delta$, <i>верхняя граница зависит от Fr</i> <i>и меняется от 0,72 до 0,82</i> $0,1 \leq Fr \leq 0,3$
4	Метод НИИВТ (1978 г.)	Хьюз	$5,0 \leq L/B \leq 9,0$; $3,0 \leq B/T \leq 8,0$; $0,5 \leq \delta \leq 0,89$; $0,12 \leq Fr \leq 0,3$
5	Метод Вьюгова (1991 г.)	Хьюз	$5,0 \leq L/B \leq 9,0$; $4,0 \leq B/T \leq 8,0$; $0,45 \leq \delta \leq 0,87$; $0,1 \leq Fr \leq 0,34$
6	Метод Сироткина (1986 г.)	Фруд	$4,0 \leq L/B \leq 8,5$; $3,7 \leq B/T \leq 14,0$; $0,8 \leq \delta \leq 0,93$; $0,07 \leq Fr \leq 0,25$
7	Метод ЛИВТ (начало 80-х)	Фруд	$2,8 \leq L/B \leq 7,8$; $5,0 \leq B/T \leq 13,9$; $0,75 \leq \delta \leq 0,89$; $0,1 \leq Fr \leq 0,25$
8	Метод Сиротиной (1982 г.)	Фруд	$6,8 \leq L/B \leq 8,9$; $3,7 \leq B/T \leq 4,8$; $0,78 \leq \delta \leq 0,87$; $0,12 \leq Fr \leq 0,25$
9	Метод Сахновского (1996 г.)	Фруд	$4,85 \leq L/B \leq 9,09$; $5,89 \leq L/\sqrt[3]{V} \leq 7,63$; $3,25 \leq B/T \leq 8,44$; $0,78 \leq \delta \leq 0,914$; $0,08 \leq Fr < 0,2$
10	Метод Авдеева (1961 г.)	Пересчет с прототипа	$6,0 \leq L/B \leq 9,0$; $4,0 \leq B/T \leq 7,0$; $0,73 \leq \delta \leq 0,91$; $0,1 \leq Fr \leq 0,35$
11	Метод ЦНИИРФ (1953 г.)	Пересчет с прототипа	$3,0 \leq L/B \leq 11,0$; $2,5 \leq B/T \leq 10,0$; $0,75 \leq \delta \leq 0,9$; $0,05 \leq Fr \leq 0,3$
12	Метод Сандлера-Карпова (1982 г.)	Пересчет с прототипа	$4,5 \leq L/\sqrt[3]{V} \leq 11,0$; $1,5 \leq B/T \leq 15,0$; $0,5 \leq \varphi \leq 0,85$; $0,05 \leq Fr < 0,4$
13	Метод Холтропа-Меннена (1984 г.)	Хьюз	$5,7 \leq L/B \leq 7,1$; $0,0 \leq B/T \leq 10,0$; $0,73 \leq \delta \leq 0,85$; $0,1 \leq Fr \leq 0,24$
14	Метод Гулдхаммера-Харвальда (1983 г.)	Фруд	$6,0 \leq L/B \leq 9,0$; $2,5 \leq B/T \leq 10,0$; $0,78 \leq \delta \leq 0,87$; $0,12 \leq Fr \leq 0,25$
15	Метод Холленбаха (1997 г.)	Фруд	$3,96 \leq L/B \leq 7,13$; $2,3 \leq B/T \leq 6,11$; $0,512 \leq \delta \leq 0,775$; $0,16 \leq Fr \leq 0,32$

Примечание: год создания некоторых методов расчёта указан по году доступной авторам публикации метода.

В методах В.В. Вьюгова и НИИВТ сопротивление вычисляется по способу Хьюза, то есть с разделением на вязкостную и волновую составляющие, а остальные методы – по способу Фруда, то есть с разделением на сопротивление трения и остаточное сопротивление.

Методы пересчёта с прототипа представлены методами Г.К. Авдеева [9], ЦНИИРФ [10] и Сандлера-Карпова [11]. Все они ориентированы на пересчёт остаточного сопротивления.

Метод пересчёта ЦНИИРФ был разработан в 1953 г., но рекомендовался для расчётов сопротивления до 1986 г. [12]. Поэтому он также анализировался.

Все перечисленные методы получены обработкой результатов серийных модельных испытаний, которые проводились в ГИИВТ, НИИВТ, ЛИВТ, ВНИИ им. А.Н. Крылова и др. организациях.

Насколько можно судить по различным обзорам [13; 14, 15, 16, 17], за рубежом испытаний систематических серий моделей грузовых судов внутреннего плавания не проводились. В литературе можно найти лишь систематические испытания речных барж и толкачей [18]. Тем не менее, некоторые расчётные методы, созданные для расчёта сопротивления морских судов, можно использовать для расчётов с речными судами. Такими методами являются метод Холтропа-Меннена [19], метод Гулдхаммера-Харвальда [20, 21] и метод Холленбаха [22]. Первый метод реализован по способу Хьюза, остальные – по Фруду (Таблица 1).

Все перечисленные методы были реализованы программно в форме процедур, вычисляющих коэффициент остаточного сопротивления C_R по Фруду. Результаты вычислений C_R по методам прямого расчёта сравнивались как между собой, так и с результатами испытаний 24-х моделей в двух наборах, приведённых в [11] и [8] соответственно (Таблица 2). При расчётах учитывались пределы применимости методов (Таблица 1), поэтому для каждой из 24-х моделей получился свой набор применимых методов.

Таблица 2

Геометрические параметры моделей судов

№	Номер проекта судна	L/B	B/T	δ
Набор I				
1	507	8,18	5,16	0,851
2	558	7,80	6,90	0,847
3	791	8,48	3,94	0,816
4	576	6,93	4,65	0,836
5	573	7,01	5,00	0,775
6	559	5,47	8,34	0,797
7	765	6,74	5,45	0,810
8	821	6,00	6,70	0,806
9	890	5,60	7,50	0,815
Набор II				
1	92-040	8,65	3,25	0,837
2	781	7,08	3,94	0,780
3	81530	9,09	3,52	0,847
4	1677	8,47	4,15	0,868
5	81365	6,21	5,79	0,897
6	81630	5,09	8,44	0,914

№	Номер проекта судна	L/B	B/T	δ
7	81820	7,02	5,07	0,879
8	ck-2000k	4,85	7,69	0,864
9	19620	6,97	6,67	0,848
10	16510	6,11	4,32	0,772
11	P77	7,10	5,92	0,821
12	0225	7,83	6,28	0,884
13	630	8,12	4,44	0,854
14	2177	8,10	4,54	0,850
15	1557	8,46	3,71	0,816

Результаты расчётов оформлены в виде 24-х графиков, на каждом из которых приведены кривая C_R модельных испытаний и кривые C_R , полученные с помощью применимых для данной модели методов. Ниже приведены два графика (рис. 1, рис. 2), которые демонстрируют картину, типичную для всей совокупности.

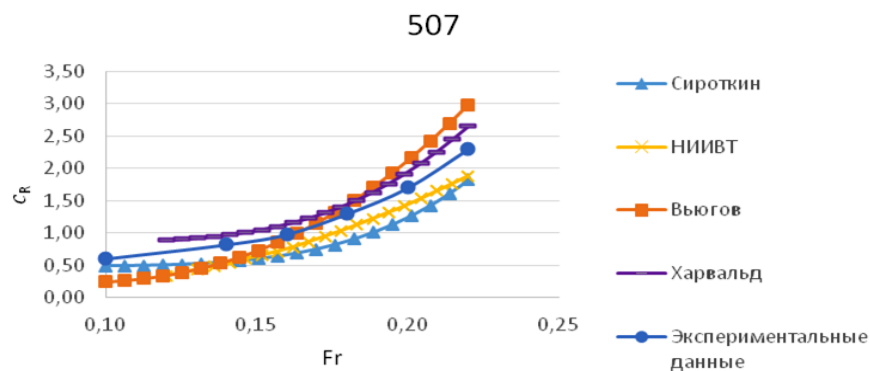


Рис. 1. Коэффициент остаточного сопротивления для модели судна проекта №507

Первым очевидным итогом, который следует из проведённых расчётов, является то, что результаты расчётов коэффициента C_R у разных методов сильно разнятся между собой.

Вероятно, отчасти это можно объяснить разницей в наборе моделей судов, по испытаниям которых строились методы расчёта. Так, метод НИИВТ образца 1970 г. основывался на серийных испытаниях, проведённых в ГИИВТ М.Я. Алферьевым. В то же время для метода НИИВТ, образца 1978 г., который, судя по описанию в литературе, был создан теми же авторами (Ю.Н. Кузьменко, С.Н. Рудин и др.) и имеет точно такую же структуру, были использованы результаты испытаний крупномасштабных моделей судов внутреннего и смешанного плавания ЦНИИ им. А.Н. Крылова.

Чтобы оценить, насколько велика разница в результатах расчётов в смысле эксплуатационно-экономического обоснования, можно сделать следующие несложные вычисления.

Возьмём для определённости судно проекта №507 Волго-Дон с размерениями $L = 135$ м; $B = 13,5$ м; $T = 3,5$ м; $\delta = 0,85$ (длина, ширина, осадка, коэффициент полноты водоизмещения соответственно).

При движении этого судна со скоростью 20 км/ч, число Фруда $Fr \approx 0,15$.

Из рисунка 1 можно видеть, что минимальное значение коэффициента $C_R = 0,782$ (метод НИИВТ), максимальное – 1,163 (метод Харвальда), модельное по В.А. Лесюкову – 0,9.

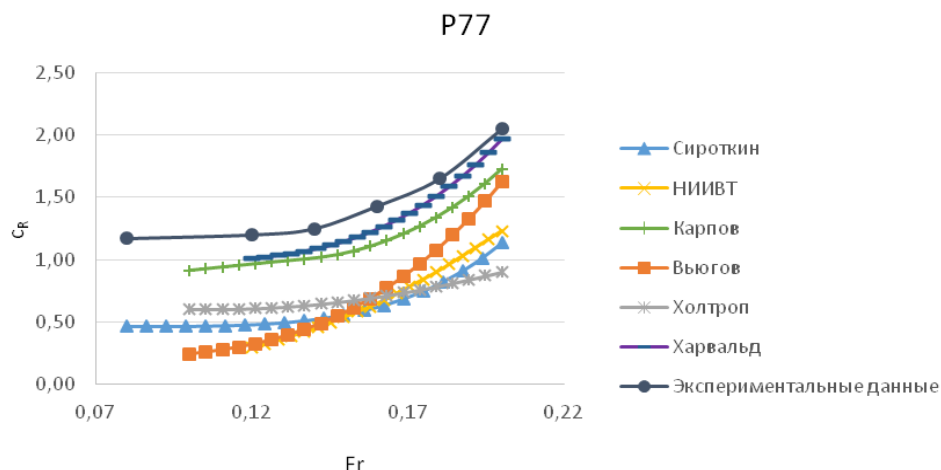


Рис. 2. Коэффициент остаточного сопротивления для модели судна проекта P77

На такой скорости коэффициент трения гладкой пластины, вычисленный по формуле Прандтля-Шлихтинга, будет равен $C_F = 1,656$. Принимая надбавку на шероховатость $\Delta C_F = 0,3$ и на сопротивление выступающих частей $C_{AP} = 0,2$ согласно [3], получим, что суммарный коэффициент сопротивления колеблется от -4% до $+9\%$. Таким образом, возможное относительное изменение величины сопротивления при пользовании различными методами расчёта может в данном случае достигать до 13% . При увеличении числа Фруда эта величина будет возрастать.

В качестве примера можно привести расчёт прогнозного значения эффективной мощности, выполненного по методу Л.И. Фомкинского для двух судов проекта №507 и №630 (Таблица 3).

В качестве контрольного значения использовалась эффективная мощность, вычисленная по сопротивлению соответствующих прототипов из наборов I и II.

Из таблицы 3 можно сделать вывод, что, во-первых, не существует метода, который даёт всегда лучшие результаты. Во-вторых, погрешность при прогнозировании эффективной мощности может превосходить 20% . Причём это проявляется при расчётах сопротивления судов с обычными обводами. Далее, также ясно, что «древность» метода не коррелирует с погрешностью: плохие результаты получаются также и у относительно новых методов (В.В. Вьюгова, Е.М. Сироткина).

Второй итог, который можно сделать из анализа поведения графиков, состоит в том, что некоторые методы отличаются сомнительной «физикой» и потому их нельзя рекомендовать для задач, в которых варьируются размерения судна.

Чтобы убедиться в этом, можно построить графики коэффициента остаточного сопротивления, полученные варьированием L/B при фиксированных $B/T = 4$ и $\delta = 0,851$ при значении скорости $Fr \approx 0,15$, которое является наиболее типичным для паспортной скорости речных судов.

Наиболее резко разница в поведении методов проявляется, если построить графики другого коэффициента остаточного сопротивления, определяемого по выражению:

$$k_R = \frac{R_R}{\rho g V}.$$

Из результатов расчётов (рис. 3) видно, что поведение коэффициента в методе Г.Н. Сиротиной нефизично. Методы НИИВТ, Е.М. Сироткина и В.В. Вьюгова, созданные в одной организации, демонстрируют три возможных поведения коэффициента: возрастание, убывание и практическое постоянство.

Таблица 3

**Расчёт прогнозного значения эффективной мощности
по методу Л.И. Фомкинского**

№	Метод	Прогнозная мощность, кВт	Отклонение от прототипа, %
Проект 507			
	Прототип из набора I	1472,3	-
1	Карпов	1552,6	5,4
2	Фомкинский	1800,9	22,3
3	Сироткин	1261,0	-14,4
4	Сиротина	1240,0	-15,8
5	НИИВТ	1446,4	-1,8
6	Вьюгов	1154,0	-21,6
Проект 630			
	Прототип из набора II	1353	-
1	Карпов	1511,3	11,7
2	Фомкинский	1748,6	29,2
3	Сироткин	1254,9	-7,2
4	Сиротина	1220,4	-9,8
5	НИИВТ	1396,8	3,22
6	Вьюгов	1129,4	-16,5

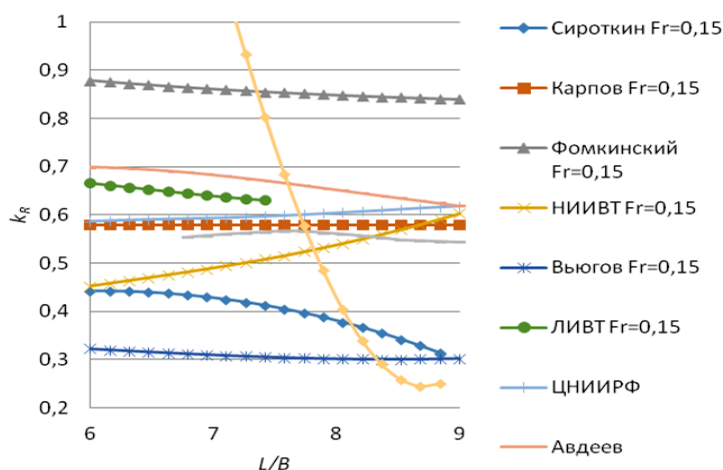


Рис. 3. Графики коэффициента остаточного сопротивления, полученные варьированием L/B при фиксированных $V/T = 4$ и $\delta = 0,851$

Из графиков также следует, что гипотеза А.Б. Карпова [2] о почти неизменном характере k_R при типичных скоростях речных судов $Fr = 0,15 \div 0,25$, выглядит очень вероятной.

Можно видеть, что в методах Харвальда, ЦНИИРФ, Холтропа и НИИВТ коэффициент k_R возрастает, в методе А.Б. Карпова он постоянен, в методе Г.Н. Сиротиной он немонокотонный, а в остальных методах коэффициент k_R убывает.

При этом можно заметить, что в методе ЦНИИРФ имеется отдельный коэффициент, учитывающий длину цилиндрической вставки, который, если бы предположить, что величина L/B меняется именно из-за неё, дал бы также убывающий график.

Большинство методов демонстрируют умеренно убывающий характер коэффициента k_R , что предположительно является корректной «физикой» для судов речного и смешанного плавания.

Возрастание k_R возможно, только если волновая составляющая очень мала. Чтобы прояснить это вопрос были построены графики для скорости $Fg=0,22$, причём в качестве прототипа был выбран проект №573 с параметрами $L/B=7,01$, $B/T=5$ и $\delta=0,775$ (рис. 4).

Можно убедиться, что методы не меняют своего качественного поведения.

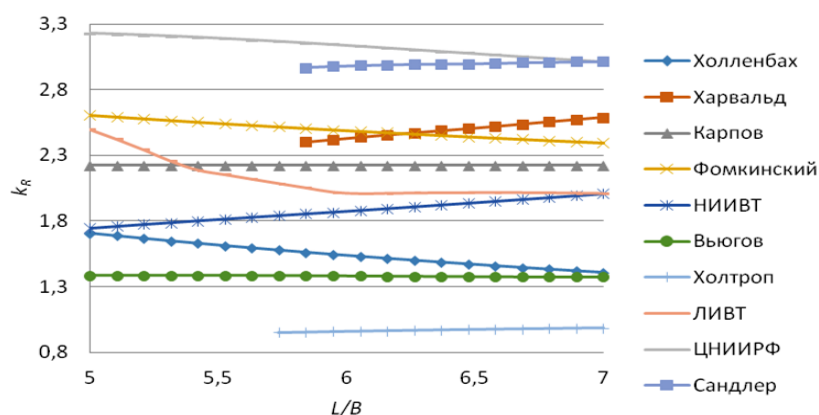


Рис. 4. Графики коэффициента остаточного сопротивления для скорости $Fg=0,22$, прототип - проект №573 с параметрами $L/B=7,01$, $B/T=5$ и $\delta=0,775$

Таким образом, можно констатировать, что методы Харвальда, ЦНИИРФ (с оговорками), Г.Н. Сиротиной, Холтропа и НИИВТ не могут быть рекомендованы для задач обоснования речных грузовых судов.

К этому можно добавить, что методы Харвальда и Холтропа предназначались для расчёта сопротивления морских судов, поэтому полученный для них итог не может считаться окончательной характеристикой их «физики».

Метод Г.Н. Сиротиной был получен прямой аппроксимацией полинома, то есть при составлении этого метода не закладывалось никакой «физики». Видимо, такой простой подход не может быть рекомендован в общем случае.

Согласно проведенным исследованиям, наиболее точные результаты расчета сопротивления можно получить единственно возможным способом – используя методы пересчета с прототипа.

Исходя из вышеизложенного, можно сделать вывод, что применимость существующих в настоящее время прямых методов расчёта сопротивления весьма ограничена, так как погрешность при определении эффективной мощности силовой установки может быть неприемлема. Наиболее достоверным способом остаётся способ пересчёта с близкого прототипа.

Список литературы:

- [1] Фомкинский Л.И. Методика тяговых расчётов при обосновании судов речного флота // Труды ЦНИИЭВТ. М., 1972. Вып. 86. 185 с.
- [2] Карпов А.Б. Расчёты сопротивления воды движению речных судов. Горький: ГПИ, 1971. 126 с.
- [3] Судовые тяговые расчёты / Под ред. В.Г. Павленко. Учебник для ин-тов водн. трансп. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Транспорт, 1978. 216 с.
- [4] Судовые тяговые расчёты / Под ред. В.Г. Павленко. Учебник для ин-тов водн. трансп. М.: Транспорт, 1970. 224 с.

- [5] Вьюгов, В.В. Гидродинамические аспекты теории судовождения на внутренних водных путях: диссертация доктора технических наук: 05.22.16. Новосибирск, 1999. 312 с.
- [6] Ходкость и управляемость судов: Учебник для вузов / Под ред. В.Г. Павленко. М.: Транспорт, 1991. 397 с.
- [7] Сиротина Г.Н. Об определении остаточного сопротивления грузовых судов внутреннего и смешанного плавания при расчете энерговооруженности судна и оптимизации его элементов // Труды ГИИВТ, 1982. Вып.192. С. 135–148.
- [8] Сахновский Б.М. Разработка методологии обоснования проектных характеристик судов смешанного и внутреннего плавания с учетом доминирующих факторов эксплуатации: диссертация доктора технических наук: 05.08.03. СПб, 2006. 319 с.
- [9] Басин А.М., Анфимов В.Н. Гидродинамика судна. Л.: Речной транспорт, 1961. 685 с.
- [10] Звонков В.В. Судовые тяговые расчёты (теория, расчёты, испытания). М.: Речной транспорт, 1956. 324 с.
- [11] Лесюков В.А. Теория и устройство судов внутреннего плавания. Учебник для вузов водн. трансп. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Транспорт, 1982. 303 с.
- [12] Тяга Судов (Методика и примеры выполнения судовых тяговых расчетов). Учебное пособие для вузов / Г.И. Ваганов, В.Ф. Воронин, В.К. Шанчурова. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Транспорт, 1986. 199 с.
- [13] Rotteveel, E. Design guidelines and empirical evaluation tools for inland ships / E. Rotteveel, R. Hekkenberg, J. Liu // European Inland Waterway Navigation Conference, Budapest, 2014.
- [14] Rotteveel E. Investigation of inland ship resistance, propulsion and manoeuvring using literature study and potential flow calculations / E. Rotteveel. Master Thesis. Delft University of Technology, 2013.
- [15] Skupien E., Prokopowicz J. Methods of calculating ship resistance on limited waterways // Polish Maritime Research, 2014. Vol. 21. 4(84). pp. 12–17.
- [16] Ship Resistance and Propulsion. Practical Estimation of Ship Propulsive Power / Anthony F. Molland, Stephen R. Turnock, Dominic A. Hudson. Cambridge: Cambridge University Press, 2011.
- [17] Kleppesø K. Empirical prediction of resistance of fishing vessels / Master thesis in marine technology. Trondheim: Norwegian University of Science and Technology, 2015.
- [18] Luthra G. Ermittlung widerstandsgünstiger Trimmlagen fuer unterschiedlich beladene Leichter innerhalb eines Schubverbandes // Sonderdruck aus der Zeitschrift fuer Binnenschifffahrt und Wasserstrassen, 1982. Nr. 12.
- [19] Holtrop J. A Statistical Reanalysis of Resistance and Propulsion Data // International Shipbuilding Progress, 1984. Vol. 31. pp. 272–276.
- [20] Kristensen H.O., Luetzen M. Prediction of Resistance and Propulsion Power of Ships / Technical University of Denmark. Report no. 04, May 2013.
- [21] Sv. Aa. Harvald. Resistance and Propulsion of Ships. New York: John Wiley and Sons, 1983.
- [22] Shneekluth H., Bertram V. Ship design for efficiency and economy. 2nd ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1998.

ANALYSIS OF THE APPLICABILITY OF METHODS OF CALCULATING OF THE RESIDUAL RESISTANCE COEFFICIENTS OF INLAND SHIPS FOR FEASIBILITY STUDY OF NEW SHIPS

Platov Alexander Y., *Doctor of Engineering Science, professor of Transport Management Chair Volga State University of Water Transport*
Vasileva Oksana Y., *postgraduate of Transport Management Chair Volga State University of Water Transport*
5, Nesterov st, Nizhniy Novgorod, 603951

Keywords: *inland ships, water resistance, feasibility study, the methods of calculating the resistance, the type ships method, residual resistance coefficient, brake power of main engine.*

Annotation. *The article is devoted to the analysis of methods for calculating of the residual resistance coefficient for inland ships for feasibility study of ship design. It is shown that the existing methods have a significant error in comparing with model tests. It is noted that the*

forecast estimate of the error and its sign is impossible when it use direct methods of calculation. Signed «non-physical» behavior of some methods. It is made the assumptions about the reasons for this behavior. Based on the analysis, it is concluded that the currently existing direct methods for calculating residual resistance for feasibility study of ship design are generally not applicable.

References:

- [1] Fomkinskij L.I. Metodika tјagovyh raschјotov pri obosnovanii sudov rechnogo flota // Trudy CNIIJeVT. M., 1972. Vyp. 86. 185 s.
- [2] Karpov A.B. Raschјoty soprotivlenija vody dvizheniju rechnyh sudov. Gor'kij: GPI, 1971. 126 s.
- [3] Sudovye tјagovye raschјoty / Pod red. V.G. Pavlenko. Uchebnik dlja in-tov vodn. transp. Izd. 2-e, pererab. i dop. M.: Transport, 1978. 216 s.
- [4] Sudovye tјagovye raschјoty / Pod red. V.G. Pavlenko. Uchebnik dlja in-tov vodn. transp. M.: Transport, 1970. 224 s.
- [5] V'јugov, V.V. Gidrodinamicheskie aspekty teorii sudovozhdenija na vnutrennih vodnyh putjah: dissertacija doktora tehnikeskikh nauk: 05.22.16. Novosibirsk, 1999. 312 s.
- [6] Hodkost' i upravljajemost' sudov: Uchebnik dlja vuzov / Pod red. V.G. Pavlenko. M.: Transport, 1991. 397 s.
- [7] Sirotna G.N. Ob opredelenii ostatochnogo soprotivlenija gruzovyh sudov vnutrennego i smeshannogo plavanija pri raschete jenergovooruzhennosti sudna i optimizacii ego jelementov // Trudy GIIVT, 1982. Vyp.192. S. 135-148.
- [8] Sahnovskij B.M. Razrabotka metodologii obosnovanija proektnyh harakteristik sudov smeshannogo i vnutrennego plavanija s uchetom dominirujushhih faktorov jekspluatacii: dissertacija doktora tehnikeskikh nauk: 05.08.03. SPb, 2006. 319 s.
- [9] Basin A.M., Anfimov V.N. Gidrodinamika sudna. L.: Rečnoj transport, 1961. 685 s.
- [10] Zvonkov V.V. Sudovye tјagovye raschјoty (teorija, raschјoty, ispytanija). M.: Rečnoj transport, 1956. 324 s.
- [11] Lesjukov V.A. Teorija i ustrojstvo sudov vnutrennego plavanija. Uchebnik dlja vuzov vodn. transp. 4-e izd., pererab. i dop. M.: Transport, 1982. 303 s.
- [12] Tјaga Sudov (Metodika i primery vypolnenija sudovyh tјagovyh raschetov). Uchebnoe posobie dlja vuzov / G.I. Vaganov, V.F. Voronin, V.K. Shanchurova. 2-e izd., pererab. i dop. M.: Transport, 1986. 199 s.
- [13] Rotteveel, E. Design guidelines and empirical evaluation tools for inland ships / E. Rotteveel, R. Hekkenberg, J. Liu // European Inland Waterway Navigation Conference, Budapest, 2014.
- [14] Rotteveel E. Investigation of inland ship resistance, propulsion and manoeuvring using literature study and potential flow calculations / E. Rotteveel. Master Thesis. Delft University of Technology, 2013.
- [15] Skupien E., Prokopowicz J. Methods of calculating ship resistance on limited waterways // Polish Maritime Research, 2014. Vol. 21. 4(84). pp. 12–17.
- [16] Ship Resistance and Propulsion. Practical Estimation of Ship Propulsive Power / Anthony F. Molland, Stephen R. Turnock, Dominic A. Hudson. Cambridge: Cambridge University Press, 2011.
- [17] Kleppesø K. Empirical prediction of resistance of fishing vessels / Master thesis in marine technology. Trondheim: Norwegian University of Science and Technology, 2015.
- [18] Luthra G. Ermittlung widerstandsgünstiger Trimmlagen fuer unterschiedlich beladene Leichter innerhalb eines Schubverbandes // Sonderdruck aus der Zeitschrift fuer Binnenschiffahrt und Wasserstraben, 1982. Nr. 12.
- [19] Holtrop J. A Statistical Reanalysis of Resistance and Propulsion Data // International Shipbuilding Progress, 1984. Vol. 31. pp. 272-276.
- [20] Kristensen H.O., Luetzen M. Prediction of Resistance and Propulsion Power of Ships / Technical University of Denmark. Report no. 04, May 2013.
- [21] Sv. Aa. Harvald. Resistance and Propulsion of Ships. New York: John Wiley and Sons, 1983.
- [22] Shneekluth H., Bertram V. Ship design for efficiency and economy. 2nd ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1998.

Статья поступила в редакцию 14.06.2019 г.

УДК 656.62.052

Токарев Павел Николаевич, к.т.н., доцент кафедры судовождения
и безопасности судоходства ФГБОУ ВО «ВГУВТ»,

e-mail: sudovod@vgvt-nn.ru

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Волжский государственный университет
водного транспорта» (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»)
603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5

ОЦЕНКА УСЛОВИЙ БЕЗОПАСНОГО МАНЕВРИРОВАНИЯ СУДНА ПРИ ВЕТРЕ НА МАЛЫХ СКОРОСТЯХ ХОДА

Ключевые слова: судно, стесненная акватория, ветер, подруливающее устройство, работа движителей «враздрай», удержание судна «на месте», прямолинейное движение, расчет.

Аннотация. В работе приведены исследования безопасных условий маневрирования судов при ветре на ограниченной по габаритам акватории. Получены расчетные зависимости по определению допустимых скоростей ветра, при которых возможно удержание судна «на месте». Углов ветрового дрейфа и углов перекладки рулевого органа при прямолинейном движении с использованием носового подруливающего устройства и режима работы движителей «враздрай», а так же маневра отворота судна с линии пути при ветре.

Анализ транспортных происшествий показывает, что аварийность судов на малых скоростях хода при ветре выше пяти баллов в четыре раза выше, чем при ветре до трех баллов [1], то есть ветер является фактором, который существенным образом влияет на безопасность движения и маневрирования судов. Поэтому вопросы оценки безопасности маневрирования судов на рейдах, выполнения привально-отвальных операций и прохождения зон судоходных гидротехнических сооружений необходимо рассматривать с учетом влияния ветра. Исследование безопасных условий маневрирования судов и составов при ветре сводится к оценке управляемости под воздействием ветра [2, 3, 4, 5]. Для выполнения маневров на предельно малых скоростях хода в условиях ветра требуется, как правило, применение всех судовых средств управления, включая работу подруливающего устройства и работу движителей «враздрай». Опыт эксплуатации судов речного флота и данные натурных испытаний показывают, что к наиболее неблагоприятным маневрам, при которых возможна потеря управляемости судна, относятся отвальные маневры и разворот на месте [2, 5, 6].

В связи с этим оценка безопасных условий маневрирования на малых скоростях сводится к оценке управляемости, способности судна противостоять действию ветра и совершать поворот «на ветер» на малом ходу и без хода. В качестве расчетного маневра в этом случае может быть принят расчет маневра по удержанию судна на месте [6, 7].

Процесс удержания судна на месте при использовании носового подруливающего устройства, работы движителей «враздрай» и перекладки рулевого органа с учетом схемы усилий, действующих на судно (рис. 1), может быть описан следующей системой уравнений:

$$\left. \begin{aligned} T_{E1} - T_{E2} - X_A &= 0; \\ Y_R - Y_A + F_{шв} &= 0; \\ M_P + M_F - M_A - M_R &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где T_{E1}, T_{E2}, X_A – полезная тяга винтов, работающих на передний и задний ход и продольная составляющая аэродинамической силы;

$Y_R, Y_A, F_{шв}$ – боковая составляющая рулевой силы, боковая составляющая аэродинамической силы и силы от подруливающего устройства;

M_P, M_F, M_A, M_R – моменты от работы движителей «враздрай», подруливающего устройства, ветра и рулевой силы соответственно.

Компенсация продольной составляющей ветрового усилия может быть всегда достигнута выбором частоты вращения винтов, работающих на передний и задний ход.

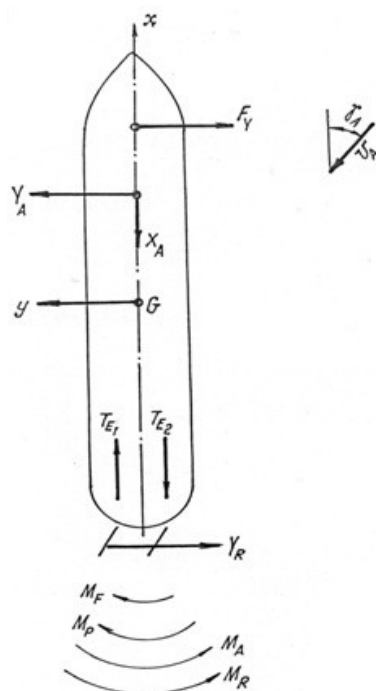


Рис. 1. Схема сил и моментов, действующих на судно при удержании судна на месте в условиях ветра

Совместное решение второго и третьего уравнения системы (1) позволяет получить выражение для определения максимальной скорости ветра, при которой возможно удержание судна на месте при заданном режиме работы движителей

$$v_A = \sqrt{\frac{\bar{d}(T_{E1} + T_{E2}) + 2F_{Y шв}(\bar{l}_{ПУ} + \bar{l}_R)}{c_{YA}\rho_A F_{\Pi}(\bar{l}_R + \frac{c_{MA}}{c_{YA}})}} \quad (2)$$

где $\bar{d}, \bar{l}_{ПУ}$ и $\bar{l}_R$ – относительное расстояние между валами гребных винтов, подруливающего устройства и рулевого органа;

C_{YA} и C_{MA} – коэффициенты аэродинамической силы и момента;

F_{II} – боковая площадь парусности судна.

Выражение (2) справедливо для судов, имеющих в качестве рулевого органа рули или поворотные насадки с отдельным управлением. Если на судне установлены синхронные поворотные насадки, то удержание судна на месте возможно лишь при определенном угле натекания воздушного потока на судно.

Величину перекадки рулевого органа можно определить из выражений:
для рулей

$$\alpha_R = A' + B' - C' C_{MA} v_A^2, \quad (3)$$

где A', B', C' – коэффициенты, определяемые по формулам:

$$\left. \begin{aligned} A' &= \frac{F_{Y_{шв}} \bar{l}_{ПУ} \lambda'}{k T_{E1} \bar{l}_R}; \\ B' &= \frac{\bar{d} (T_{E1} + T_{E2}) \lambda'}{2 k T_{E1} \bar{l}_R}; \\ C' &= \frac{\rho_A F_{II} \lambda'}{2 k T_{E1} \bar{l}_R}. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

для насадок при их отдельной перекадке «наружу»

$$q_e \operatorname{tg} \alpha_n = A'' + B'' - C'' c_{MA} v_A^2, \quad (5)$$

где A'', B'', C'' – коэффициенты, определяемые по выражениям

$$\left. \begin{aligned} A'' &= \frac{F_{Y_{шв}} \bar{l}_{ПУ}}{(T_{E1} + T_{E2}) \bar{l}_R}; \\ B'' &= \frac{\bar{d}}{2 \bar{l}_R}; \\ C'' &= \frac{\rho_A F_{II}}{2 (T_{E1} + T_{E2}) \bar{l}_R}. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Расчет величин v_A и α_n по формулам (2), (3) и (5) в зависимости от направления ветра для теплохода пр. 507 в грузу и в балласте приведен на рис. 2. При значениях скоростей ветра выше ограничительной кривой $v_A = f(\gamma_A)$ судно будет дрейфовать под действием ветра.

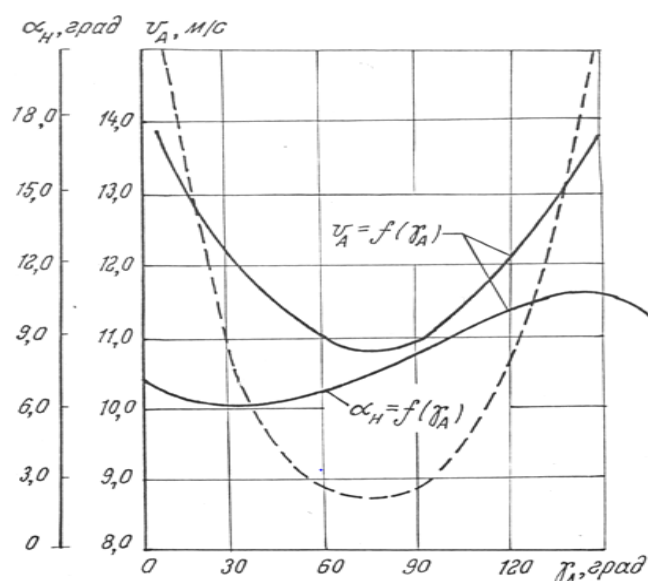


Рис. 2. Скорость выдерживаемого судном ветра и углы перекладки насадок «наружу» теплохода проекта 1565 в грузу и балласте при выполнении маневра «удержание на месте»
 — в грузу;
 - - - в балласте.

Важное практическое значение для судоводителей имеет оценка возможности прямолинейного движения при воздействии ветра на малых скоростях при использовании ПУ и работы движителей «враздрай». Уравнения прямолинейного равномерного движения в этом случае с учетом схемы действия усилий (рис. 3) запишутся в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} T_{E1} - T_{E2} - X_{\Gamma} - X_A - X_R &= 0; \\ Y_{\Gamma} + F_Y(v) - Y_R - Y_A + Y_P &= 0; \\ M_{\Gamma} + M_F + M_R - M_A + M_P &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Система уравнений (7) относительно β и α_R при заданных значениях v_A и γ_A частоты вращения винтов n_1 и n_2 может быть решена на ЭВМ методом итераций.

Решение системы уравнений (7) в аналитическом виде возможно, если принять допущение о малости величин X_R и Y_P и считать, что полезный упор ДРК не зависит от ветрового воздействия [8]. Тогда из первого уравнения системы (7), задавая скорость движения судна и частотой вращения винта, работающего на передний ход, можно определить частоту вращения винта, работающего на задний ход.

$$n_2 = \sqrt{\frac{T_{E1} - R(v)}{\rho k_{T3X}^{III} D_6^4}}, \quad (8)$$

где $R(v)$ – сопротивление воды движению судна при скорости v .

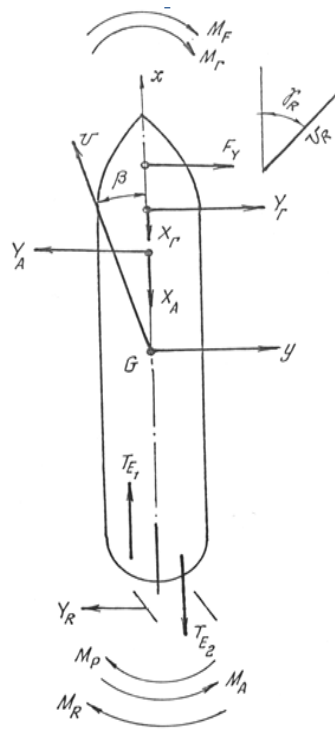


Рис. 3. Схема сил и моментов, действующих на судно при прямолинейном движении с углом дрейфа

Совместное решение второго и третьего уравнений системы (7) позволяет получить выражения для определения углов дрейфа β и угла перекладки рулевого органа α_R в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} \beta &= -U + \sqrt{U^2 + A_1 \left(\frac{v_R}{v} \right)^2 + D_1}; \\ \alpha_R &= B_1 c_{MA} \left(\frac{v_R}{v} \right)^2 - C_1 \beta - D' - D_2, \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

где $U, A_1, D_1, B_1, C_1, D', D_2$ – коэффициенты, определяемые по выражениям:

$$\left. \begin{aligned}
 U &= \frac{c_1 \bar{l}_R + (m_1 + 0,5m_2)}{c_2 \bar{l}_R}; \\
 A_1 &= \frac{\rho_A F_{\Pi}}{\rho S_O c_2} \left(c_{YA} + \frac{c_{MA}}{\bar{l}_R} \right); \\
 D_1 &= \frac{2F_Y(v)(\bar{l}_{\Pi Y} + \bar{l}_R) + (T_{E1} + T_{E2})\bar{d}}{\rho c_2 \bar{l}_R S_O v^2}; \\
 B_1 &= \frac{\rho_A F_{\Pi}}{\rho \mu_1 r_v^2 S_P \bar{l}_R z_R}; \\
 C_1 &= \frac{(2m_1 + m_2)S_O}{z_R \mu_1 r_v^2 v^2 S_P \bar{l}_R} - \frac{\chi_k}{r_v}; \\
 D' &= \frac{2F_Y \text{ шв } \bar{l}_{\Pi Y} \bar{P}_M}{\rho \mu_1 z_R r_v^2 S_P \bar{l}_R}; \\
 D_2 &= \frac{(T_{E1} + T_{E2})\bar{d}}{\rho \mu_1 z_R r_v v^2 S_P \bar{l}_R}.
 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

В выражениях (10) z_R – количество рулей, расположенных за винтами, работающими на передний ход. На рис. 4 приведены результаты расчетов β и α_R для теплохода типа «Волгонефть» при работе винтов на передний ход без подруливающего устройства, работы винтов «враздрай» и использовании подруливающего устройства. Результаты расчетов показывают, что использование работы винтов «враздрай» и работы носового подруливающего устройства позволяют несколько снизить величину угла ветрового дрейфа, но необходим несколько больший угол перекладки руля.

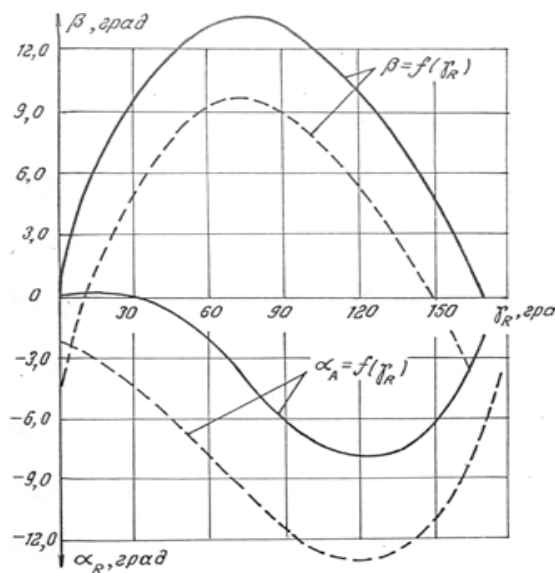


Рис. 4. Зависимость угла ветрового дрейфа и угла перекладки рулей теплохода проекта 1577 (в балласте) и скорости кажущегося ветра ($v_A = 10$ м/с) при скорости движения судна, равной 2 м/с

- при работе винтов на передний ход без носового подруливающего устройства;
 - - - при работе винтов «враздрай» и использовании носового подруливающего устройства.

Как показывает анализ аварийности судов, практический интерес представляет расчет маневра отворота с первоначальной линии пути в условиях ветра. В работах Н.Ф. Соларева [9] и Л.М. Рыжова [10] показано, что безопасность маневрирования судна при выполнении указанного маневра должна определяться элементами, характеризующими положение кормового перпендикуляра в различные моменты времени. Для оценки безопасности движения судов при выполнении маневра отворота необходимо рассмотреть следующие элементы (рис. 5):

- максимальное обратное смещение кормового перпендикуляра относительно первоначальной линии пути, характеризуемое величинами l_{oc} , l_1 и t_1 (точка А);
- смещение кормового перпендикуляра в момент ухода его с первоначальной линии пути, характеризуемое величинами l_2 , t_2 и Θ_c (точка С);
- максимальное прямое смещение кормового перпендикуляра вдоль первоначальной линии пути (l_3 и t_3) и выдвиг кормового перпендикуляра, характеризуемый величинами l_6 и t_6 (точка В), когда угол курса $\Theta = 90^\circ$ (в случае выполнения оборота судна).

Расчет параметров указанного маневра выполняется с использованием выражений, приведенных в работе [11]. Начальными условиями интегрирования дифференциальных уравнений являются параметры прямолинейного движения при ветре β , v , α_R получаемые из решения системы уравнений (7).

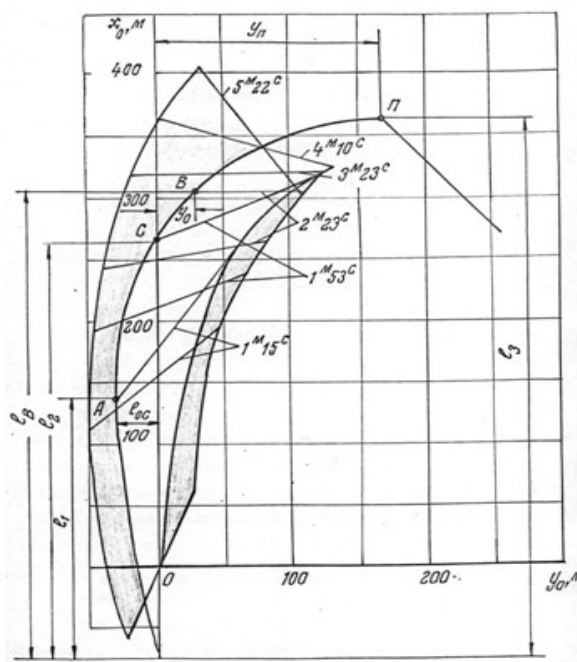


Рис. 5. Маневр отворот на ветер теплохода проекта 1565 в балласте при опасном направлении ветра по углу дрейфа ($n_1 = n_2 = 190$ об/мин; $\alpha_H = 35^\circ$)

■ – $v_{A6} = 18$ м/с; □ – $v_{A6} = 6$ м/с

За начало отсчета времени принимается момент начала перекладки рулевого органа. В табл. 1 и 2 показаны значения характеристик маневра оборота теплохода пр.1565 в балласте при движении со скоростью $v = 2,95$ м/с и перекладки насадок на угол $\alpha_H = 35^\circ$ «на ветер» и «под ветер» при опасном направлении истинного ветра по углу дрейфа и углу перекладки рулевого органа α_H . За величину сравнения приняты

соответствующие характеристики элементов циркуляционного движения судна в штилевых условиях, l_{oc} , l_1 , t_1 , l_2 , t_2 , Θ_c , l_3 , t_3 , l_B , t_B .

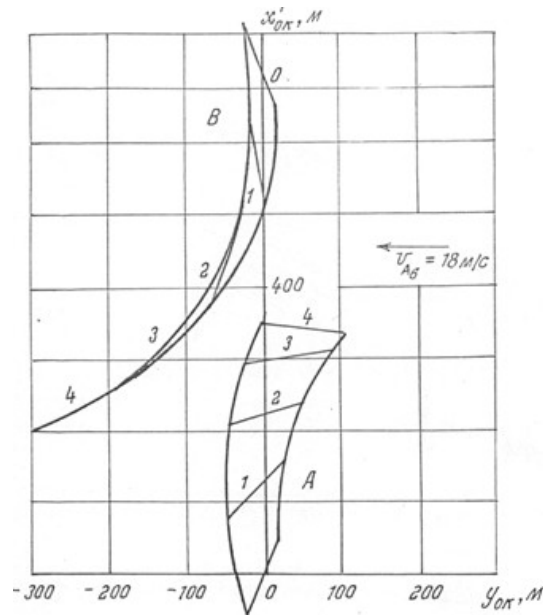


Рис. 6. Отворот на ветер (А) и под ветер (В) теплохода проекта 1565 в балласте при ветре опасного направления по углу дрейфа судна ($n_1 = n_2 = 190$ об/мин; $\alpha_H = 35^\circ$) 0; 1; ... 4 – положение судна на 0; 1; ... 4 мин. маневрирования

Таблица 1

Сравнительные характеристики элементов отворота теплохода проекта 1565 в балласте при ветре опасного направления по углу дрейфа судна

Характеристики	Скорости истинного ветра $V_{Aδ}$, м/с		
	6	12	18
Оборот «на ветер»			
$\bar{l}'_1$	0,89	0,82	0,65
$\bar{l}'_{oc}$	1,07	1,24	1,41
$\bar{l}'_2$	1,04	1,07	1,19
$\bar{l}'_3$	1,02	1,05	1,15
$\bar{l}'_B$	0,97	0,91	0,77
$\bar{t}'_1$	0,98	0,85	0,71
$\bar{t}'_2$	1,00	1,05	1,27
$\bar{t}'_3$	1,00	1,04	1,23
$\bar{t}'_B$	1,00	1,02	1,15
$\bar{\Theta}'_c$	1,01	1,05	1,16

Характеристики	Скорости истинного ветра V_{A6} , м/с		
	6	12	18
Оборот «под ветер»			
$\bar{l}'_1$	1,00	1,04	-
$\bar{l}'_{oc}$	0,86	0,35	-
$\bar{l}'_2$	0,99	0,98	-
$\bar{l}'_3$	1,00	1,24	1,80
$\bar{l}'_B$	1,00	1,27	1,92
$\bar{t}'_1$	1,00	1,14	-
$\bar{t}'_2$	0,95	1,04	-
$\bar{t}'_3$	1,09	1,23	1,67
$\bar{t}'_B$	1,00	1,29	2,00
$\bar{\Theta}'_c$	0,95	0,69	-

Таблица 2

**Сравнительные характеристики элементов отворота
теплохода проекта 1565 в балласте при ветре опасного направления
по углу перекладки рулевого органа**

Характеристики	Скорости истинного ветра v_{A6} , м/с		
	6	12	18
Оборот «на ветер»			
$\bar{l}'_1$	1,00	1,43	2,10
$\bar{l}'_{oc}$	1,10	0,55	0,93
$\bar{l}'_2$	1,03	1,16	1,73
$\bar{l}'_3$	1,03	1,26	2,12
$\bar{l}'_B$	1,00	1,18	1,53
$\bar{t}'_1$	1,00	1,29	1,71
$\bar{t}'_2$	1,05	1,09	1,54
$\bar{t}'_3$	1,10	1,29	2,43
$\bar{t}'_B$	1,00	1,10	1,29
$\bar{\Theta}'_c$	1,00	0,91	1,00
Оборот «под ветер»			
$\bar{l}'_1$	1,00	0,80	0,79
$\bar{l}'_{oc}$	1,00	1,24	1,41
$\bar{l}'_2$	1,00	1,08	1,29

Характеристики	Скорости истинного ветра v_{46} , м/с		
	6	12	18
$\bar{l}_3'$	1,00	1,05	1,72
$\bar{l}_B'$	1,00	0,96	0,89
$\bar{l}_1'$	1,00	0,86	0,85
$\bar{l}_2'$	1,00	1,05	1,27
$\bar{l}_3'$	1,00	1,10	2,19
$\bar{l}_B'$	1,00	0,96	0,93
$\bar{\Theta}_c'$	1,00	1,14	1,30

Данные табл. 1 и 2 и рис.6 позволяют сделать следующие выводы. Величины, характеризующие элементы отворота при ветре в разной степени зависят от скорости и направления ветра, кроме того, прослеживается нелинейный характер этих зависимостей.

Наибольшая акватория требуется судну при выполнении отворота «под ветер» при опасном направлении ветра по углу перекладки рулевого органа. Причем, в большей мере в этом случае от скорости ветра зависят величины l_1 , l_2 , l_3 , t_1 , t_2 , t_3 , в меньшей – величина l_{oc} и Θ_c .

Результаты исследований характеристик движения и элементов маневрирования позволяют оценить возможность безопасного движения и маневрирования судов при ветре в различных условиях плавания.

Список литературы:

- [1] Токарев П.Н. Анализ аварийности судов на рейдах /Горьков. ин – т инж. водн. трансп. (ГИИВТ). – Горький, 1984. – 12 с. Деп. в ЦБНТИ Минречфлота РСФСР 3.12.84 № 66 РФ – Д – 64.
- [2] Гофман А.Д. Теория и расчет поворотливости судов внутреннего плавания, – Л.: Судостроение, 1971. – 256 с.
- [3] Павленко В.Г. Маневренные качества судов и составов (Управляемость судов и составов). – М.: Транспорт, 1979. – 184 с.
- [4] Першиц Р.Я. Управляемость и управление судном. – Л.: Судостроение, 1983. – 272 с.
- [5] Справочник по теории корабля. Т. 3. Управляемость водоизмещающих судов. Гидродинамика судов с динамическими принципами поддержания / Под ред. Я.И.Войткунского. – Л.: Судостроение, 1985. – 544 с.
- [6] Лебедев Э.П. и др. Средства активного управления судами. – Л.: Судостроение, 1969. – 264 с.
- [7] Аганин Е.В., Гофман А.Д. Требования к эффективности подруливающих устройств судов //Повышение технического уровня и качества судов речного флота. – Ленинград, 1982. – С. 112 – 118.
- [8] Павленко В.Г. Элементы теории судовождения на внутренних водных путях. Ч.III. – М.: Транспорт, 1971. – 144 с.
- [9] Соларев Н.Ф. Безопасность маневрирования речных судов и составов. – М.: Транспорт, 1980, – 215 с.
- [10] Рыжов Л.М. Управляемость толкаемых составов. – М.: Транспорт, 1969. – 128 с.
- [11] Токарев П.Н. Математическая модель произвольного движения и маневрирования судна // Н.Новгород. Вестник «ВГАВТ» №56, 2018. – С. 198 – 214.

ESTIMATION OF SAFETY MANEUVERING CONDITIONS OF THE VESSEL IN WIND AT LOW SPEEDS

Tokarev Pavel N., *Candidat of Engineering Science, Associate Professor
of the Department of Ship Handling and Safety of Navigation
Volga State University of Water Transport,
5, Nesterov st, Nizhniy Novgorod, 603951*

Keywords: *ship, a limited area, wind, thruster, propellers «vrazdray» possible to hold the vessel «in place», straight-line motion, calculated.*

The paper presents studies of safe conditions for maneuvering ships in the wind on a limited size of the water area. The calculated dependences on the definition of permissible wind speeds at which it is possible to hold the vessel «in place». The angles of wind drift and the angles of the steering body shift in rectilinear motion using the bow thruster and the mode of operation «vrazdray», as well as the maneuver of the ship's lapel from the path line in the wind are obtained

References

- [1] Tokarev P.N. Analiz avariynosti sudov na reyдах /Gor'kov. in – t inzh. vodn. transp. (GIIVT). – Gor'kiy, 1984. – 12 s. Dep. v TsBNTI Minrechflota RSFSR 3.12.84 № 66 RF – D – 64.
- [2] Gofman A.D. Teoriya i raschet povorotlivosti sudov vnutrennego plavaniya, – L.: Sudostroenie, 1971. – 256 s.
- [3] Pavlenko V.G. Manevrennye kachestva sudov i sostavov (Upravlyaemost' sudov i sostavov). – M.: Transport, 1979. – 184 s.
- [4] Pershits R.Ya. Upravlyaemost' i upravlenie sudnom. – L.: Sudostroenie, 1983. – 272 s.
- [5] Spravochnik po teorii korablya. T.3. Upravlyaemost' vodoizmeshchayushchikh sudov. Gidrodinamika sudov s dinamicheskimi printsipami podderzhaniya / Pod red. Ya.I.Voytkunskogo. – L.: Sudostroenie, 1985. – 544 s.
- [6] Lebedev E.P. i dr. Sredstva aktivnogo upravleniya sudami. – L.: Sudostroenie, 1969. – 264 s.
- [7] Aganin E.V., Gofman A.D. Trebovaniya k effektivnosti podruivayushchikh ustroystv sudov //Povyshenie tekhnicheskogo urovnya i kachestva sudov rechnogo flota. – Leningrad, 1982. – S.112 – 118.
- [8] Pavlenko V.G. Elementy teorii sudovozhdeniya na vnutrennikh vodnykh putyakh. Ch.III. – M.: Transport, 1971. – 144 s.
- [9] Solarev N.F. Bezopasnost' manevrirovaniya rechnykh sudov i sostavov. – M.: Transport, 1980, – 215 s.
- [10] Ryzhov L.M. Upravlyaemost' tolkaemykh sostavov. – M.: Transport, 1969. – 128 s.
- [11] Tokarev P.N. Matematicheskaya model' proizvol'nogo dvizheniya i manevrirovaniya sudna // N.Novgorod. Vestnik «VGAVT» №56,2018.- S.198 – 214.

Статья поступила в редакцию 20.06.2019 г.

УДК 656.614.3:004.42

Тимошек Елена Сергеевна, старший преподаватель кафедры управления морским транспортом МГУ им. адм. Г.И. Невельского,
e-mail: timoshek-es@mail.ru

Маликова Татьяна Егоровна, доктор технических наук, профессор кафедры теории и устройства судна МГУ им. адм. Г.И. Невельского,
e-mail: tanmalik@mail.ru

Морской государственный университет имени адмирала Г.И. Невельского
(МГУ им. адм. Г.И. Невельского)
690059, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50а

РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНАЯ МОДЕЛЬ СУДОВ СНАБЖЕНИЯ АРКТИЧЕСКОГО РЕГИОНА НА УЧАСТКЕ ТРАНСПОРТНОЙ СЕТИ

Ключевые слова: морской транспорт, логистика, моделирование, управление работой флота, трамповое судоходство, цифровизация.

Аннотация: В статье рассмотрены современные подходы к решению задачи оптимальной расстановки флота. На основании анализа трудов различных авторов сделан вывод, что класс расстановочных моделей развивается и совершенствуется в направлении адаптации их к разнообразным условиям работы морского транспорта, реализация математических моделей осуществляется методами линейного программирования в среде прикладных программ пакета MATLAB. Результатом выполненного исследования является модель оптимального управления работой судов снабжения Арктического региона. В качестве объекта расстановки судов был выбран участок транспортной сети, состоящий из трех портов: порт отправления, промежуточный порт (где выгружаются и загружаются попутные партии груза), порт назначения. За критерий оптимальности приняли комплексные расходы судна за навигационный период. Практическое применение предложенной модели позволяет обеспечить оптимальное управление каботажными перевозками в транспортном комплексе, выполнить оценку эффективности использования судна на конкретном участке транспортной сети.

Введение

В Российской Федерации уделяется серьезное внимание развитию Арктики: реализуется комплексная государственная программа, связанная с деятельностью определенного ряда федеральных органов исполнительной власти [1, 2]. Наряду с транзитными, экспортно-импортными перевозками, предполагается увеличение каботажных грузопотоков, определяемых внутренними государственными, а также социальными потребностями [3]. Приоритетной частью российской государственной политики в развитии Арктики является использование Северного морского пути (СМП).

Развитие Мурманской, Архангельской областей, Ненецкого и Чукотского автономных округов, республики Коми и других регионов напрямую связывают с использованием транспортной составляющей СМП [4]. Так как в настоящий момент СМП не может рассматриваться как конкурентоспособный международный транспортный коридор с экономически оправданным судоходством, то реально развивать внутренние перевозки, оправдывая использование этого транспортного направления своей грузовой базой. Более того, морские перевозки в этом регионе рассматриваются как жизненно-необходимые: снабженческие – регулярные в северные порты, портопункты и гидросооружения; экспедиционные в портопункты, на необорудованный берег;

строительные в портопункты и на необорудованный берег и сооружения (гидротехнические, гидрометеорологические, навигационные, шельфовые) [5, 6].

Таким образом, определяется актуальная научная задача: повышение экономической эффективности перевозок в Арктике и комплексное снижение расходов по доставке грузов. Эта задача не может быть решена без создания современной системы планирования работы судов снабжения в Арктическом морском бассейне на основе оптимизации получаемых решений.

Методы и материалы

Решение оптимизационных задач морского транспорта – это сложный многоступенчатый творческий процесс, требующий при создании математических моделей учитывать и анализировать большие массивы как входных, так и выходных параметров, а также неоднократного возврата на предыдущие ступени моделирования для уточнения структурных элементов модели. С развитием ИТ-технологий и появлением персональных компьютеров наличие большого количества переменных в модели, а также итерационность большинства математических методов перестает быть проблемой для численной реализации оптимизационных задач. Исходя из этого, натурный эксперимент без каких-либо проблем может быть заменен численным, что в конечном итоге ускоряет процесс принятия управленческих решений и выводит его на более качественный уровень [7].

Таким образом, обосновано возрастает интерес специалистов к разработке инструментария для диагностики состояния систем управления работой порта и флота на основе математического моделирования, что подтверждается обзорами как российских, так и зарубежных источников, представленных в статьях [8, 9]. Например, для анализа существующей системы терминальной обработки грузов и оценки работоспособности предлагаемых вариантов развития системы на основе имитационного моделирования были разработаны для портовых терминалов математические модели различных технологических процессов [10–15]. В работе [16] выполнена оценка эффективности использования бюджета рабочего времени морского терминала, проектируемого в арктическом регионе, на основе метода Монте-Карло. В ходе выполнения исследования была решена задача моделирования случайных величин внешних факторов, оказывающих влияние на работу терминала, таких как ветер, ледовые условия, температура, неисправность оборудования с целью вычисления характеристик их распределений. Приведем еще один пример применения метода Монте-Карло для диагностики состояния системы управления, но уже работой флота ак, в статье [17] представлена математическая модель выбора варианта доставки груза транспортно-экспедиторскими компаниями с одновременным использованием двух критериев оптимальности: минимизации затрат и минимизации времени доставки груза конечному получателю. В последние годы кроме имитационного моделирования и метода Монте-Карло в морской практике стали активно разрабатываться и применяться математические модели на основе теории катастроф для диагностики состояния систем управления морских динамических объектов [18]. Например, предложено использовать математическую модель катастрофы сборки для диагностики процесса развития опасных ситуаций, связанных со смещением груза при морских перевозках [19].

Кроме перечисленных выше задач и методов их решения продолжает развиваться и математический аппарат для решения традиционной задачи морского транспорта – задачи расстановки флота. Классическая модель задачи расстановки флота по линиям и методы ее решения представлена в источнике [20, с. 166]. Обзор литературы показывает, что класс расстановочных моделей флота постоянно пополняется новыми моделями, учитывающими как специфику флота (например, универсальный), так и место его работы (например, линейное судоходство или бассейновая схема расстановки флота), т. е. развитие данного математического аппарата идет в направлении адаптации модели к новым условиям работы транспорта [21–23]. Апробированный в этих

В качестве объекта исследования рассматривалась транспортно-экспедиторская деятельность компании ООО «МаринТЭК», Приоритетное направление деятельности компании связано с обеспечением районов Севера, восточной Арктики грузами снабжения, топливом и т.п.

Результаты

Отправление числа партий груза на i -м судне и j -ом участке вычисляется по формуле:

$$q_{ij} = \begin{cases} q_{lz} + q_{lp}, \\ q_{lz} + q_{pz}, \end{cases}$$

где $q_{lz} + q_{lp}$ – партия груза, следующая из пункта отправления до промежуточного пункта;

$q_{lz} + q_{pz}$ – партия груза, следующая из промежуточного пункта до конечного пункта.

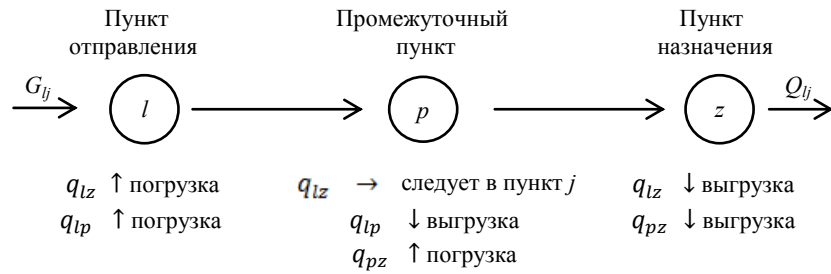


Рис. 2. Схема процесса доставки партий груза на участке транспортной сети

Математическая модель. За параметры управления примем X_{ij} – количество рейсов i -го судна из l -го пункта отправления.

Критерий оптимальности – минимизация комплексных расходов за эксплуатационный период судна (целевая функция):

$$Z = R_j + R_{ст} \rightarrow \min, \quad (1)$$

где R_j – расходы за перевозку грузовых мест, – расходы на грузовые работы в промежуточном p -м порту, в ден. ед.

Расходы за рейс i -того судна на j -ом участке определяется по формуле:

$$R_{ij}^{1p} = r_{ij}^{1zp.m} \times G_{ij}, \quad (2)$$

где $r_{ij}^{1zp.m}$ – тариф на перевозку одного грузового места, ден. ед./шт.;

G_{ij} – количество грузовых мест за один рейс, (шт., тонны)

Количество грузовых мест вычисляется по формуле:

$$G_{ij} = q_{lz} + q_{lp} + q_{pz},$$

где q_{lz} – количество грузовых мест, следующих из пункта назначения в конечный пункт прибытия, транзитные партии груза (шт., тонны);

q_{lp} – количество грузовых партий, следующих из пункта назначения в промежуточный пункт, (шт., тонны);

q_{pz} – количество грузовых партий, следующих из промежуточного пункта в пункт прибытия, (шт., тонны).

Расходы за перевозку одного грузового места определим как:

$$r_{ij}^{1гр.м} = \begin{cases} r_{lz}^{1гр.м} - \text{расходы за перевозку одного транзитного} \\ \text{грузового места из пункта назначения до конечного пункта;} \\ r_{lp}^{1гр.м} - \text{расходы за перевозку одного грузового места из} \\ \text{пункта назначения до промежуточного пункта;} \\ r_{pz}^{1гр.м} - \text{расходы за перевозку одного грузового места из} \\ \text{промежуточного пункта до пункта прибытия.} \end{cases}$$

Таким образом, с учетом выше представленных обозначений, расходы за рейс i -го судна на j -ом участке (2) будут определяться как:

$$R_{ij}^{1p} = r_{lz}^{1zp.м} \times q_{lz} + r_{lp}^{1zp.м} \times q_{lp} + r_{pz}^{1zp.м} \times q_{pz}.$$

Тогда расходы за транспортировку груза в эксплуатационный период составят:

$$R_3 = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n R_{ij}^{1p} \times X_{ij} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (r_{lz}^{1zp.м} \times q_{lz} + r_{lp}^{1zp.м} \times q_{lp} + r_{pz}^{1zp.м} \times q_{pz}) \times X_{ij} \quad (3)$$

Расходы на грузовые операции в промежуточном порту за эксплуатационный период вычисляются по формуле:

$$R_{cm} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n R_{ij}^{cm.n} \times X_{ij}, \quad (4)$$

где $R_{ij}^{cm.n}$ – расходы на грузовые операции в рейсе в промежуточном порту, ден. ед.

Расходы на грузовые операции в промежуточном порту в рейсе определяются:

$$R_{ij}^{cm.n} = s_{cm}^{612} \times q_{lp} + s_{cm}^{noz} \times q_{pz},$$

где s_{cm}^{612} , s_{cm}^{noz} – тарифная ставка на грузовые работы в порту на погрузку и выгрузку, ден. ед./шт. (ден. ед./т),

q_{lp} – количество грузовых партий, следующих из пункта назначения в промежуточный пункт, (шт., тонны);

q_{pz} – количество грузовых партий, следующих из промежуточного пункта в пункт прибытия, (шт., тонны).

Таким образом, с учетом (3) и (4) целевая функция (1) примет окончательный вид:

$$Z = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n ((r_{lz}^{1zp.м} \times q_{lz} + r_{lp}^{1zp.м} \times q_{lp} + r_{pz}^{1zp.м} \times q_{pz}) + (s_{cm}^{612} \times q_{lp} + s_{cm}^{noz} \times q_{pz})) \times X_{ij} \rightarrow \min. \quad (5)$$

Система ограничений математической модели будет состоять из трех групп.

Первая группа ограничений. Продолжительность работы каждого i -го судна (сутки) на j -ом участке должна быть не больше эксплуатационного периода T_i^3 .

$$\sum_{j=1}^n t_{ij}^p \times X_{ij} \leq T_i^3, (i = \overline{1, m}), \quad (6)$$

где t_{ij}^p – время рейса i -го судна на j -ом участке, сутки;

T_i^3 – эксплуатационный период i -го судна (сутки).

Вторая группа ограничений. В каждом l -ом пункте отправления должен быть обеспечен вывоз грузовых партий в количестве G_{lz} за эксплуатационный период:

$$G_{iz} = \begin{cases} G_{iz} - \text{количество грузовых партий, следующих из пункта} \\ \text{отправления в пункт назначения} \\ G_{ip} - \text{количество грузовых партий, следующих из пункта} \\ \text{отправления в промежуточный пункт} \\ G_{pz} - \text{количество грузовых партий, следующих из} \\ \text{промежуточного пункта в конечный пункт} \end{cases} .$$

Таким образом, объем перевозок за эксплуатационный период составляет:

$$Q_{ij} = G_{iz} + G_{ip} + G_{pz} ,$$

где Q_{ij} – грузопоток в эксплуатационном периоде, шт., тонны.

Объем перевозок за эксплуатационный период можно представить как:

$$Q_{ij} = \sum_{i=1} G_{ij}^{1p} \times X_{ij} , \quad (7)$$

где G_{ij}^{1p} – количество грузовых партий, доставленных за один рейс на i -м судне и j -ом участке.

Если количество доставленных партий груза за один рейс выразить как:

$$G_{ij}^{1p} = q_{iz} + q_{ip} + q_{pz} .$$

И подставить это выражение в (7) получим:

$$\sum_{i=1}^m ((q_{iz} + q_{ip} + q_{pz}) \times X_{ij}) = Q_{ij} . \quad (8)$$

Третья группа ограничений. Количество грузовых партий, загружаемых в промежуточном порту, не должно превышать количества выгруженных партий в этом порту (шт., тонны):

$$(\sum q_{ip} - \sum q_{pz}) \times X_{ij} \geq 0 . \quad (9)$$

Условие неотрицательности переменных: число рейсов X_{ij} – i -го судна на j -ом участке должно быть неотрицательным, т. е.:

$$X_{ij} \geq 0 \quad (i = \overline{1; m}; j = \overline{1; n}) . \quad (10)$$

Математическая модель (5), (6), (8), (9) и (10) является распределительной моделью судов снабжения на участке транспортной сети.

Выводы

Практическое применение предложенной модели позволит обеспечить оптимальное управление каботажными перевозками в транспортном комплексе, выполнить оценку эффективности использования судна на конкретном участке транспортной сети. Учет получаемой в процессе моделирования информации дает возможность лицу, принимающему решения, разрабатывать обоснованные решения, направленные на повышение конкурентоспособности оказываемых транспортных услуг, а также оценивать их эффективность.

Обсуждение

Построенная математическая модель является смешанной задачей линейного программирования и может быть реализована на платформе универсального пакета

MATLAB с использованием функции `linprog` из дополнения OptimizationToolbox. Преимущество использования данной программы заключается не только в том, что можно получать оптимальный план для задач с большим массивом переменных, но и выполнять анализ полученного оптимального плана на чувствительность к изменению входных параметров. Алгоритм решения классической задачи линейного программирования в пакете MATLAB представлен в работе [24]. В статье достаточно подробно и наглядно показаны следующие этапы решения задачи: получение оптимального плана прямой задачи, определение дефицитных ресурсов, получение множителей Лагранжа и интервалов устойчивости ресурсов. Для того, чтобы применить данный алгоритм к решению модели, рассмотренной в данном исследовании, необходимо внести незначительные изменения в используемые алгоритмы [24], выполнить настройку работы с большими массивами данных через оформление последних в виде записей баз данных.

Список литературы:

- [1] Основы государственной политики Российской Федерации в Арктике на период до 2020 года и дальнейшую перспективу. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.rg.ru/2009/03/30/arktikaosnovy-dok.html> (дата обращения – 27.05.2019).
- [2] Стратегия развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2020 года. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://government.ru/news/432/> (дата обращения – 27.05.2019).
- [3] Постановление Правительства Российской Федерации от 21 апреля 2014 г. № 366 «Об утверждении государственной программы Российской Федерации «Социально-экономическое развитие Арктической зоны Российской Федерации на период до 2020 года»». [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://programs.gov.ru/Portal/programs/passport/38> (дата обращения – 27.05.2019).
- [4] Предмет деятельности и функции АСМП. Официальный сайт Федерального государственного казенного учреждения «Администрация Северного морского пути». [Электронный ресурс] Режим доступа: http://asmp.morflot.ru/ru/celi_funktsii/ (дата обращения – 12.04.2019).
- [5] Давыденко А.А. Обоснование концепции создания транспортной системы совместного использования в Арктическом регионе Российской Федерации / А.А. Давыденко, А.В. Кириченко, А.Л. Кузнецов // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. – 2015. – № 3 (31). С. 120–124.
- [6] Давыденко А.А. Повышение экономической эффективности перевозок в Арктике / А.А. Давыденко, А.В. Кириченко, А.Л. Кузнецов // Инновации. – 2015. – № 6 (200). – С. 117–120.
- [7] Янченко А.А. Экспериментальные исследования влияния зонирования контейнерного терминала на эффективность его работы в условиях свободного порта Владивосток / А. А. Янченко, Т. Е. Маликова, Д. А. Оськин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. – 2019. – Т. 11. – № 1. – С. 57-67. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-1-57-67.
- [8] Дмитриенко Д.В. Исследование операций – инструмент для повышения эффективности управления водным транспортом / Д.В. Дмитриенко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. – 2017. – Т. 9. – № 5. – С. 1131-1141. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-5-1131-1141.
- [9] Янченко А.А. Научные подходы к исследованию процессов функционирования морских портов и портовых терминалов / А.А. Янченко // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. – 2018. – № 55. – С. 185–192.
- [10] Tan C. Integrated Yard Space Allocation and Yard Crane Deployment Problem in Resource-Limited Container Terminals / C. Tan, J. He // Scientific Programming. – 2016. – Vol. 2016. – Article No. 13. DOI: 10.1155/2016/6421943.
- [11] Янченко А.А. Дискретно-событийная модель в задачах эксплуатации контейнерных терминалов / А.А. Янченко, Т.Е. Маликова // Эксплуатация морского транспорта. – 2017. – № 4 (85). – С. 25–31.
- [12] Kuznetsov A.L. Simulation Model of Container Land Terminals / A. L. Kuznetsov, A.V. Kirichenko, J.J. Eglit // TransNav. – 2018. – Vol. 12. – Num. 2. – Pp. 321–326. DOI: 10.12716/1001.12.02.13.

- [13] Маликова Т.Е. Модель массового обслуживания импортного грузопотока с применением технологии предварительного информирования / Т.Е. Маликова, А.А. Янченко, И.Н. Вольнов // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. – 2017. – Т. 9 – № 2. – С. 280–287. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-2-280-287.
- [14] Wang L. Rail mounted gantry crane scheduling optimization in railway container terminal based on hybrid handling mode / L. Wang, X. Zhu // Computational Intelligence and Neuroscience. – 2014. – Vol. 2014. – Article No. 31. DOI: 10.1155/2014/682486.
- [15] Янченко А.А. Разработка модели исследования влияния зонирования контейнерного терминала на эффективность его работы / А.А. Янченко, Т. Е. Маликова, И.Н. Вольнов // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. – 2017. – Т. 9. – № 4. – С. 704–713. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-4-704-713.
- [16] Сампиев А.М. Применение метода Монте-Карло для оценки эффективности использования бюджета рабочего времени морского терминала / А. М. Сампиев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. – 2019. – Т. 11. – № 1. – С. 68-77. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-1-68-77.
- [17] Эглит Я.Я. Математическое моделирование выбора варианта доставки груза транспортно-экспедиторскими компаниями / Я.Я. Эглит, К.Я. Эглите, А.А. Ковтун, А.Ю. Рюзин, А.А. Дмитриев // Эксплуатация морского транспорта. – 2019. – № 1 (90). – С. 15–22.
- [18] Вольнов И.Н. Катастрофа сборки и моделирование морских динамических объектов в экстремальных ситуациях / И.Н. Вольнов, А.С. Шпак // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. – 2018. – № 57. – С. 184–190.
- [19] Маликова Т. Е. Исследование системы обеспечения технологической безопасности морских судов методами теории катастроф / Т.Е. Маликова, М.А. Москаленко // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2014. – № 3. – С. 94–97.
- [20] Маликова Т.Е. Математические методы и модели в управлении на морском транспорте: учебное пособие / Т.Е. Маликова. – 2-е изд., испр. и доп. – М. : Издательство Юрайт, 2018. – 373 с. – (Серия 11: Университеты России).
- [21] Вишневский Д. О. Расстановка универсального флота в линейном судоходстве / Д.О. Вишневский // Сборник научных трудов SWorld. – 2013. – Т. 2 – № 4. – С. 85–89.
- [22] Салько Д.Ю. Применение линейного моделирования при планировании работы флота судоходной компании / Д.Ю. Салько, К.М. Искандаров // Вестник государственного морского университета им. адмирала Ф.Ф. Ушакова. – 2012. – № 1(1). – С. 81–84.
- [23] Нырков А.П. Информационное обеспечение модели оптимизации бассейновой схемы расстановки флота / А. П. Нырков // Наукоемкие технологии. – 2003. – Т. 4 – № 8. – С. 20–23.
- [24] Бородин Г.А. Использование среды MATLAB при решении задач линейного программирования / Г.А. Бородин, В.А. Титов, И.Н. Маслякова // Фундаментальные исследования. – 2016. – № 11–1. – С. 23–26.

ROUTING MODEL FOR SUPPLY SHIPS OPERATING IN THE ARCTIC REGION TRANSPORT NETWORK

Timoshek Elena S., Senior Lecturer, Department of Maritime Transport Management,
Maritime State University named after adm. G.I. Nevelskoy,
50a, Verkhneportovaya St, Vladivostok, 690059

Malikova Tatyana E., Doctor of Technical Sciences, Professor of the Theory and
Design of Vessels, Maritime State University named after adm. G.I. Nevelskoy,
50a, Verkhneportovaya St, Vladivostok, 690059

Keywords: sea transport, logistics, modeling, fleet management, tramp shipping, digitalization.

Annotation. This article considers some of the modern approaches to solving the problem of optimal fleet routing. Based on the analysis of the studies of various authors, it is concluded that the class of vessels routed is being developed and improved in the direction of adapting them to various working conditions of maritime transport, and the implementation of mathematical models is carried out with the use of linear programming methods available in

MATLAB environment. The result of the study is an optimization model intended to provide the best control of the operation of supply vessels in the Arctic region. As the target for determining supply vessels routing, a transport network segment including three ports was chosen: the port of departure, the intermediate port (where the way cargoes are unloaded and loaded), and the port of destination. Compound operational costs of the vessel during the navigation period were taken as the optimality criterion. The practical application of the proposed model makes it possible to provide the best management of coastal traffic in the sea transport infrastructure, to assess the effectiveness of the use of a vessel in a particular node of the transport network.

References:

- [1] Osnovy gosudarstvennoj politiki Rossijskoj Federacii v Arktike na period do 2020 goda i dal'nejshuju perspektivu. [Elektronnyj resurs] Rezhim dostupa: <http://www.rg.ru/2009/03/30/arktikaosnovy-dok.html> (data obrashhenija – 27.05.2019)
- [2] Strategija razvitiya Arkticheskoy zony Rossijskoj Federacii i obespecheniya nacional'noj bezopasnosti na period do 2020 goda. [Elektronnyj resurs] Rezhim dostupa: <http://government.ru/news/432/> (data obrashhenija – 27.05.2019)
- [3] Postanovlenie Pravitel'stva Rossijskoj Federacii ot 21 aprelya 2014 g. № 366 «Ob utverzhdenii gosudarstvennoj programmy Rossijskoj Federacii «Social'no-jekonomicheskoe razvitie Arkticheskoy zony Rossijskoj Federacii na period do 2020 goda»». [Elektronnyj resurs] Rezhim dostupa: <http://programs.gov.ru/Portal/programs/passport/38> (data obrashhenija – 27.05.2019)
- [4] Predmet dejatel'nosti i funkcii ASMP. Oficial'nyj sayt Federal'nogo gosudarstvennogo kazennogo uchrezhdenija «Administracija Severnogo morskogo puti». [Elektronnyj resurs] Rezhim dostupa: http://asmp.morflot.ru/ru/celi_funktsii/ (data obrashhenija – 12.04.2019).
- [5] Davydenko, A.A., A.V. Kirichenko, and A.L. Kuznecov. «Obosnovanie koncepcii sozdaniya transportnoj sistemy sovmestnogo ispol'zovaniya v Arkticheskom regione Rossijskoj Federacii.» *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova* 3 (31) (2015): 120–124.
- [6] Davydenko, A.A., A.V. Kirichenko, and A.L. Kuznecov. «Povyshenie jekonomicheskoy jeffektivnosti perevozok v Arktike.» *Innovacii* 6 (200) (2015): 117–120.
- [7] Yanchenko, Anna A., Tatiana E. Malikova, and Dmitry A. Oskin. «Experimental studies of the impact of a container terminal zoning on its operation efficiency under the conditions of the free port Vladivostok.» *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.1 (2019): 57–67. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-1-57-67.
- [8] Dmitrienko, Dmitry V. «Operations research – a tool to improve the efficiency of management of water transport.» *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 9.5 (2017): 1131–1141. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-5-1131-1141.
- [9] Yanchenko, A.A. «Scientific approaches to the sea ports and port terminals operating processes study.» *Vestnik Volzhskoj gosudarstvennoj akademii vodnogo transporta* 55 (2018): 185–192.
- [10] Tan, Caimao, and Junliang He. «Integrated Yard Space Allocation and Yard Crane Deployment Problem in Resource-Limited Container Terminals.» *Scientific Programming* 2016 (2016): 13. DOI: 10.1155/2016/6421943.
- [11] Yanchenko, A.A., and T.E. Malikova. «A discrete-event model for operations in container terminals.» *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 4 (85) (2017): 25–31.
- [12] Kuznetsov, A.L., A.V. Kirichenko, and J.J. Eglit. «Simulation Model of Container Land Terminals.» *TransNav* 12.2 (2018): 321–326. DOI: 10.12716/1001.12.02.13.
- [13] Malikova, Tatiana E., Anna A. Yanchenko, and Igor N. Volnov. «The model of massive handling cargo flow for import with the use of preliminary informing technology.» *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.2 (2017): 280–287. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-2-280-287.
- [14] Wang, Li, and Xiaoning Zhu. «Rail mounted gantry crane scheduling optimization in railway container terminal based on hybrid handling mode.» *Computational intelligence and neuroscience* 2014 (2014): 31. DOI: 10.1155/2014/682486.
- [15] Yanchenko, Anna A., Tatiana E. Malikova, and Igor N. Volnov. «Developing the model for study of terminal zoning impact on its operating efficiency.» *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.4 (2017): 704–713. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-4-704-713.

- [16] Sampiev, Adam M. «Monte-Carlo simulation for the efficiency assessment of marine terminal working time budget using.» *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.1 (2019): 68–77. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-1-68-77.
- [17] Eglit Y.Y., C.Y. Eglite, A. A. Kovtun, A Y Rusin, and A. A. Dmitriev. «Mathematical modeling of choice of variant of delivery of cargo forwarding companies.» *Jekspluatacija morskogo transporta* 1 (90) (2019): 15–22.
- [18] Volnov I.N., and A.S. Shpak. «Assembly catastrophe and modeling of marine dynamic objects in extreme situations» *Vestnik Volzhskoj gosudarstvennoj akademii vodnogo transporta* 57 (2018): 184–190.
- [19] Malikova T. E., and M.A. Moskalenko. «Catastrophe theory application to the study of the system of ensuring sea-going vessels' technological safety.» *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka* 3 (2014): 94–97.
- [20] Malikova T. E. *Matematicheskie metody i modeli v upravlenii na morskome transporte: uchebnoe posobie*. 2-e izd., ispr. i dop. M. : Izdatel'stvo Jurajt, 2018. – 373 p. – (Serija 11: Universitety Rossii).
- [21] Vishnevskij D.O. «Rasstanovka universal'nogo flota v linejnom sudohodstve.» *Sbornik nauchnyh trudov SWorld* 2.4 (2013): 85–89.
- [22] Salko D. Y., and K. M. Iskandarov. «The Application of linear modeling while planning the shipping company operation.» *Vestnik gosudarstvennogo morskogo universiteta im. admirala F.F. Ushakova* 1(1) (2012): 81–84.
- [23] Nyrkov A. P. «Supply with information of optimization model of arrangement of fleet.» *Naukoemkie tehnologii* 4.8 (2003): 81–84.
- [24] Borodin G. A., V.A. Titov, and I.N. Masljakova «Solving linear programming problems with MATLAB.» *Fundamental'nye issledovaniya* 11–1 (2016): 23–26.

Статья поступила в редакцию 06.08.2019 г.

Раздел V

**Эксплуатация судового
энергетического оборудования**

Section V

Operation of ship power equipment

УДК 621.311.68

Бурмакин Олег Анатольевич, доцент, к.т.н., доцент кафедры
«Электротехника и электрооборудование объектов водного транспорта»,
ФГБОУ ВО «ВГУВТ»; e-mail: boa_71@mail.ru

Малышев Юрий Сергеевич, доцент, к.т.н., доцент кафедры «Электротехника и
электрооборудование объектов водного транспорта»,
ФГБОУ ВО «ВГУВТ», e-mail: elektrikasp@mail.ru

Попов Сергей Васильевич, доцент, к.т.н., доцент кафедры «Электротехника
и электрооборудование объектов водного транспорта»,
ФГБОУ ВО «ВГУВТ»; e-mail: popovse3@yandex.ru

Шилов Максим Петрович, аспирант, ФГБОУ ВО «ВГУВТ»
e-mail: electrotech@vgavt-nn.ru

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
образования «Волжский государственный университет водного транспорта»
(ФГБОУ ВО «ВГУВТ»)

603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ РЕАЛЬНОЙ СУДОВОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ И ЕЕ МОДЕЛИ В ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ

Ключевые слова: судовая электростанция, синхронизация, параллельная работа, переходные процессы.

Аннотация. В статье приведены результаты моделирования переходных процессов судовой электростанции и осциллограммы переходных процессов реальной судовой электростанции. Приведено сравнение переходных процессов для различных режимов работы электростанции: синхронизации, ступенчатом подключении нагрузки на параллельно работающие генераторы, распределение и перевод нагрузки на один из параллельно работающих генераторов. Сделаны выводы о соответствии качества переходных процессов и о величине погрешности результатов моделирования связанной с несовершенством модели. Предложены способы усовершенствования модели путем осуществления процесса синхронизации в автоматическом режиме, а также модернизации системы управления электростанцией путем внедрения блоков синхронизации и распределения нагрузок.

Введение

Исследование переходных процессов [1] судовой электростанции (СЭС) в режиме реального времени является достаточно сложной, а в некоторых случаях и невозможной задачей. Как правило, это связано с необходимостью использования высокоточной, а, следовательно, и дорогой аппаратуры.

В свою очередь, моделирование сложных систем [2], таких как СЭС, позволяет построить переходные процессы с их отображением с высоким качеством для детальной оценки [3–8].

Цель и задачи

Целью работы является оценка соответствия переходных процессов, отображаемых осциллографами, разработанной модели и реальной судовой электростанции.

Материалы и методы

Разработанная модель судовой электростанции позволяет выполнить синхронизацию как в ручном, так и в автоматическом режиме, распределение нагрузки между

параллельно работающими генераторами и перевод активной мощности при выводе одного генератора из работы [9].

Для оценки адекватности модели электростанции было выполнено сравнение результатов измерений электрических параметров реальной электростанции и результатов моделирования [10–15]. За объект исследования была принята электростанция теплохода проекта 588, состоящая из четырех дизель-генераторов мощностью по 100 кВт каждый и позволяющая выполнить синхронизацию, загрузку и разгрузку генераторов в ручном режиме. В качестве измерительного прибора был использован цифровой осциллограф DSO-2090.

Поскольку автоматическая синхронизация и распределение мощностей между параллельно работающими генераторами реальной электростанции не реализована, моделирование переходных процессов будет выполнено в режиме ручной синхронизации.

Переходные процессы напряжений при синхронизации показаны на диаграммах рис. 1 и рис. 2. На осциллограмме, полученной при процессе синхронизации реальной электростанции (рис. 1), показаны три напряжения: действующие значения фазных напряжений первого – U_1 и второго – U_2 генератора и их разности ΔU . При сближении начальных фаз напряжений генераторов значение ΔU снижается до нуля, после чего включается автомат подключаемого генератора и вводит его на параллельную работу. Время процесса синхронизации реальной электростанции составляет 15 с и зависит от точности регулирования исполнительного механизма (асинхронного электродвигателя), воздействующего на топливную рейку дизельного двигателя.

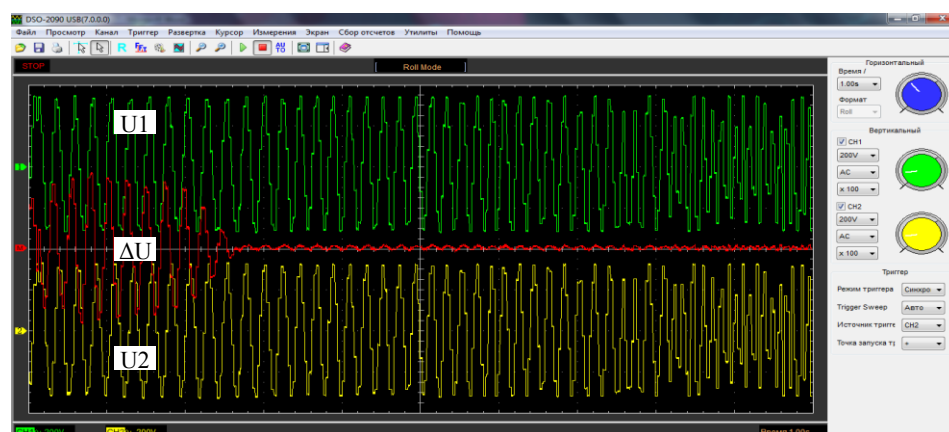


Рис. 1. Осциллограммы напряжений генераторов №1 и №2 при синхронизации

В процессе настройки модели системы регулирования скорости дизель-генератора реакция воздействия на дизель при выполнении синхронизации была подобрана путем введения в контур регулирования скорости инерционного звена. Процесс синхронизации модели электростанции выполняется за время около 2 с.

Малое время процесса синхронизации модели электростанции объясняется отсутствием возмущающих воздействий на электроэнергетическую систему, которые неизбежно проявляются при работе реальной электростанции.

Для получения переходных процессов электростанции к генераторам была подключена нагрузка в виде поршневых компрессоров мощностью 11 кВт каждый. На рис. 3 приведены осциллограммы напряжений при одновременном подключении двух компрессоров на два параллельно работающих генератора. Коэффициент мощности асинхронных электродвигателей компрессоров равен 0,8. При подключении нагрузки наблюдается провал напряжения судовой сети на величину около 6% от номинального значения. Система автоматического регулирования возбуждения восстанавливает напряжение до установившегося значения в течение 1,2 сек.

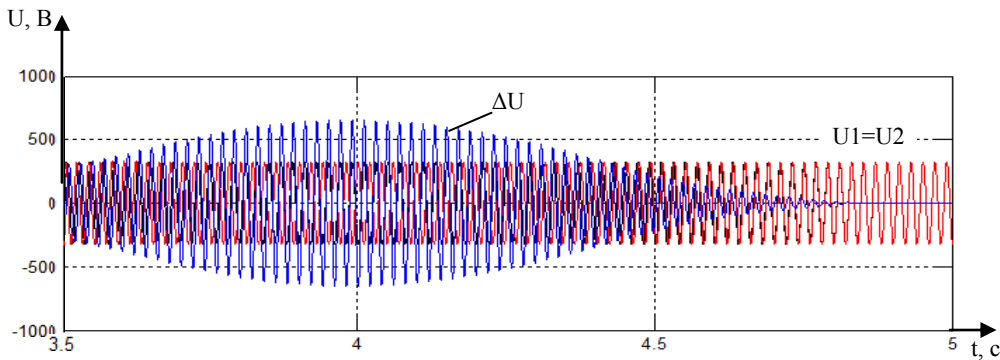


Рис. 2. Диаграммы моделирования напряжений генераторов №1 и №2 при синхронизации

Моделирование электростанции с параллельно работающими генераторами выполнялось при последовательном подключении асинхронных нагрузок по 11 кВт с интервалом времени равным 3 секунды. При этом наблюдаются провал напряжения в сети и броски тока на параллельно работающих генераторах (см. рис. 4). По мере разгона асинхронных двигателей значение тока снижается, одновременно с этим система автоматического регулирования путем увеличения тока возбуждения восстанавливает значение напряжения.

Оценка диаграмм показывает, что переходный процесс от момента подключения одной ступени нагрузки до восстановления напряжения происходит за время 0,8 с. При последующем подключении нагрузки поведение напряжения повторяется за время около 1 с. Значения провалов напряжения составляют 2% и 3% при подключении первой и второй нагрузки соответственно.

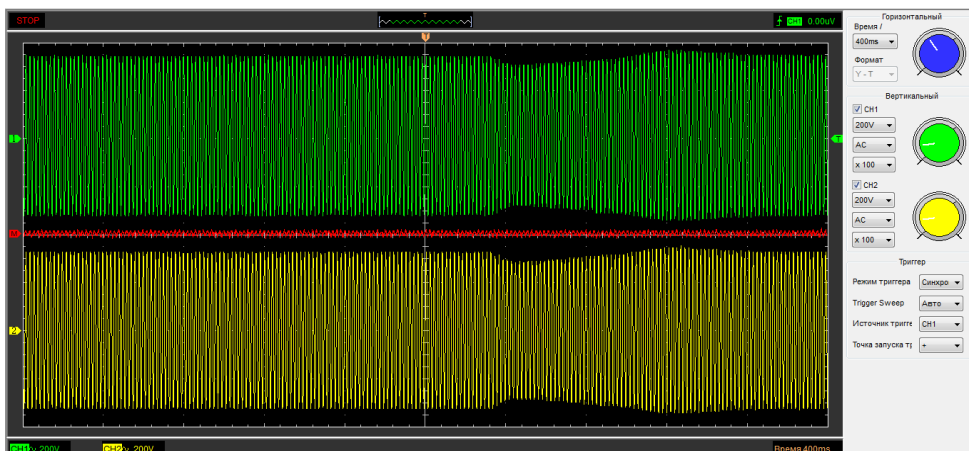


Рис. 3. Осциллограммы напряжений параллельно работающих генераторов №1 и №2 при подключении асинхронной нагрузки

Осциллограммы изменения токов параллельно работающих генераторов при последовательном подключении двух нагрузок мощностью по 11 кВт к параллельно работающим генераторам и переводе активной мощности на первый генератор приведены на рисунке 5. В качестве нагрузки использованы те же компрессоры. При запуске первого компрессора максимальное значение тока составляет 25% от номинального значения тока генератора, а ток второго генератора составляет 20%. При после-

дующем запуске второго компрессора распределение токов на генераторах установилось в следующих соотношениях: 22% на первом генераторе и 23% – на втором.

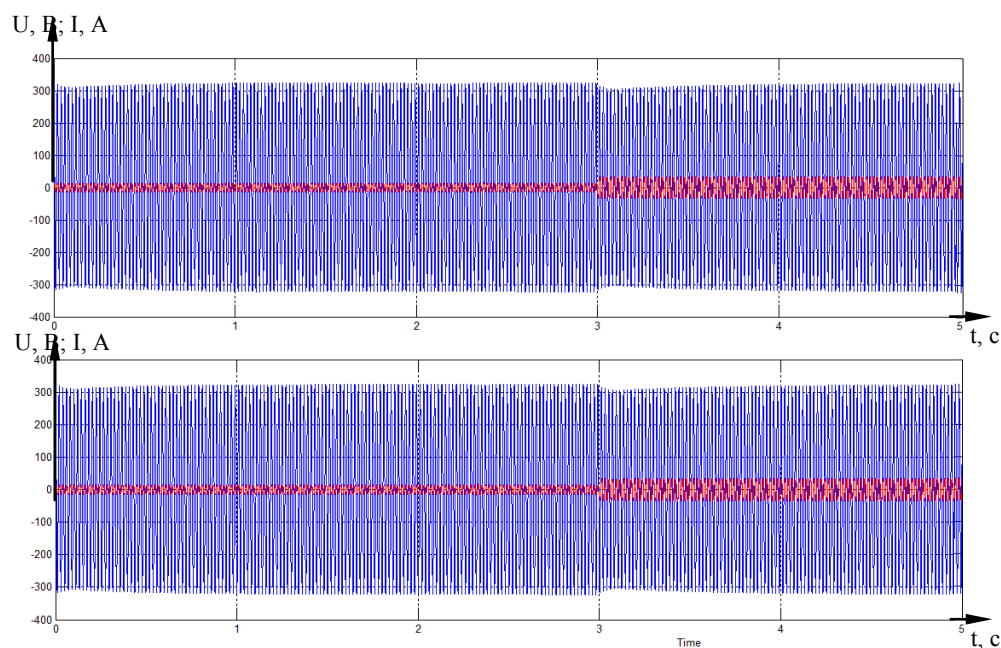


Рис. 4. Диаграммы напряжений и токов параллельно работающих генераторов №1 и №2 при подключении асинхронной нагрузки

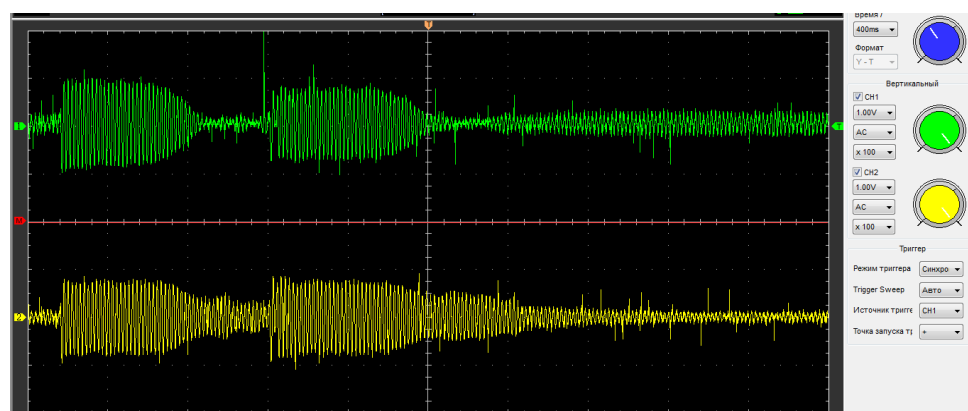


Рис. 5. Осциллограммы токов параллельно работающих генераторов №1 и №2 при подключении асинхронной нагрузки

После завершения переходных процессов был выполнен перевод нагрузки на первый генератор и вывод второго из параллельной работы.

Результаты

Моделирование подобных процессов производилось при параллельной работе генераторов равномерно загруженных асинхронной нагрузкой (рис. 6). Подключение к шинам асинхронной нагрузки мощностью 11 кВт сопровождается бросками тока и провалом напряжения. Распределение тока и, следовательно, мощности между генераторами происходит равномерно, что определяется подобными параметрами генера-

торов, двигателей и регуляторов. При сравнении полученных результатов с осциллограммами реальной электростанции можно определить неравномерность распределения мощности между судовыми генераторами. Несимметрия при распределении нагрузки объясняется различными характеристиками генераторов и двигателей, настройками регуляторов, температурными режимами двигателей и т.д.

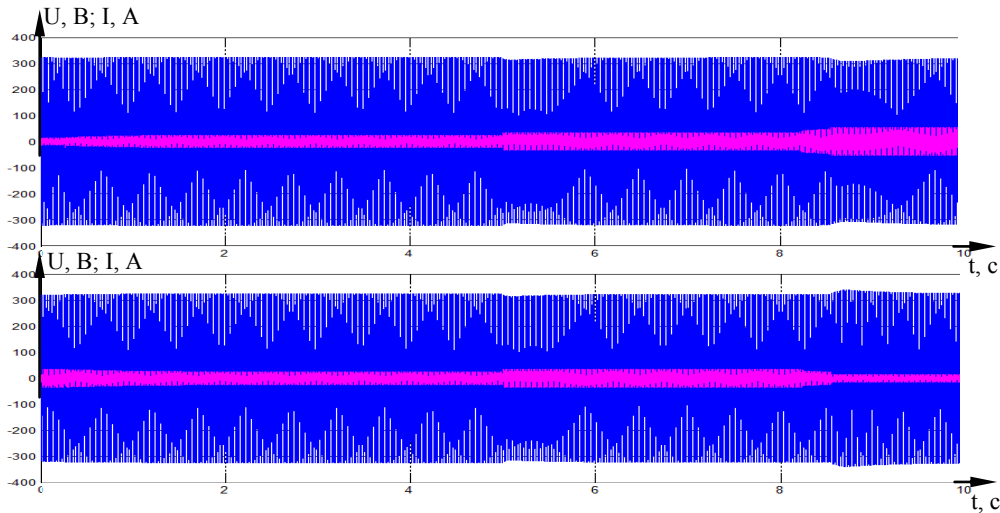


Рис. 6. Диаграммы напряжений и токов параллельно работающих генераторов №1 и №2 при подключении и распределении асинхронной нагрузки

При переводе нагрузки с одного генератора на другой (рис. 6) ток на втором генераторе снижается практически до нуля, после чего происходит отключение его от шин.

Заключение

Оценка результатов моделирования показывает, что в связи с несовершенством модели они имеют некоторую погрешность при сравнении с результатами натурных испытаний. Максимальная погрешность результатов, показанных на рис. 3–6, составляет около 6%.

Однако следует заметить, что качество переходных процессов при набросе, сбросе и распределении нагрузки между параллельно работающими генераторами модели соответствует переходным процессам реальной судовой электростанции.

Усовершенствование модели сводится к возможности осуществления процесса синхронизации в автоматическом режиме. Также в период отстоя судна планируется выполнить модернизацию системы управления электростанцией с внедрением в нее электронных блоков синхронизации и распределения нагрузок. Моделирование переходных процессов в автоматическом режиме синхронизации и распределения нагрузок является дальнейшей задачей исследования.

Список литературы:

- [1] Исследование переходных процессов в линейных электрических цепях с помощью системы компьютерной математики matlab / Ф.А.Васильева, О.В.Свеженцева / Иркутск, Энергетика Вестник ИрГТУ – 2011 – №6 (53). – с. 119–124.
- [2] Woud H.K., Stapersma D. Design of propulsion and electric power generation systems. IMarEST Publications, London, 2003. 494 p.
- [3] Кривелев А.В. Основы компьютерной математики с использованием MATLAB: учебное пособие для вузов. М.: Лекс-Книга, 2005. 496 с.

- [4] Мэтьюз Д.Т., Финк К.Д. Численные методы. Использование MATLAB. М.: Вильямс, 2001. 720 с.
- [5] Zhiliang Wu. Design and Study of Real-time Online Assessing System for Marine Power Station Reliability / Zhiliang Wu, Yubin Yao and Dan Wang // Advances in Engineering, volume 87 2nd International Conference on Automation, Mechanical and Electrical Engineering (AMEE 2017). Atlantis Press, 2017 - P. 180–182.
- [6] Zhiliang Wu. Reliability engineering and application of ship and port electrical system. Dalian: Dalian Maritime University Press, 2006.
- [7] Wang Chao, Wang Huifang, Zhang Chi. Study of reliability modeling for relay protection system in digital substations. Power System Protection and Control, 2013,41(3): 8-13.
- [8] Zhiliang Wu, Yubin Yao and Dan Wang. The Reliability Modeling of Marine Power Station, Mechanical engineering industrial electronics and information (MEIEI2013), 2013, (Part B): 404-407.
- [9] Имитационная модель судовой электростанции / О.А. Бурмакин, М.П. Шилов, Ю.С. Малышев, С.В. Попов/ Нижний Новгород, Вестник ВГАВТ. - 2016. - №48. - С. 272–279 2016.
- [10] Бурмакин О.А., Малышев Ю.С., Попов С.В., Шилов М.П. Оценка адекватности модели СЭЭС в переходных режимах работы. Труды 19-го международного научно-методического форума «Великие реки 2017». Материалы научно-методической конференции профессорско-преподавательского состава, аспирантов, специалистов и студентов «Проблемы использования и инновационного развития внутренних водных путей в бассейнах великих рек». Изд-во ФГБОУ ВО «ВГУВТ», 2017. – Вып.6. – Режим доступа: <http://vf-река-море.рф>.
- [11] Коробко Г.И., Попов С.В., Бишлетов А.В., Матвеев О.А. Алгоритм автоматического выбора ведущего генератора автономной электростанции при параллельной работе трех и более генераторных агрегатов. Труды 14-го международного научно-методического форума «Великие реки 2012». Материалы научно-методической конференции профессорско-преподавательского состава, аспирантов, специалистов и студентов «Проблемы использования и инновационного развития внутренних водных путей в бассейнах великих рек». Т. 2. – Н.Новгород: Изд-во ФБОУ ВПО «ВГАВТ», 2012. – с. 282–284.
- [12] Головкин С.В. Диагностика технического состояния судового электрооборудования на основе интеллектуального анализа данных / С.В. Головкин // Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. Сер.: Управление, вычислительная техника и информатика. 2009. № 2. С. 90–95.
- [13] Zhiliang Wu. Marine power station. Dalian: Dalian Maritime University Press, 2012.
- [14] Y.C. Liu and C. Wang, «Modeling and Simulation on Ship Power Station under Large Disturbance», Advanced Materials Research, Vols. 121–122, pp. 74–79, 2010
- [15] Yushkov E.A. Modeling of operation modes of ship power plant of combined propulsion complex with control system based on electronic controllers. Electrical engineering & electromechanics, 2016, no.6, pp. 39–44.

COMPARATIVE ANALYSIS OF RESULTS OF RESEARCH OF THE REAL SHIP POWER STATION AND ITS MODELS IN TRANSITION OPERATING MODES

Burmakin Oleg A., *Candidat of Engineering Science, Associate Professor
of the Department of Electrical engineering and electrical equipment of water transport
facilities, Volga State University of Water Transport*

Malyshev Yuriy S., *Candidat of Engineering Science, Associate Professor
of the Department of Electrical engineering and electrical equipment of water transport
facilities, Volga State University of Water Transport*

Popov Sergey V., *Candidat of Engineering Science, Associate Professor of the Department
of Electrical engineering and electrical equipment of water transport facilities
Volga State University of Water Transport*

Shilov Maxim P., *graduate student of the Department of Electrical engineering
and electrical equipment of water transport facilities
Volga State University of Water Transport
5, Nesterov st, Nizhniy Novgorod, 603951*

Keywords: ship power station, synchronization, parallel work, transition processes.

The article presents the results of simulation of transients of the ship power station and oscillograms of transients of a real ship power station. The comparison of transients for different operating modes of the power plant is given: synchronization, step switching of load on parallel generators, distribution and transfer of load to one of the parallel generators. The conclusions about the conformity of the quality of transients and the magnitude of the error of the simulation results associated with the imperfection of the model are made. Ways to improve the model by introducing the synchronization process in automatic mode, as well as upgrading the power plant control system by introducing synchronization modules and load balancing, are proposed.

References:

- [1] Issledovanie perexodny'x processov v linejny'x e'lektricheskix cepyax s po-moshh'yu sistemy' komp'yuternoj matematiki matlab / F.A.Vasil'eva, O.V.Svezhenceva / Irkutsk, E'nergetika Vestnik IrGTU – 2011 – №6 (53). – s. 119-124.
- [2] Woud H.K., Stapersma D. Design of propulsion and electric power generation systems. IMarEST Publications, London, 2003. 494 p.
- [3] Krivelev A.V. Osnovy' komp'yuternoj matematiki s ispol'zovaniem MATLAB: uchebnoe posobie dlya vuzov. M.: Leks-Kniga, 2005. 496 s.
- [4] Me't' yuz D.T., Fink K.D. Chislenny'e metody'. Ispol'zovanie MATLAB. M.: Vil'yams, 2001. 720 s.
- [5] Zhiliang Wu. Design and Study of Real-time Online Assessing System for Marine Power Station Reliability / Zhiliang Wu, Yubin Yao and Dan Wang // Advances in Engineering, volume 87 2nd International Conference on Automation, Mechanical and Electrical Engineering (AMEE 2017). Atlantis Press, 2017 - P. 180-182.
- [6] Zhiliang Wu. Reliability engineering and application of ship and port electrical system. Dalian: Dalian Maritime University Press, 2006.
- [7] Wang Chao, Wang Huifang, Zhang Chi. Study of reliability modeling for relay protection system in digital substations. Power System Protection and Control, 2013,41(3):8-13.
- [8] Zhiliang Wu, Yubin Yao and Dan Wang. The Reliability Modeling of Marine Power Station, Mechanical engineering industrial electronics and information (MEIEI2013), 2013, (Part B): 404-407.
- [9] Imitacionnaya model' sudovoj e'lektrostancii / O.A. Burmakin, M.P. Shilov, Yu.S. Maly'shev, S.V. Popov/ Nizhnij Novgorod, Vestnik VGAVT.- 2016.- №48.- S.272-279 2016.- №48.- S.272-279.
- [10] Burmakin O.A., Maly'shev Yu.S., Popov S.V., Shilov M.P. Ocenka adekvatno-sti modeli SE'E'S v perexodny'x rezhimax raboty'. Trudy' 19-go mezhdunarodnogo nauchno-metodicheskogo foruma «Velikie reki 2017». Materialy' nauchno-metodicheskoy konferen-cii professorsko-prepodavatel'skogo sostava, aspirantov, specialistov i studentov «Problemy' ispol'zovaniya i innovacionnogo razvitiya vnutrennix vodny'x putej v bas-sejmax velikix rek». Izd-vo FGBOU VO «VGUVT», 2017. – Vy'p.6. – Rezhim dostupa: <http://vf-reka-more.rf>.
- [11] Korobko G.I., Popov S.V., Bishletov A.V., Matveev O.A. Algoritm avtomati-cheskogo vy'bora vedushhego generatora avtonomnoj e'lektrostancii pri parallel'noj rabote trex i bolee generatorny'x agregatov. Trudy' 14-go mezhdunarodnogo nauchno-metodicheskogo foruma «Velikie reki 2012». Materialy' nauchno-metodicheskoy konferen-cii professorsko-prepodavatel'skogo sostava, aspirantov, specialistov i studentov «Problemy' ispol'zovaniya i innovacionnogo razvitiya vnutrennix vodny'x putej v bas-sejmax velikix rek». T. 2. – N.Novgorod: Izd-vo FBOU VPO «VGAVT», 2012. – s. 282-284.
- [12] Golovko S.V. Diagnostika texnicheskogo sostoyaniya sudovogo e'lektrooboru-dovaniya na osnove intellektual'nogo analiza danny'x / S.V. Golovko // Vestn. Astraxan. gos. texn. un-ta. Ser.: Upravlenie, vy'chislitel'naya texnika i informatika. 2009. № 2. S. 90-95.
- [13] Zhiliang Wu. Marine power station. Dalian: Dalian Maritime University Press, 2012.
- [14] Y.C. Liu and C. Wang, «Modeling and Simulation on Ship Power Station under Large Disturbance», Advanced Materials Research, Vols. 121-122, pp. 74-79, 2010
- [15] Yushkov E.A. Modeling of operation modes of ship power plant of combined propulsion complex with control system based on electronic controllers. Electrical engineering & electromechanics, 2016, no.6, pp.39-44.

Статья поступила в редакцию 11.04.2019 г.

УДК 629.5.069

Матвеев Юрий Иванович, д.т.н., профессор, зав. кафедрой ЭСЭУ,
ФГБОУ ВО «ВГУВТ»

Орехов Владимир Анатольевич, к.т.н. доцент кафедры ПТМ и МР,
ФГБОУ ВО «ВГУВТ», e-mail: vova23061962@yandex.ru

Храмов Михаил Юрьевич, к.т.н., доцент кафедры ЭСЭУ,
ФГБОУ ВО «ВГУВТ» e-mail: m.u.hramov@yandex.ru

Орехов Артем Владимирович, студент ФГБОУ ВО «ВГУВТ»,
e-mail: temaorexbo@gmail.com

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
образования «Волжский государственный университет водного транспорта»
(ФГБОУ ВО «ВГУВТ»)

603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5

ОСОБЕННОСТИ НАПРЕССОВКИ ОБЛИЦОВОК ГРЕБНЫХ ВАЛОВ

Ключевые слова: гребной вал, облицовка, фреттинг-коррозия, полимерные материалы, посадка с натягом, механический износ, дефектация, ремонт.

Аннотация. В данной статье рассматриваются возможности применения облицовок шеек гребных валов с использованием полимерных материалов. На сегодняшний день известны технологии, использующие посадку с натягом либо полимерные клеевые материалы, применяемые раздельно друг от друга. Предлагается принципиально новый способ, объединяющий в себе два метода посадки облицовок – за счет чередования участков посадки с натягом и полимерных клеевых материалов по длине облицовки. Данная разработка позволит существенно уменьшить момент скручивания вала относительно облицовки и тем самым снизить риски возникновения фреттинг-коррозии. Применение технологии возможно как при ремонтных работах на уже эксплуатируемом флоте, так и на судостроительных заводах при постройке новых судов.

Введение. Выход из строя водопровода приводит к финансовым потерям, во много раз превышающим стоимость разрушенного вала. Возникают ремонтные расходы, потери эксплуатационной прибыли за время вынужденного простоя, затраты на буксировку одновинтовых судов. Поломка гребного вала [7, 8] одновинтового судна в открытом море при штормовой погоде делает его практически неуправляемым и даже может привести к гибели судна. Поэтому изучение вопросов, связанных с повышением надежности работы гребного вала и его прочности способствует уменьшению аварийности на флоте. Виды эксплуатационных повреждений гребных валов достаточно многообразны. Одним из наиболее опасных из них является появление и развитие в теле вала усталостных трещин, растущих с увеличением наработки гребного вала и приводящих к его окончательной поломке.

Содержание. Значительное количество валов бракуется из-за повреждений облицовок [3, 9, 10], износов в подшипниках, местной выработки в сальниковых уплотнениях, глубоких поверхностных коррозионно-эрозионных поражений, растрескивания сварных стыковых швов, разрыва облицовок по основному металлу. Коррозионные процессы [1, 2, 4–6], возникающие при проникновении морской воды к стальному валу в результате разрушения гидроизолирующих покрытий и облицовок или разуплотнение герметизирующих устройств, также приводят к серьезным поражениям поверхностей валов, которые невозможно устранить зачисткой или местной выборкой металла в допустимых пределах.

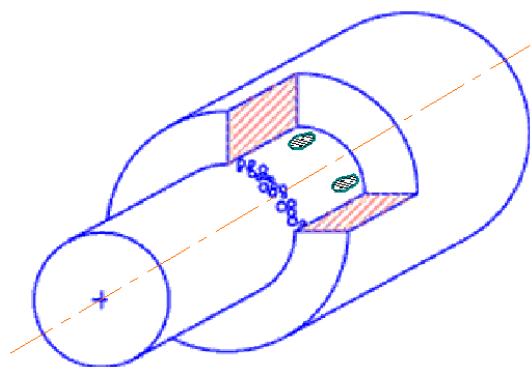


Рис. 1. Фреттинг-коррозия на поверхности вала

Поверхностные повреждения, образующиеся в результате фреттинга [11], могут иметь различный вид в зависимости от материала облицовки, величины натяга в соединении, качества пригонки соприкасающихся поверхностей.

Фреттинг-коррозия [12–15] проявляется в виде язвенных пятен, каверн, окисленных порошкообразных продуктов износа, могут образовываться трещины из-за наличия концентрации напряжений. При фреттинге могут наблюдаться также процессы локального сваривания, схватывания и последующего разрыва контактирующих материалов облицовки и вала, микроперемещения контактируемых поверхностей деталей под воздействием моментов $M_{кр}$ и M_c (на рисунке 2 условно показана линия скручивания вала).

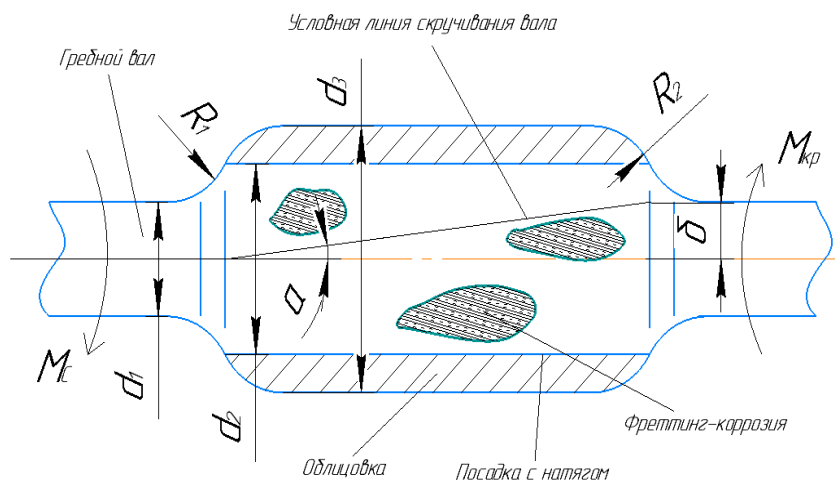


Рис. 2. Вал с облицовкой. α – угол скручивания вала относительно облицовки; δ – момент скручивания; $M_{кр}$ – крутящий момент; M_c – момент сопротивления.

Технология установки облицовок на гребные валы с применением полимерных клеевых материалов, запрессовываемых под давлением в кольцевой зазор между облицовкой и валом, разработана ЦНИИТС. Для обеспечения соосности облицовок с валами и создания равномерного кольцевого зазора между склеиваемыми поверхностями на валу выполняют центрирующие плоскости из стеклопластика шириной 30–40 мм. Толщина поясов 1,2 мм для валов диаметром до 300 мм, 1,5 мм для валов диаметром свыше 300 мм и 2,0 мм для валов диаметром свыше 500 мм. Для подачи клеевого состава и выхода вытекающего воздуха из зазора в облицовках, выполняют пробки из такого же материала, что и облицовка.

Клеевой состав нагнетают в зазор между облицовкой и валом с помощью пресса, состоящего из двух камер, разделенных поршнем. Малую камеру заполняют клеем, в большую – подают сжатый воздух. Затем проверяют качество заполнения кольцевого зазора. Окончательную обработку облицовки можно выполнять не ранее чем через 5 суток после насадки. Монтаж вала может производиться только при полимеризации клеевого состава (20–25 сут.). При таком способе насадки облицовок можно повысить надежность водопроводов, благодаря снижению напряжений в облицовках и улучшению защиты от электрохимической и фрикционной коррозии; прочность клеевых соединений металлических облицовок превышает прочность подобных прессовых соединений; насадка облицовок с помощью клея может быть применена на гребных валах судов всех классов без ограничения по диаметру, в том числе и для крупнотоннажных судов.

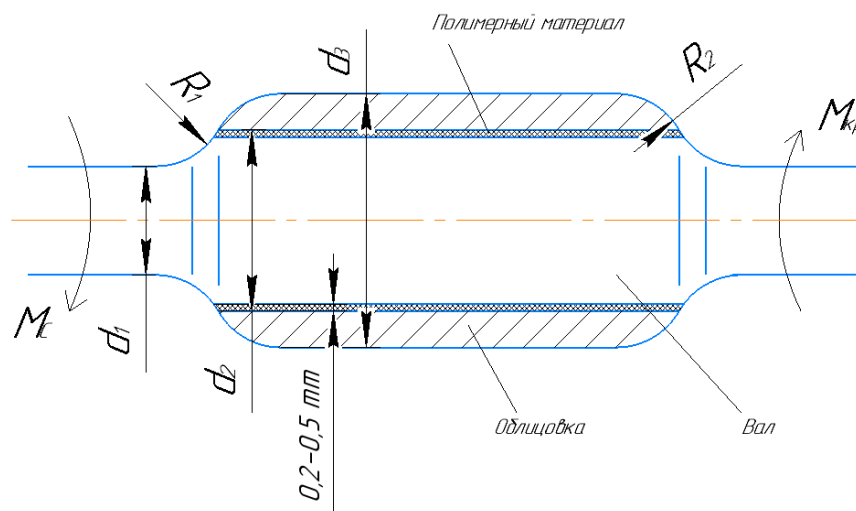


Рис. 3. Облицовка на валу с применением полимерных материалов

На основании рассмотренных ранее способов установки облицовок на гребные валы разработана принципиально новая технология с применением посадки с натягом и полимерных клеевых материалов, позволяющая существенно уменьшить протяженность участков, подверженных моменту скручивания вала относительно облицовки за счет интервалов с полимерными клеевыми материалами, что в свою очередь значительно снижает вероятность возникновения фреттинг-коррозии. Не требуется дополнительно делать обвальцовку, так как по краям облицовки осуществляется посадка с натягом. Данное сочетание обеспечивает герметичность посадки, тем самым мы избегаем возможности попадания морской воды и всего, что может негативно сказаться на эксплуатационных свойствах. Так же, за счет участков с полимерными материалами легче выдержать точность натяга в необходимых местах, так как нет необходимости делать это одновременно по длине всей облицовки.

Вывод. На основании аналитического обзора износов и повреждений гребных валов в процессе эксплуатации предложен новый способ установки облицовок на шейки гребных валов – облицовка на валу с применением полимерных материалов и посадкой с натягом.

Данный метод позволяет уменьшить проявление фреттинг-коррозии, снизить вероятность появления под облицовкой усталостных трещин, тем самым повысить надежность эксплуатации элементов валопровода с облицовками на судах водного транспорта.

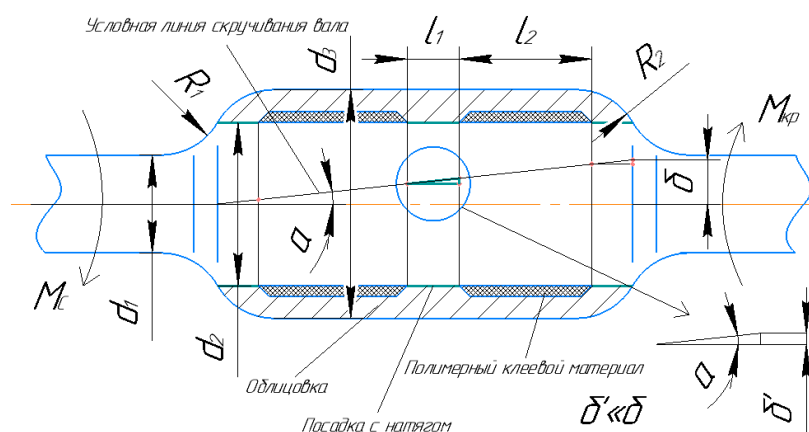


Рис. 4. Облицовка на валу с применением полимерных материалов и посадкой с натягом. α – угол скручивания вала относительно облицовки; δ – момент скручивания; $M_{кр}$ – крутящий момент; M_c – момент сопротивления; l_1 – длина участка посадки с натягом; l_2 – длина участка посадки с применением полимерных материалов.

Список литературы:

- [1] Балякин О.К., Седых В.И., Тарасов В.В. «Технология судоремонта». М. «Транспорт», 1992.
- [2] Шестеренко М.А., Шефер И.Б. «Технология монтажа и ремонта машин и механизмов промысловых судов». М. «Легкая и пищевая промышленность», 1982.
- [3] Кохан Н.М., Друг В.И. «Ремонт валопроводов морских судов», М. «Транспорт», 1980.
- [4] Держилов Ф.С., Харитонов В.Д., Ботпггейн Б.Х. «Технология судоремонта», М., «Транспорт», 1981.
- [5] ОСТ5.9670-92 «Соединения конические судовых валопроводов». Типовые технологические процессы сборки и разборки.
- [6] Лопырев Н.К., Немков П.П., Сумеркин Ю.В. «Технология судоремонта». «Транспорт», 1981.
- [7] Соколов Н.Н., Розен М.Л. «Гребные винты из нержавеющей стали». Л. «Государственное союзное издательство судостроительной промышленности», 1960.
- [8] Hills, Nowell, D. Mechanism of fretting fatigue, Dordrecht, Boston, Kluwer Academic Publisher, 1994.
- [9] Ito, T., Matsushima, M., Takata, K., Hattori, Y. Factors Influencing Fretting Corrosion of Tin Plated Contacts//SEI. Technical Prviev. No 64. April, 2007.
- [10] C.A. Brown, and a., Fuel Rod Vibration and Fretting Impact on Reliability, LWR Fuel Performance, 10-13 April, 2000, USA.
- [11] Baillon N, Grid to Rod Fretting Wear in EDF PWR From Operating Problems To New Designees Qualification Method, France. IAEA, Technical Meeting on Fuel Assembly Structural Behavior, 22-26 November 2004, Cucaracha, France.
- [12] Hoepfner, D.W. and Adibnazari, S.: Fretting Fatigue in Aircraft Joints Presented to the International Committee of Aeronautical Fatigue in Stockholm, Sweden, June 1993.
- [13] Hoepfner, D.W., Elliot, C.B.III, Moesser M.W. The Role of Fretting Fatigue on Aircraft Rivel Hole Cracking. Technical report DOT/FAA/AR – 96/10, Federal Aviation Administration, Salt Lake City, UT.
- [14] Viceconti M et al. Fretting wear in modular neck hip prosthesis. J Biomed Mater Res 1997; 35-2, 207-216.
- [15] Tritschler B, Forst B, Rieu J. Fretting corrosion of materials for orthopedic implants: a study of a metal/polymer contact in an artificial physiological medium, Tiibol Int 1999; 32: 587-596.

PECULIARITIES OF THE FORMING OF FACING SHAFT FACES

Matveev Yuriy I., Doctor of Technical Sciences, Professor, Head. Department of ESEU,
Volga State University of Water Transport

Orehvo Vladimir A., *Candidat of Engineering Science, Associate Professor
of the PTM and MR Department,
Volga State University of Water Transport*

Khranov Mikhail Y., *Candidat of Engineering Science, Associate Professor,
Department of ESUE, Volga State University of Water Transport*

Orehvo Artem V., *student of
Volga State University of Water Transport
5, Nesterov st, Nizhniy Novgorod, 603951*

Key words: propeller shaft, cladding, fretting corrosion, polymeric materials, tight fit, mechanical wear, fault detection, repair.

Annotation. This article discusses the possibility of using facing necks of propeller shafts using polymeric materials. To date, known technology using landing with a tightness or polymer adhesive materials used separately from each other. A fundamentally new method is proposed that combines two planting techniques for facing, due to the alternation of areas of landing with tension and polymeric adhesive materials along the length of facing. This development will significantly reduce the moment of shaft twisting relative to the cladding and thereby reduce the risk of fretting corrosion. The use of technology is possible both during repair work on an already operated fleet, and at shipyards in the construction of new ships.

References:

- [1] Balyakin O.K., Sedykh V.I., Tarasov V.V. «Ship repair technology». M. «Transport», 1992.
- [2] MA gearwheel, I. B. Shefer «Technology of installation and repair of machines and mechanisms of fishing vessels.» M. «Light and food industry», 1982.
- [3] Kohan N.M., Friend V.I. «Repair of shafting of ships», M. «Transport», 1980.
- [4] Derzhilov F.S., Kharitonov V.D., Botpgegyn B.Kh. «Technology of the ship – rimont», M., «Transport», 1981.
- [5] OST5.9670-92 «Conical ship shaft shafts connections». Typical technological processes of assembly and disassembly.
- [6] Lopyrev N.K., Nemkov P.P., Sumerkin Yu.V. «Ship repair technology». Transport, 1981.
- [7] Sokolov N.N., Rosen M.L. «Stainless steel propellers». L. “State Union Publishing House of the Shipbuilding Industry”, 1960.
- [8] Hills, Nowell, D. Mechanism of fretting fatigue, Dordrecht, Boston, Kluwer Academic Publisher, 1994.
- [9] Ito, T., Matsushima, M., Takata, K., Hattori, Y. Factors Influencing Fretting Corrosion of Tin Plated Contacts // SEI. Technical Prviev. No 64. April, 2007.
- [10] C.A. Brown, and a., Fuel Rod Vibration and Fretting Impact on Reliability, LWR Fuel Performance, 10-13 April, 2000, USA.
- [11] Baillon NG, Grid-to-Rod Fretting PWR From Operating Problems To New Designees Qualification Method, France. IAEA, Technical Meeting on Fuel Assembly Structural Behavior, 22-26 November 2004, Cucaracha, France.
- [12] Hoeppner, D.W. and Adibnazari, S. : Fretting Fatigue in Aircraft Joints Presented to the International Committee of Aeronautical Fatigue in Stockholm, Sweden, June 1993.
- [13] Hoeppner, D.W., Elliot, C.B.III, Moesser M.W. The Role of Fretting Fatigue on Aircraft Rivel Hole Cracking. Technical report DOT / FAA / AR – 96/10, Federal Aviation Administration, Salt Lake City, UT.
- [14] Viceconti M et al. Fretting wear in modular neck hip prosthesis. J Biomed Mater Res 1997; 35-2, 207-216.
- [15] Tritschler B, Forest B, Rieu J. Fretting corrosion resistance for orthopedic implants: Tiibol Int 1999; 32: 587-596.

Статья поступила в редакцию 05.06.2019 г.

УДК 629.5.069

Орехов Владимир Анатольевич, к.т.н. доцент кафедры ПТМ и МР,
ФГБОУ ВО «ВГУВТ», e-mail: vova23061962@yandex.ru

Лузгин Александр Сергеевич, студент ФГБОУ ВО «ВГУВТ»

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Волжский государственный университет водного транспорта» (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»)

603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5.

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ВТОРИЧНОЙ ТЕПЛОТЫ СЭУ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА СУДАХ РЕЧНОГО И МОРСКОГО ФЛОТА

Ключевые слова: преобразование теплоты, электроэнергия, электрогенератор, принципы преобразования теплоты, утилизация тепла, устройства для преобразования теплоты, модуль Пельтье.

Аннотация. В данной статье рассматриваются возможности утилизации вторичной теплоты в судовых условиях с использованием рассмотренных устройств для получения электроэнергии. Генерация электричества из тепловой энергии – это перспективный и доступный способ прямого преобразования энергии из одного вида в другой. Актуальность представленной работы заключается в том, что прямое преобразование тепловой энергии в электрическую без промежуточного превращения в механическую энергию представляет собой оптимальное решение данной проблемы. В связи с этим, вопрос о преобразовании теплоты в электричество становится все более интересным и актуальным. Наиболее изученным и перспективным способом преобразования вторичной теплоты в судовых условиях является модуль Пельтье.

Введение. На чем строится современное общество? Сегодня трудно представить мир без технологий, в основе работы которых лежит электроэнергия. Компьютеры, сотовые телефоны, машины – это малая часть устройств, которые сопровождают каждого человека на протяжении всего дня.

Насколько эффективно мы используем данные нам технологии? Далеко не каждый из нас знает, что более половины всей потребляемой энергии теряется в виде выделения теплоты.

Содержание. Варианты устройств для преобразования теплоты в электрическую энергию.

Из множества проанализированных источников по данной теме, хотелось бы выделить 4 основных варианта выполнения «тепловых генераторов» [1–4]:

1. Паровой поршневой двигатель
2. Паровая турбина
3. Двигатель Стирлинга
4. Модули Пельтье

1. Паровой поршневой двигатель

В самое последнее время на российском рынке появились предложения продукции ряда фирм: немецкой фирмы Spilling, чешских компаний PolyComp и Tenza s.a. По своей конструкции это паровые поршневые машины одноступенчатые с системой золотникового распределения пара в отличие от современных паровых машин многоступенчатого исполнения. Внутренний к.п.д. процесса расширения таких машин несколько выше в сравнении с осевыми турбинами этого уровня мощности, то есть, на-

ходится на уровне 0,65...0,75. Следует отметить, что это машины противодавленческого типа. Узкий диапазон мощностей от 100 кВт до 1200 кВт, а также противодавленческий тип этих агрегатов ограничивают их применение. Предлагать к установке в России их стали в самое последнее время. Отсутствует информация по объектам, на которых они установлены в нашей стране.

*Паросиловые мини-конденсационные электрические станции
по циклу Ренкина, реализуемые с помощью поршневых машин*

Интересны перспективы парового мотора, работающего по паровому конденсационному циклу Ренкина с регенерацией, изобретенного Гарри Шоэлом (Harry Schoell). Компания Cyclone Power Technologies Inc. (США) в 2009 г. получила российский патент (RU 2 357 091) с приоритетом от 2005 г. на свой «двигатель с регенерацией теплоты» (heat regenerative engine – англ.) [5,6].

Одна из модификаций двигателя и принципиальная схема потоков показаны на рис. 1. Так же там представлено устройство двигателя, работающего на жидком или газообразном топливе. В верхней части находится реактор-камера сгорания. В кольцевое пространство реактора вокруг нагревателя рабочего тела распыляется топливо-воздушная смесь (вариант жидкого и газообразного топлива). Регулировка процесса сгорания обеспечивает температуру в факеле не более 1230°C для контроля окиси углерода и окислов азота. Сгорание происходит при атмосферном давлении. Пары воды и углекислый газ находятся в составе выхлопных газов в газообразном состоянии при температуре около 160°C. В нагревателе образуется пар при температуре 650°C, давлении 221 бар.

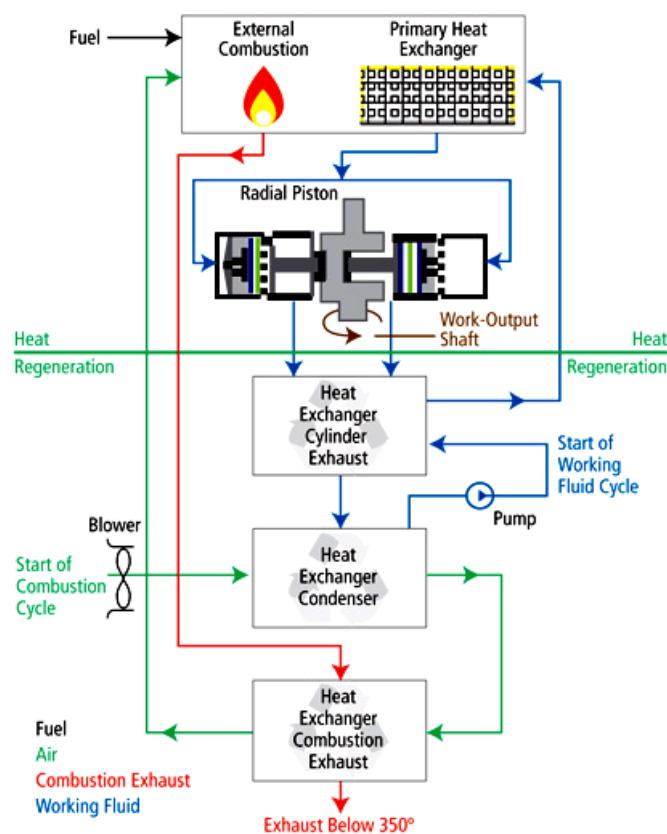


Рис. 1. Схема цикла двигателя с регенерацией теплоты

Схема цикла приведена на рисунке справа. Регенерация теплоты в цикле реализуется при нагреве воздуха, подаваемого на горение, в конденсаторе при охлаждении водяного пара, дальнейшем подогреве выхлопными газами, при подогреве отработавшим в рабочих цилиндрах паром питательной воды. Термический к.п.д. цикла достигает 34%. Масло для смазки не используется, его функцию выполняет водяной пар. Скорость вращения вала 3600 об./мин, поэтому редуктор не требуется [7].

2. Паровая турбина

В нашей стране есть несколько предприятий, занимающихся производством паровых электрогенераторов. В частности, речь идет о турбогенераторах компаний «Калужский турбинный завод» и ОАО «Росэлектромаш».

Целесообразность эксплуатации

Что касается использования электрогенераторов, работающих на пару, то их использование в котельных установках может принести определенные плоды. Дело в том, что по достижении некоторых показателей мощности, данные установки показывают очень хорошие рабочие характеристики, выгодно отличающие их от своих аналогов.

3. Двигатель Стирлинга

Современная инженерия различает три основных вида подобных двигателей:

- альфа-стирлинг, отличие которого в двух активных поршнях, расположенных в самостоятельных цилиндрах. Из всех трех вариантов данная модель отличается самой высокой мощностью, обладая самой высокой температурой нагревающегося поршня;
- бета-стирлинг, базирующийся на одном цилиндре, одна часть которого горячая, а вторая холодная;
- гамма-стирлинг, имеющий кроме поршня еще и вытеснитель.

Производство электростанции на Стирлинге будет зависеть от выбора модели двигателя, что позволит учесть все положительные и отрицательные стороны

Конструкция исполнения «Альфа» представлена на рис. 2.

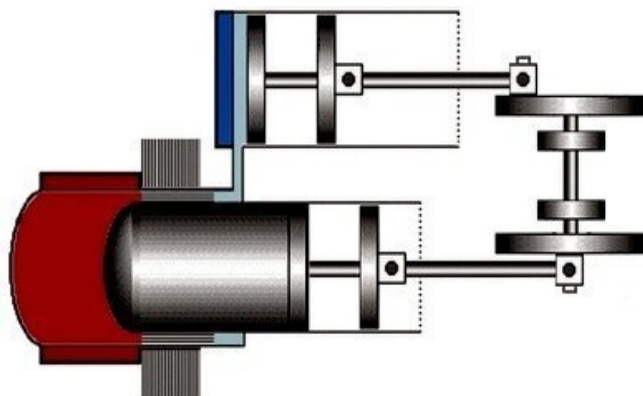


Рис. 2. Альфа-Стирлинг

Этот двигатель включает в себя два отдельных рабочих поршня. Каждый поршень расположен в отдельном цилиндре. Холодный цилиндр находится в теплообменнике, а горячий нагревается.

Конструкция исполнения «Бета» представлена на рис. 3.



Рис. 3. Бета-Стирлинг

Цилиндр с поршнем охлаждается с одной стороны, и нагревается с противоположной стороны. В цилиндре перемещается силовой поршень и вытеснитель, служащий для уменьшения и увеличения объема рабочего газа. Регенератор выполняет обратное перемещение остывшего газа в нагретое пространство двигателя.

Конструкция исполнения «Гамма» представлена на рис. 4.

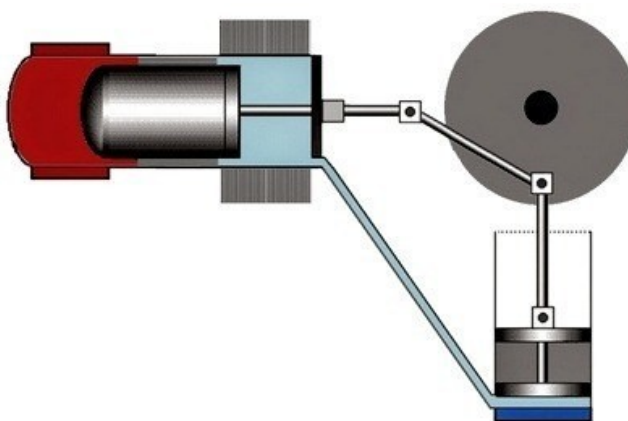


Рис. 4. Гамма-Стирлинг

Вся система состоит из двух цилиндров. Первый цилиндр весь холодный. В нем перемещается рабочий поршень. Второй цилиндр с одной стороны нагретый, а с другой – холодный, и предназначен для передвижения вытеснителя. Регенератор для перекачки охлажденного газа может являться общим для двух цилиндров, либо может быть включен в устройство вытеснителя.

Области применения двигателя Стирлинга

Мотор Стирлинга чаще всего применяется в ситуациях, когда требуется аппарат для преобразования тепловой энергии, отличающийся простотой, при этом эффективность прочих видов тепловых агрегатов существенно ниже при аналогичных условиях. Очень часто подобные агрегаты применяются в питании насосного оборудования, холодильных камер, подводных лодок, батарей, аккумулирующих энергию [8].

Одним из перспективных направлений области использования двигателей Стирлинга являются солнечные электростанции, поскольку данный агрегат может удачно применяться для того, чтобы преобразовывать энергию солнечных лучей в электрическую [14]. Для осуществления этого процесса двигатель помещается в фокус зеркала, аккумулирующего солнечные лучи, что обеспечивает перманентное освещение области, требующей нагрева. Это позволяет сфокусировать солнечную энергию на малой площади. Топливом для двигателя в данном случае служит гелий или водород.

При необходимости создания преобразователя теплоты компактных размеров можно вполне использовать мотор Стирлинга. При этом эффективность других аналогичных двигателей значительно ниже.

С помощью двигателя Стирлинга можно резервировать тепловую энергию, используя аккумуляторы теплоты фазового перехода на основе расплавов различных солей. Такие устройства имеют запас энергии, превосходящий химические аккумуляторы, и имеют меньшую стоимость.

Высокий интерес к моторам Стирлинга стал итогом интереса общественности в борьбе с загрязнением атмосферы, шумом и сохранением природных энергетических источников [13, 15].

4. Модули Пельтье

Принцип действия модулей

На контакте разнородных проводников происходит выделение или поглощение теплоты в зависимости от направления электрического тока. Поток электронов обладает потенциальной и кинетической энергией. Плотность тока в контактирующих проводниках одинакова, а плотности потоков энергии отличаются.

Если энергия, втекающая в контакт, больше энергии, вытекающей из него, это означает, что электроны тормозятся в месте перехода из одной области в другую и разогревают кристаллическую решётку (электрическое поле тормозит их движение). Когда направление тока меняется, происходит обратный процесс ускорения электронов, когда энергия у кристаллической решётки забирается и происходит её охлаждение (направления электрического поля и движения электронов совпадают).

Энергетическая разность зарядов на границе полупроводников самая высокая и в них эффект проявляется наиболее сильно.

Схема принципа работы модуля

В одном элементе существует 4 перехода между металлом и полупроводниками. При замкнутой цепи поток электронов перемещается от отрицательного полюса АКБ к положительному, последовательно проходя через каждый переход.

Вблизи первого перехода медь – полупроводник р-типа происходит тепловыделение в полупроводниковой зоне, поскольку электроны переходят в состояние с меньшей энергией.

Рядом со следующей границей с металлом в полупроводнике происходит поглощение теплоты, в связи с «высасыванием» электронов из зоны р-проводимости под действием электрического поля.

На третьем переходе электроны попадают в полупроводник типа n, где они обладают большей энергией, чем в металле. При этом происходит поглощение энергии и охлаждение полупроводника около границы перехода [11, 12].

Последний переход сопровождается обратным процессом тепловыделения в полупроводнике из-за перехода электронов в зону с меньшей энергией.

Поскольку нагревающиеся и охлаждающиеся переходы находятся в разных плоскостях, элемент «Пельтье» сверху будет охлаждаться, а снизу нагреваться.

На практике каждый элемент содержит большое количество нагревающихся и охлаждающихся переходов, что приводит к образованию ощутимого температурного перепада, позволяющего создать термоэлектрогенератор [9, 10].

Элемент «Пельтье» содержит большое количество полупроводниковых параллелепипедов р- и n-типов, последовательно соединённых между собой перемычками из металла – термоконтактов, другой стороной соприкасающихся с керамической пластиной.

В качестве полупроводников применяется теллурид висмута и германид кремния.

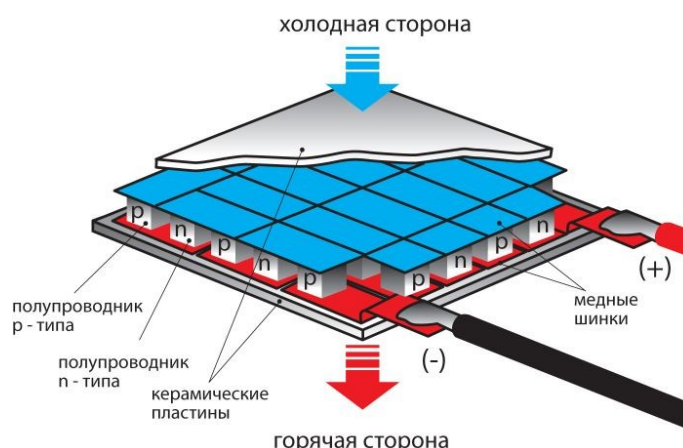


Рис. 5. Принцип работы Модуля Пельтье

Заключение

В ходе проделанной работы мы рассмотрели многообразие способов преобразования тепловой энергии в электрическую, как и с промежуточным механическим преобразованием, так и без него (напрямую).

Оптимальным решением для судовой эксплуатации являются паровые турбины за счет своей мощности и высокого КПД. Так-же эффективной утилизацией теплоты выхлопных газов является использование термогенераторов.

Среди вышерассмотренных способов, хотелось бы отметить модуль Пельтье. Он обладает широкими перспективами для использования в судовой отрасли.

Тем не менее, при сравнении дизельных и паровых двигателей (установок) – отчетливо видно, что для судовых условий более подходящим является именно первый тип.

Список литературы:

- [1] Арутюнян А.А. Основы энергосбережения / А.А. Арутюнян. – М.: Энергосервис, 2016. – 600 с.
- [2] Справочник по энергоснабжению и электрооборудованию промышленных предприятий и общественных зданий. – М.: МЭИ, 2010. – 752 с.
- [3] Сибикин, Ю.Д. Альтернативные источники энергии: моногр. / Ю.Д. Сибикин, М.Ю. Сибикин. – М.: РадиоСофт, 2014. – 248 с.
- [4] Новые источники и методы преобразования энергии. – М.: Секретариат СЭВ, 2008. – 120 с.
- [5] Baillon N, Grid to Rod Fretting Wear in EDF PWR From Operating Problems To New Designees Qualification Method, France. IAEA, Technical Meeting on Fuel Assembly Structural Behavior, 22-26 November 2004, Cucaracha, France.
- [6] Hoepfner, D.W. and Adibnazari, S.: Fretting Fatigue in Aircraft Joints Presented to the International Committee of Aeronautical Fatigue in Stockholm, Sweden, June 1993.
- [7] Hoepfner, D.W., Elliot, C.B.III, Moesser M.W. The Role of Fretting Fatigue on Aircraft Rivel Hole Cracking. Technical report DOT/FAA/AR – 96/10, Federal Aviation Administration, Salt Lake City, UT.
- [8] Viceconti M et al. Fretting wear in modular neck hip prosthesis. J Biomed Mater Res 1997; 35-2, 207-216.
- [9] Tritschler B, Forcst B, Rieu J. Fretting corrosion of materials for orthopedic implants: a study of a metal/polymer contact in an artificial physiological medium, Tiibol Int 1999; 32: 587-596.
- [10] Ito, T., Matsushima, M., Takata, K., Hattori, Y. Factors Influencing Fretting Corrosion of Tin Plated Contacts//SEI. Technical Prviev. No 64. April, 2007.
- [11] C.A. Brown, and a., Fuel Rod Vibration and Fretting Impact on Reliability, LWR Fuel Performance, 10-13 April, 2000, USA.
- [12] <http://blog-potolok.ru/kak-proisxodit-preobrazovanie-teplovoj-energii-v-elektricheskuyu/>

- [13] <http://nnhpe.spbstu.ru/maloizvestnoe-oborudovanie-dlya-proizvodstva-elektroenergii/>
[14] <http://generatorexperts.ru/alternativnye-istochniki/parovye-elektrogeneratory.html>
[15] https://manbw.ru/analytics/which_is_better_gas_piston_or_gas_turbine_power_units.html

PROSPECTS FOR APPLICATION OF SECONDARY CONVERTERS HEATS OF SEU FOR PRODUCING ELECTRIC POWER IN SHIPS OF THE RIVER AND NAVY

Orekhvo Vladimir A., *Candidat of Engineering Science, Associate Professor
of the PTM and MR Department,
Volga State University of Water Transport*

Luzgin Alexander S., *student of Volga State University of Water Transport
5, Nesterov st, Nizhniy Novgorod, 603951*

Keywords: *heat conversion, electricity, electric generator, TAG, principles of heat conversion, heat recovery, devices for heat conversion, Peltier module.*

Annotation. *This article discusses the possibilities of recycling of secondary heat in the ship's conditions using the considered devices for generating electricity. The generation of electricity from thermal energy is a promising and affordable way to directly convert energy from one type to another. The relevance of the work presented is that the direct conversion of thermal energy into electrical energy without intermediate conversion into mechanical energy is the optimal solution to this problem. In this regard, the issue of converting heat into electricity is becoming more interesting and relevant. The most studied and promising way to convert secondary heat in the ship's conditions is the Peltier module.*

References:

- [1] Arutyunyan A.A. Basics of energy saving / A.A. Harutyunyan. – M.: Energoservice, 2016. – 600 c.
[2] Handbook of energy supply and electrical equipment of industrial enterprises and public buildings. – M.: MEI, 2010. – 752 c.
[3] Sibikin, Yu. D. Alternative sources of energy: monograph. / Yu.D. Sibikin, M.Yu. Sibikin. – M.: RadioSoft, 2014. – 248 c.
[4] New sources and methods of energy conversion. – M.: CMEA Secretariat, 2008. – 120 c.
[5] Baillon NG, Grid-to-Rod Fretting PWR From Operating Problems To New Designees Qualification Method, France. IAEA, Technical Meeting on Fuel Assembly Structural Behavior, 22-26 November 2004, Cucaracha, France.
[6] Hoepfner, D.W. and Adibnazari, S.: Fretting Fatigue in Aircraft Joints Presented to the International Committee of Aeronautical Fatigue in Stockholm, Sweden, June 1993.
[7] Hoepfner, D.W., Elliot, C.B.III, Moesser M.W. The Role of Fretting Fatigue on Aircraft Rivel Hole Cracking. Technical report DOT / FAA / AR – 96/10, Federal Aviation Administration, Salt Lake City, UT.
[8] Viceconti M et al. Fretting wear in modular neck hip prosthesis. J Biomed Mater Res 1997; 35-2, 207-216.
[9] Tritschler B, Forest B, Rieu J. Fretting corrosion resistance for orthopedic implants: Ti6Al4V Int 1999; 32: 587-596.
[10] Ito, T., Matsushima, M., Takata, K., Hattori, Y. Factors Influencing Fretting Corrosion of Tin Plated Contacts // SEI. Technical Review. No 64. April, 2007.
[11] C.A. Brown, and a., Fuel Rod Vibration and Fretting Impact on Reliability, LWR Fuel Performance, 10-13 April, 2000, USA.
[12] <http://blog-potolok.ru/kak-proisxodit-preobrazovanie-teplovoj-energii-v-elektricheskuyu/>
[13] <http://nnhpe.spbstu.ru/maloizvestnoe-oborudovanie-dlya-proizvodstva-elektroenergii/>
[14] <http://generatorexperts.ru/alternativnye-istochniki/parovye-elektrogeneratory.html>
[15] https://manbw.ru/analytics/which_is_better_gas_piston_or_gas_turbine_power_units.html

Статья поступила в редакцию 10.06.2019 г.

ВЕСТНИК
Волжской государственной академии
водного транспорта

Выпуск 60
2019

Формат бумаги 70х180 1/16. Бумага офсетная.
Ризография. Усл. печ. л. 15,25. Уч.-изд. л. 21,35.
Заказ . Тираж 500.

Отпечатано в типографии издательско-полиграфического комплекса ВГУВТ
603951, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5