

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ МОРСКОГО И РЕЧНОГО ФЛОТА
ИМЕНИ АДМИРАЛА С. О. МАКАРОВА»

ВЕСТНИК

**ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА
МОРСКОГО И РЕЧНОГО ФЛОТА
ИМЕНИ АДМИРАЛА С. О. МАКАРОВА**

Выпуск 2 (30)

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2015**

Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — СПб.: ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, 2015. — Вып. 2 (30). — 235 с.

ISSN 2309-5180

«Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова» является научным периодическим изданием, зарегистрированным Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Свидетельство о регистрации средства массовой информации от 17 июля 2013 г. ПИ № ФС 77-54734).

В Вестнике публикуются материалы научных исследований, а также статьи для опубликования основных результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук по основным группам специальностей в соответствии с Номенклатурой специальностей научных работников: **05.22.00 «Транспорт»** в разделах: Эксплуатация водного транспорта, судовождение, Водные пути сообщения и гидрография; **05.08.00 «Кораблестроение»** в разделах: Судостроение и судоремонт, Судовые энергетические установки, системы и устройства; **08.00.00 «Экономические науки»** в разделе: Экономика и управление на транспорте; **05.09.00 «Электротехника»** в разделе: Электротехнические комплексы и системы; **05.13.00 «Информатика, вычислительная техника и управление»** в разделе: Информационные технологии и автоматизация на транспорте.

Статьи публикуются на русском и английском языках.

Статьи тщательно отбираются по критериям новизны, актуальности, научно-практической значимости, возможности реального использования описанных в них новых технологий на водном транспорте. По содержанию статьи должны соответствовать тематике журнала, его целям и задачам.

Статьи рецензируются независимыми экспертами.

Кроме того, в Вестнике публикуются обзорные материалы научных конференций, семинаров и совещаний; сообщения и статьи к юбилейным датам ведущих ученых и знаменательным событиям университета.

Вестник включен в Перечень ведущих рецензируемых журналов и изданий Высшей аттестационной комиссии Министерства образования и науки РФ.

Вестнику присвоен международный стандартный номер сериального периодического издания ISSN 2309-5180.

С 2009 года журнал включен в базу данных «Российский индекс научного цитирования» (РИНЦ).

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



© Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова, 2015

СОДЕРЖАНИЕ

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА, СУДОВОЖДЕНИЕ 7

<i>Махин В. П., Страшко А. Н.</i> Математическое моделирование движения судов во льдах	7
<i>Гуца И. А.</i> Характеристика погрешностей систем навигационного комплекса, вырабатывающих скоростную информацию	12
<i>Коптев А. В.</i> Исследование влияния подводного течения на динамику корабля	16
<i>Осокина Е. Б., Оськин Д. А., Дыда А. А.</i> Адаптивная идентификация параметров судна на основе простых моделей	24
<i>Дорожко В. М.</i> Опрокидывание контура морского судна «волной-убийцей»	31
<i>Ермаков С. В.</i> Математическая модель маневра последнего момента с пассивным фактором	41
<i>Маринич А. Н., Припотнюк А. В., Устинов Ю. М.</i> Цифровые информационные потоки в судовых интегрированных системах навигации и системах связи	48
<i>Решняк В. И., Каляуш А. И.</i> Исследование работы адсорбционных фильтров в установках для очистки нефтесодержащей подсланевой воды	57

ВОДНЫЕ ПУТИ СООБЩЕНИЯ И ГИДРОГРАФИЯ 61

<i>Гарибин П. А., Субботин М. В.</i> Экспериментальные исследования сквозного волнозащитного сооружения с камерой гашения	61
<i>Селиверстов С. А., Селиверстов Я. А.</i> Моделирование транспортных потоков мегаполиса с вводом новых видов водного внутригородского пассажирского транспорта	69

СУДОСТРОЕНИЕ И СУДОРЕМОНТ 81

<i>Сухотерин М. В., Барышников С. О., Потехина Е. В.</i> О расчетах пластин по сдвиговым теориям	81
<i>Нагиев Ф. Б., Исмаилов З. О.</i> Обтекание судна пузырьковой морской водой	89
<i>Наумов В. С., Кочнева И. Б.</i> Идентификация материалов при обеспечении требований безопасной утилизации судов	98
<i>Ивановская А. В.</i> Формализация динамики механической системы «судно – ваер – трал» в переходном режиме	106
<i>Горохов М. С., Роннов Е. П.</i> Определение массы корпуса железобетонного стоечного судна на стадии исследовательского проектирования	113
<i>Купальцева Е. В.</i> Анализ проектных характеристик главных элементов пассажирских судов для внутригородских и пригородных линий	119

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ, СИСТЕМЫ И УСТРОЙСТВА 127

<i>Авдеев Б. А., Масюткин Е. П., Просвирнин В. И.</i> Моделирование процесса коагуляции в криволинейном потоке в масляных системах судовых энергетических установок	127
<i>Шабанов В. А., Наумова А. К., Васильев К. А.</i> Использование лапласиана при фильтрации изображений визуальной оценки поверхностей элементов судовой вентиляции из композитов	133

выпуск **2(30)**
2015

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Главный редактор

С. О. Барышников,

д.т.н., профессор

rector@gumrf.ru

Зам. гл. редактора

Т. А. Пантина, д.э.н., проф.

PantinaTA@gumrf.ru

Ю. Н. Горбачев —

ген. конструктор ОАО
«Инженерный центр
судостроения», д.т.н., проф.

С. Гуца —

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

Г. В. Егоров —

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

Ф. В. Кармазинов —

ген. директор ГУП
«Водоканал СПб», д.т.н., проф.

Р. Качиньски —

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

А. И. Пошивай —

заместитель руководителя
Федерального агентства
морского и речного транспорта

А. Е. Сазонов —

д.т.н., проф., член-
корреспондент РАН

Р. М. Юсупов —

директор Санкт-Петербургского
института информатики и
автоматизации РАН, д.т.н.,
проф., член-корреспондент РАН

РЕДАКЦИЯ:

E-mail: journal@gumrf.ru

http://journal.gumrf.ru

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

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

Подписной индекс в каталоге Роспечать — 37276.

Все материалы, поступившие в редакцию, рецензируются.

Члены ред. коллегии:	
<i>О. К. Безюков,</i> д.т.н., проф.	
<i>В. В. Веселков,</i> д.т.н., проф.	
<i>П. А. Гарибин,</i> д.т.н., проф.	
<i>Д. П. Голоскоков,</i> д.т.н., проф.	
<i>Б. П. Ивченко,</i> д.т.н., проф.	
<i>Ю. М. Искандеров,</i> д.т.н., проф.	
<i>О. Г. Каратаев,</i> д.т.н., проф.	
<i>А. В. Кириченко,</i> д.т.н., проф.	
<i>М. А. Колосов,</i> д.т.н., проф.	
<i>Е. А. Королева,</i> д.э.н., проф.	
<i>И. И. Костылев,</i> д.т.н., проф.	
<i>Е. А. Лаврентьева,</i> д.э.н., проф.	
<i>А. Ю. Ластовцев,</i> к.т.н., проф.	
<i>С. Б. Лебедев,</i> д.э.н., проф.	
<i>В. А. Логиновский,</i> д.т.н., проф.	
<i>Г. В. Макаров,</i> д.т.н., проф.	
<i>В. Е. Марлей,</i> д.т.н., проф.	
<i>А. М. Никитин,</i> д.т.н., проф.	
<i>А. П. Нырков,</i> д.т.н., проф.	
<i>Л. И. Погодаев,</i> д.т.н., проф.	
<i>Н. В. Растрьгин,</i> к.т.н., доц.	
<i>В. И. Решняк,</i> д.т.н., проф.	
<i>В. В. Романовский,</i> д.т.н., проф.	
<i>А. А. Сикарев,</i> д.т.н., проф.	
<i>И. П. Скобелева,</i> д.э.н., проф.	
<i>С. В. Смоленцев,</i> д.т.н., проф.	
<i>А. Л. Степанов,</i> д.т.н., проф.	
<i>М. В. Сухотерин,</i> д.т.н., проф.	
<i>Е. Г. Трунин,</i> к.э.н., директор РРР	
<i>Г. В. Ушакова,</i> к.и.н., проф.	
<i>В. И. Черненко,</i> д.т.н., проф.	
<i>В. Б. Чистов,</i> д.т.н., проф.	

ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ НА ТРАНСПОРТЕ	141
<i>Кузнецов А. Л., Галин А. В. Генезис моделей развития портов в современной транспортной науке</i>	141
<i>Лаврентьева Е. А., Плотникова А. И. Научные подходы к сущности управления налоговыми рисками в судоходной деятельности</i>	154
<i>Андреева М. Ю. Северный морской путь в политике экономического прорыва России: некоторые оценки и предпосылки</i>	164
<i>Крайнова В. В. Совершенствование систем калькулирования себестоимости перевозок в управленческом учете судоходных компаний</i>	171
<i>Пухальский В. А. Классификация и формирование конкурентных преимуществ портов</i>	179
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ	185
<i>Григорьев А. В., Глеклер Е. А. Компьютерное моделирование и исследование единой электроэнергетической системы в среде Simulink</i>	185
<i>Труднев С. Ю. Разработка компьютерной модели параллельной работы генераторного агрегата и трехфазного безынерционного источника питания</i>	191
<i>Родимов Н. В. Анализ систем повышения качества электрической энергии при активной фильтрации гармонических искажений сети</i>	198
ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И АВТОМАТИЗАЦИЯ НА ТРАНСПОРТЕ	208
<i>Андрюшечкин Ю. Н., Каретников В. В., Яснов А. П. К вопросу использования современных информационных технологий для обеспечения безопасности судоходства на внутренних водных путях России</i>	208
<i>Бухарметов М. Р., Теплов Э. П. Защита графических документов путем встраивания полухрупких цифровых водяных знаков на основе модуляции яркости</i>	213
<i>Попов Б. Н., Федорина Е. С. Применение методов анализа и обработки данных к информационным потокам объектов водного транспорта</i>	220
<i>Шахнов С. Ф. Функциональная устойчивость параметров речных локальных дифференциальных подсистем автоматизированных систем управления движением судов</i>	225

OPERATION OF WATER TRANSPORT, NAVIGATION	7
<i>Mahin V. P., Strashko A. N.</i> Mathematical modeling of movement of vessels in ice	7
<i>Gushha I. A.</i> Characterization of errors in navigating complex systems that produce high-speed information	12
<i>Koptev A. V.</i> Research of influence of underwater current on the dynamics of the ship	24
<i>Osokina E. B., Oskin D. A., Dyda A. A.</i> Simple modles based on adaptive identification of ship parameters	31
<i>Dorozhko V. M.</i> Capsizing of seagoing vessel contour due to «rogue wave»	41
<i>Ermakov S. V.</i> Mathematical model of last moment maneuver with passive factor	48
<i>Marinich A. N., Pripotnjuk A. V., Ustinov Ju. M.</i> Digital information streams in the ship integrated systems of navigation and communication systems	57
<i>Reshnjak V.I. Kaljaush A.I.</i> Investigation work adsorption filters in installations for cleaning oily bilge water	61
WATERWAYS AND HYDROGRAPHY	61
<i>Garibin P. A., Subbotin M. V.</i> Experimental research of open protective structure with stilling basin	69
<i>Seliverstov S.A., Seliverstov Ja.A.</i> Modeling of traffic flows megapolis with introduction of new water types of passenger transport interacity	81
SHIPBUILDING AND SHIP REPAIR	81
<i>Suhoterin M. V., Baryshnikov S. O., Potehina E. V.</i> On settlement plates in shear theories	89
<i>Nagiev F. B. Ismailov Z. O.</i> Bubble seawater flow around ship	98
<i>Naumov V. S. Kochneva I. B.</i> Identification of the material to meet the requirements of safe ship recycling	106
<i>Ivanovskaja A. V.</i> Formalization of dynamics mechanical system a «ship-dragrope-trawl» in transient condition	113
<i>Gorohov M. S., Ronnov E. P.</i> Definition of the mass of reinforced concrete stationary vessel hull at the stage of research designing	119
<i>Kupalceva E. V.</i> Analysis of the design characteristics of the main elements of inland vessels	127
SHIP POWER PLANTS, SYSTEMS AND DEVICES	127
<i>Avdeev B. A., Masjutkin E. P., Prosvirnin V. I.</i> Modeling of coagulation process in the curvilinear flow in the oil system of ship power plants	133
<i>Shabanov V. A., Naumova A. K., Vasilev K. A.</i> The use of laplacian filtering images for the visual evaluation of surface elements of shipboard ventilation of composites	141
ECONOMICS AND MANAGEMENT OF TRANSPORT	141
<i>Kuznecov A. L. Galin A. V.</i> The genesis of port development models in modern transportation science	154
<i>Lavrenteva E. A., Plotnikova A. I.</i> A scientific approach to tax risk management in shipping	164
<i>Andreeva M. Ju.</i> Some aspects and assessment of NSR as a way of economic rising of Russia	171
<i>Krajnova V. V.</i> Improving systems of calculation cost of transportation in management accounting shipping companies	179
<i>Puhalskij V. A.</i> Ports competetive advantages classification and development	

edition **2(30)**
2015

EDITOR-IN-CHIEF

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

Deputy Editor-in-Chief
T. A. Pantina
doctor of economic Sciences, Prof.
PantinaTA@gumrf.ru

Yu. N. Gorbachev —
general Designer of JSC
“Engineering center of
shipbuilding”, doctor of technical
Sciences, Prof.

S. Gutsma —
Rector of the Maritime Academy
(g.Schetsin, Poland), doctor of
technical Sciences, Prof.

G. V. Yegorov —
General Director of “Marine
Engineering Bureau - St.
Petersburg”, doctor of technical
Sciences, Prof.

F. V. Karmazinov —
General Director “Vodokanal
of St. Petersburg”, doctor of
technical Sciences, Prof.

R. Kachin'ski —
Vice-Rector for Development
and Cooperation of the Technical
University (Bialystok, Poland),
doctor of technical Sciences, Prof.

A. I. Poshivay —
Deputy Head of the Federal
Agency of Sea and River
Transport

A. Ye. Sazonov —
doctor of technical Sciences,
Prof., corresponding member of
the Russian Academy of Sciences

R. M. Yusupov —
director of “St. Petersburg
Institute for Informatics and
Automation of RAS”, doctor
of technical Sciences, Prof.,
corresponding member of the
Russian Academy of Sciences

EDITORIAL STAFF:
E-mail: journal@gumrf.ru
http://journal.gumrf.ru

Editorial Collegium:

O. K. Bezyukov,
doctor of technical Sciences, Prof.
V. V. Veselkov,
doctor of technical Sciences, Prof.
P. A. Garibin,
doctor of technical Sciences, Prof.
D. P. Goloskokov,
doctor of technical Sciences, Prof.
B. P. Ivchenko,
doctor of technical Sciences, Prof.
Y. M. Iskanderov,
doctor of technical Sciences, Prof.
O. G. Karatayev,
doctor of technical Sciences, Prof.
A. V. Kirichenko,
doctor of technical Sciences, Prof.
M. A. Kolosov,
doctor of technical Sciences, Prof.
Ye. A. Koroleva,
doctor of economic Sciences, Prof.
I. I. Kostylev,
doctor of technical Sciences, Prof.
Ye. A. Lavrentyeva,
doctor of economic Sciences, Prof.
A. Yu. Lastovtsev,
candidate of technical Sciences, Prof.
S. B. Lebedev,
doctor of economic Sciences, Prof.
V. A. Loginovskiy,
doctor of technical Sciences, Prof.
G. V. Makarov,
doctor of technical Sciences, Prof.
V. Ye. Marley,
doctor of technical Sciences, Prof.
A. M. Nikitin,
doctor of technical Sciences, Prof.
A. P. Nyrkov,
doctor of technical Sciences, Prof.
L. I. Pogodayev,
doctor of technical Sciences, Prof.
N. V. Rastrygin,
candidate of technical Sciences,
Associate Prof.
V. I. Reshnyak,
doctor of technical Sciences, Profe
V. V. Romanovskiy,
doctor of technical Sciences, Prof.
A. A. Sikarev,
doctor of technical Sciences, Prof.
I. P. Skobeleva,
doctor of economic Sciences, Prof.
S. V. Smolentsev,
doctor of technical Sciences, Prof.
A. L. Stepanov,
doctor of technical Sciences, Prof.
M. V. Sukhoterin,
doctor of technical Sciences, Prof.
Ye. G. Trunin,
candidate of economic Sciences,
General Director
of FSI Russian River Register
G. V. Ushakova,
doctor of History, Prof.
V. I. Chernenko,
doctor of technical Sciences, Prof.
V. B. Chistov,
doctor of technical Sciences, Prof.
A. A. Yershov,
doctor of technical Sciences,
Associate Prof.
A. P. Gorobtsov,
candidate of technical Sciences,
Associate Prof.
B. A. Smyslov,
Candidate of Law, Prof.
A. Yu. Sharonov,
candidate of Geography, Associate Prof.
A. Ye. Sazonov,
doctor of technical Sciences, Prof.

ELECTRICAL EQUIPMENT AND SYSTEMS 185

Grigorev A. V., Glekler E. A. Computer simulation and research of the integrated
electric power system in Simulink 185
Trudnev S. Ju. Development of computer model of parallel operation
of the generating unit and three-phase non-inertial power supply 191
Rodimov N. V. Analysis of improving the quality of electrical energy
at active filtering of harmonic distortion of network 198

INFORMATION TECHNOLOGY AND AUTOMATION IN TRANSPORT 208

Andrjushechkin Ju. N., Karetnikov V. V., Jasnov A. P. On the question
of the use of modern information technology for navigation safety
on inland Russian waterways 208
Buharmetov M. R., Teplov Je. P. Graphic documents protection by embedding
a digital watermark based brightness modulation 213
Popov B. N., Fedorina E. S. Using of methods for analysis and processing data
to an information flows for objects of water transport 220
Shahnov S. F. Functional stability parameters of the river local differential
subsystems of automated control system vessel traffic 225

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА, СУДОВОЖДЕНИЕ

УДК 629.5.073.4

В. П. Махин,
канд. техн. наук, доц.;

А. Н. Страшко,
канд. техн. наук, доц.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ СУДОВ ВО ЛЬДАХ

MATHEMATICAL MODELING OF MOVEMENT OF VESSELS IN ICE

В работе приведены результаты численного моделирования ледовой ходкости судна во льдах различного характера и толщины. Выявлен характер ледового сопротивления судна в различных условиях плавания. Представлены графики расчетных величин в сравнении с экспериментальными данными. При этом основные коэффициенты пропорциональности и степени определяются методом подбора с использованием данных эксперимента с учетом независимости гидродинамических сил сопротивления воды и сил сопротивления льда. Выполненные исследования отнесены к движению судна в ровном льду со слабым торошением. Показано, что расчётная ледовая категория судна не всегда соответствует установленному ледовому классу, что повышает риск ледовой аварийности. Сделаны выводы о применимости методики численного моделирования при разработке нормативных документов, регламентирующих ледовое плавание судов. Указано на необходимость учета особых свойств льда в Финском заливе.

The results of numerical modeling of the different kinds of ice propulsion ability of a ship indicated in the paper. Revealed the nature of the ice resistance of a vessel in a variety of sailing conditions. Schedules of settlement sizes in comparison with experimental data are presented. Thus the basic coefficients of proportionality and degree we will define a trial and error method, using the experiment data. Independence of hydrodynamic forces of a water drag and ice drag forces is assumed. The fulfilled researches have been referred to vessel movement in equal ice, with weak hummocking.

It is shown that the estimated ice category of the vessel often does not meet government ice class, which increases the risk of ice accidents. It is shown that the settlement ice class of vessel not always corresponds to the established ice class that raises risk of ice breakdown susceptibility. Conclusions are drawn on applicability of a technique of numerical modelling by working out of the standard documents regulating navigation in ice of ships. Necessity of the account of special characteristics of ice for the Gulf of Finland is specified.

Ключевые слова: судно, ледовые качества, ледовая ходкость, максимальный упор винта, сопротивление льда, торможение и разгон судна.

Key words: vessel, ice performances, ice propulsion ability, the maximum thrust of the propeller, ice resistance, breaking and acceleration of the ship.



ЕСМОТРЯ на легкие ледовые условия в Финском заливе сезона зимы 2014 – 2015 гг. следует помнить о суровых предшествующих зимах и о большой вероятности повторения такой ледовой обстановки. Были зимы, когда в Финском заливе до 200 судов простаивали в ожидании ледовой проводки, что сопровождалось потерями ходового времени, срывом планов перевозки грузов и, как следствие, огромными убытками. С одной стороны, это явилось следствием недостатков организации ледового обеспечения бассейна Балтийского моря, а с другой — просчетов в обеспечении необходимых ледовых качеств судов, а также недостаточного учета свойств ледового покрова в Финском заливе, особенно в весенний период. В то же время следует помнить о том, что существует вероятность наступления настоящих суровых зим, сведения о которых содержат уникальные материалы наблюдений за ледовым покровом, выполненные в 40 – 70-е гг. XX в. С учетом ранее изложенного, в работе предприняты попытки создать математический аппарат,

позволяющий выполнить необходимые расчеты по определению сопротивления льда движению судна.

При моделировании движения судна во льду можно использовать систему уравнений для движения судна с переложным рулём на свободной воде [1], [2]. Для этого при рассмотрении прямолинейного движения судна во льду как частного случая движения с переложным рулём достаточно видоизменить первое уравнение этой системы, исходя из предположения о независимости гидродинамических сил сопротивления воды и льда. Данное предположение позволяет ограничиться добавлением в первое уравнение системы выражения для сопротивления льда и видоизменить расчёт упора винтов.

Полагая сопротивление льда пропорциональным его толщине и скорости движения судна во льду, определим сопротивление льда как

$$R_i = k_i \cdot h_i^m \cdot V_i^n, \quad (1)$$

где k_i — коэффициент пропорциональности; h_i — толщина льда; V_i — скорость судна во льду.

Коэффициент пропорциональности k_i и степени m, n определим методом подбора, используя данные эксперимента.

Расчёт упора винтов меняем следующим образом. В рассматриваемой модели, создаваемой для расчёта движения судна на циркуляции, упор винта рассчитывается двумя составляющими:

$$T = \frac{n_i^2 W}{V} \left[(0,885 - 0,00115) \frac{2\pi n}{60} \cdot \sqrt{L} \right] + k_{s1} (V_n - V_t), \quad (2)$$

где T — упор винта, Н; W — номинальная пропульсивная мощность, кВт; V — скорость на свободной воде при номинальной мощности, м/с; n — обороты винта при номинальной мощности, об/мин; n_i — обороты винта в расчётном маневре, об/мин; L — длина судна, м; V_n — начальная скорость в расчётном маневре, м/с; V_t — текущая скорость в маневре, м/с; k_{s1} — коэффициент, учитывающий изменение упора на циркуляции.

Первая составляющая определяет упор винта на скорости свободного хода, вторая — учитывает рост упора на циркуляции судна в связи с падением скорости при криволинейном движении. Коэффициент k_{s1} определяется по данным циркуляции на ходовых испытаниях, имеющимся на судах в виде, регламентированном ИМО для информации о маневренных характеристиках.

При движении судна во льду с оборотами, равными оборотам на свободной воде, требуется дополнительная мощность на преодоление сопротивления льда. Для судов ледового плавания и ледоколов введена такая характеристика, как льдопроходимость, представляющая собой максимальную толщину льда, которую сможет преодолеть судно с определённой скоростью. При движении во льду, характерном для его льдопроходимости, необходим максимальный упор, обеспечиваемый максимальной пропульсивной мощностью силовой установки. Упор при этом близок к упору на швартовых. Если предположить, что необходимый дополнительный упор на преодоление сопротивления льда линейно зависит от скорости движения во льду и меняется от максимального (при характерной для льдопроходимости этого судна толщине льда) до упора при движении на свободной воде, то его можно аналитически выразить следующим образом:

$$T_{\text{доп}} = k_p \left(\frac{n_i}{n} \right)^2 \left[0,885 - 0,00115 \frac{2\pi n}{60} \sqrt{L} \right] \cdot \frac{V - V_t}{V}, \quad (3)$$

где k_p — коэффициент, учитывающий изменение упора на скорости льдопроходимости.

Таким образом, при скорости движения, близкой к скорости льдопроходимости, суммарный упор в первом уравнении системы будет близок к упору на швартовых. С ростом скорости движения до скорости на свободной воде дополнительный упор $T_{\text{доп}}$ винта приближается к нулю и значение упора винта в уравнении приближается к упору на свободной воде, что соответствует реальности.

Используя выражение (1) для расчёта сопротивления льда, по экспериментальным данным пассивного торможения судна «Борис Бувин» во льду определялись методом подбора k_p , m , n . Таким образом, получено выражение для сопротивления льда данному судну:

$$R_i = 0,1 D h_i^{1,2} V_i^{0,2}, \quad (4)$$

где R_i — сопротивление льда движению судна, Н; D — водоизмещение судна с учётом присоединённых масс, кг.

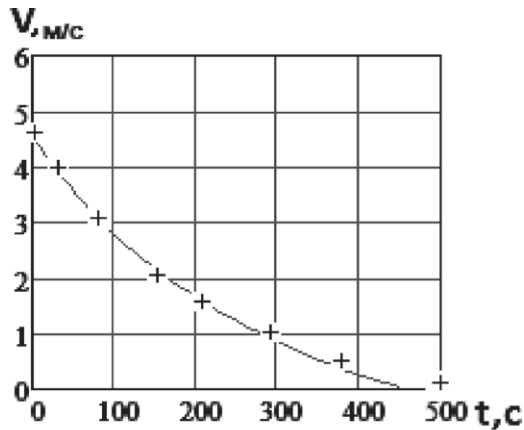


Рис. 1. Пассивное торможение во льду толщиной 0,10 – 0,15 м т/х «Борис Бувин»

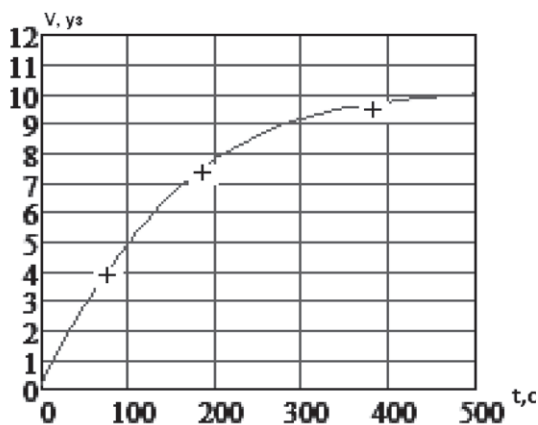


Рис. 2. Разгон неподвижного судна во льду толщиной 0,10 – 0,15 м до 9,2 уз (110 об/мин)

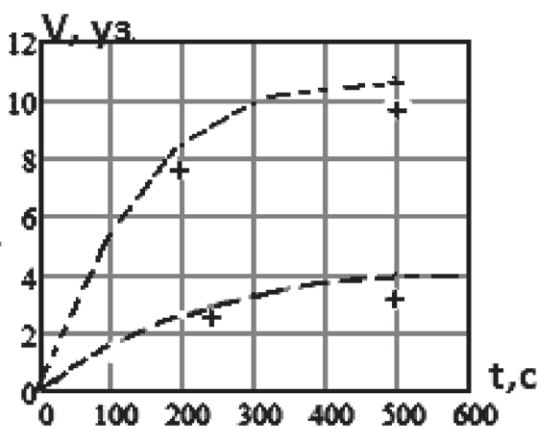


Рис. 3. Разгон во льду толщиной 0,15 м на малом — 75 об/мин (нижняя кривая) и среднем — 121 об/мин (верхняя кривая) ходу

На рис. 1 приведено сравнение результатов расчёта пассивного торможения судна «Борис Бувин» с экспериментом при сопротивлении льда R_i . Торможение во льду толщиной 10 – 15 см, со скоростью 9,2 уз (113 об/мин). Сплошной линией показаны результаты расчёта, крестиками — экспериментальные точки.

Полученное выражение для сопротивления льда далее использовалось для определения коэффициента k_p , учитывающего рост упора винтов на скорости льдопроходимости. Для определения значения этого коэффициента использовались эксперименты по разгону судна во льдах. Для т/х «Борис Бувин» наилучшее совпадение расчётных и экспериментальных данных соответствует коэффициенту, равному 0,3. Это значит, что на скорости, близкой к скорости льдопроходимости, упор его винтов увеличивается на 30 %.

На рис. 2 приведены результаты расчёта разгона с полученным ранее выражением для сопротивления льда и полученным коэффициентом k_p . Сплошной линией показаны результаты расчёта, на которую нанесены экспериментальные точки.

На рис. 3 приведены результаты расчёта скорости движения данного судна на режимах малого (75 об/мин) и среднего (121 об/мин) хода, т. е. на режимах движения, которые не рассматривались при определении параметров для расчёта сопротивления льда и определении коэффициента k_p . Пунктирными линиями показан расчёт скорости, крестиками нанесены экспериментальные точки. Из рисунка видно, что качественно расчёт соответствует экспериментальным данным. Необходимо отметить, что выполненные исследования относятся к движению судна в ровном льду, со слабым торошением. При движении в битом смёрзшемся льду, движении за буксиром, ледоколом в пробитых каналах, заполненных льдом, особенно на малом ходу, сопротивление льда будет иным, и требуются дополнительные исследования. Полученные результаты позволяют, например, рассчитать для определённых типов судов скорости движения во льду разной толщины при разных режимах движения.

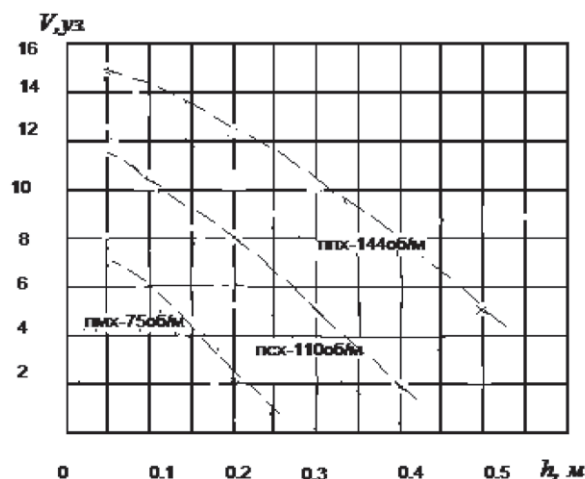


Рис. 4. Скорость движения судов типа «Иван Скуридин» в ровном льду разной толщины

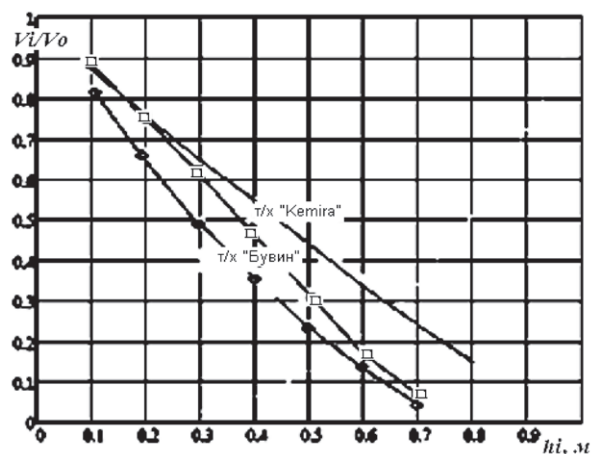


Рис. 5. Сравнение результатов расчёта кривых $V_i/V_0 = f(h_i)$ для танкера «Sotka» с определением ледового сопротивления двумя способами (крестиками отмечена кривая, рассчитанная по предлагаемой модели)

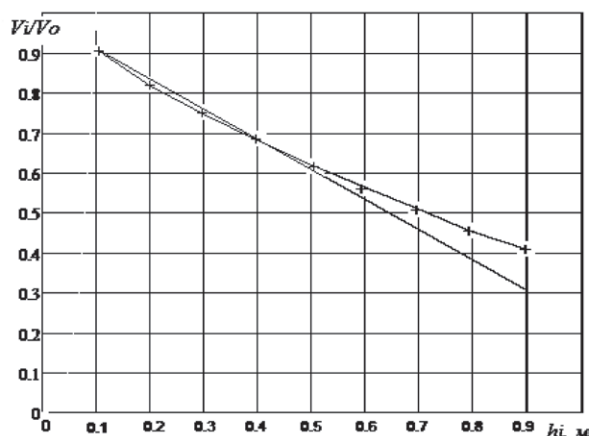


Рис. 6. Сравнение результатов расчёта кривых $V_i/V_0 = f(h_i)$ для т/х «Борис Бувин» (□ — сопротивление льда по формуле модели; ● — сопротивление льда по формулам *The Finnish-Swedish Ice Class Rules*) и танкера «Kemira» (сплошная линия — сопротивление льда по формулам *The Finnish-Swedish Ice Class Rules*)

На рис. 4 приведены такие графики скоростей движения судов типа т/х «Иван Скуридин» при движении во льдах разной толщины, рассчитанные с применением полученных результатов.

В интернете имеются данные о льдопроходимости отечественных атомных ледоколов. Применение настоящей математической модели показывает, что ледокол «Ленин» для заявленной льдопроходимости 2 м не обладал соответствующей пропульсивной мощностью, как и атомный лихтеровоз «Севморпуть» с льдопроходимостью 1,5 м. Пропульсивная мощность серии атомных ледоколов типа «Арктика», а также атомных ледоколов «Ямал», «Советский Союз» и «50 лет Победы» вполне соответствуют льдопроходимости 2 м на скорости не менее 2 уз.

На рис. 5 приведены результаты расчёта падения скорости V_i/V_0 во льду толщиной h_i для танкера водоизмещением 22 000 т, класса *IC Super* с использованием рассматриваемой модели и расчёта сопротивления льда, применяемого в *The Finnish-Swedish Ice Class Rules* и приведённого в [3]. Падение скорости представлено в виде отношения скорости движения во льду к скорости свободного хода V_i/V_0 . Как видно, расхождения результатов незначительны и наблюдаются с ростом толщины льда.

Рис. 6 также содержит кривые, рассчитанные двумя способами: для судна «Борис Бувин» с использованием предлагаемой модели и формул для определения сопротивления льда, приведённых в *The Finnish-Swedish Ice Class Rules*. Для сравнения на рисунке нанесена кривая, рассчитанная по формулам для сопротивления льда, используемым в *The Finnish-Swedish Ice Class Rules*, для танкера «Kemira» мощностью 4200 кВт, водоизмещением 8500 т, т. е. близкого по своей мощности и водоизмещению судну «Борис Бувин» [3].

Из рис. 6 видно, что для одного и того же судна т/х «Борис Бувин» оба способа дают близкие результаты, так же, как и для разных судов, близких по своим параметрам, таким как пропульсивная мощность и водоизмещение, результаты расчёта близки, что свидетельствует о достоверности модели прямо-

линейного движения судна во льду. Эта модель, в свою очередь, позволяет определить такие важные в эксплуатации характеристики, как пути торможения судов во льду разной толщины, скорости движения на вынужденных пониженных ходах при движении в караване и ряд других.

В заключение можно сказать, что наличие математической модели движения судна во льду может способствовать уточнению параметров модели для различных судов и различных типов льда путём обобщения доступных практических наблюдений с судов ледового плавания в реальных условиях. И особенно такое уточнение относится к типу льда, в котором движется судно. Действующие правила для судов ледового класса (например, *The Finnish-Swedish Ice Class Rules*) в своей основе имеют нормирование мощности силовой установки судов и сопротивление смёрзшегося битого льда в каналах. Хотя из практики ледового плавания [4] – [10] известно, что битый не смёрзшийся лед в виде шуги, накапливающейся в канале, может представлять большее препятствие, чем ровный лед, в котором проложен канал. Математическая модель движения судна во льду представляет широкие возможности для исследования движения судна и в таком льду. Объём и форма информации для капитанов судов, плавающих в ледовых условиях, требует дальнейшей разработки, в помощь которой может быть предложено представленное в данной работе математическое моделирование движения судна во льду.

Список литературы

1. Страшко А. Н. Маневрирование судна в условиях ветра. Теория и эксперимент / А. Н. Страшко, В. П. Махин // Эксплуатация морского транспорта. — 2007. — № 3 (49). — С. 23 – 26.
2. Махин В. П. Влияние волнения на движение судна в условиях ветра / В. П. Махин, А. Н. Страшко // Эксплуатация морского транспорта. — 2010. — № 2 (60) — С. 29–31.
3. Juva Mikko. On the power requirement in the Finnish-Swedish Ice Class Rules / Mikko Juva, Kai Riska // Research Report No 53. – Helsinki University of Technology, Ship Laboratory, Espoo, 2002.
4. Арикайнен А. И. Азбука ледового плавания / А. И. Арикайнен, К. Н. Чубаков. — М.: Транспорт, 1987. — 224 с.
5. Безопасность плавания во льдах / под ред. А. П. Смирнова. — М.: Транспорт, 1993. — 330 с.
6. Каштелян В. И. Сопротивление льда движению судна / В. И. Каштелян, И. И. Позняк, А. Я. Рывлин. — Л.: Судостроение, 1968. — 268 с.
7. Ионов Б. П. Ледовая ходкость судов / Б. П. Ионов, Е. М. Грамузов. — СПб: Судостроение, 2001. — 512 с.
8. Рывлин А. Я. Испытания судов во льдах / А. Я. Рывлин, Д. Е. Хейсин. — Л.: Судостроение, 1980. — 208 с.
9. Снопков В. И. Управление судном: учебник для вузов / В. И. Снопков. — СПб.: Профессионал, 2004. — 536 с.
10. Сазонов К. Е. Метод расчета ледового сопротивления судна при его движении в крупнобитых льдах и обломках ледяных полей / К. Е. Сазонов, А. А. Добродеев // Тр. ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова. — 2011. — Вып. 63 (347). — С. 73–80.