ISSN 2223-7097

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СБОРНИК
РОССИЙСКОГО МОРСКОГО РЕГИСТРА СУДОХОДСТВА

БЕЗОПАСНАЯ ДИСТАНЦИЯ ЛЕДОКОЛЬНОЙ ПРОВОДКИ
НОВАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

БУНКЕРОВКА СПГ
РАЗВИТИЕ МОРСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

СУДА ЛЕДОВОГО ПЛАВАНИЯ
ЭФФЕКТИВНОСТЬ НОВОГО РУЛЕВОГО УСТРОЙСТВА



№ 66/67
июль
2022

Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства, № 66/67, 2022

Научно-технический и информационно-аналитический журнал, издается с 1916 года.
Учредитель-издатель
ФАУ «Российский морской регистр судоходства»
Главный редактор
М.С. Бойко
E-mail: boyko.ms@rs-class.org
ISSN 2223-7097

Редакционная коллегия
С.А. Шишкин – председатель, заместитель генерального директора, ФАУ «Российский морской регистр судоходства»
М.С. Бойко – к.т.н., заместитель председателя, главный редактор журнала, ФАУ «Российский морской регистр судоходства»
А.С. Большев – д.т.н., проф., Санкт-Петербургский государственный политехнический университет им. Петра Великого
А.В. Григорьев – к.т.н., доц., ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова
А.А. Иванченко – д.т.н., профессор, заведующий кафедрой двигателей внутреннего сгорания и автоматики судовых энергетических установок, ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова
А.В. Ильин – д.т.н., доцент, заместитель генерального директора по научной работе, НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ Прометей»
М.А. Кутейников – д.т.н., начальник отдела конструкции корпуса и судовых устройств, ФАУ «Российский морской регистр судоходства»
А.В. Марченко – д.т.н., проф., Свальбардский международный университет (UNIS)
В.Н. Половинкин – д.т.н., проф., научный руководитель, ФГУП «Крыловский государственный научный центр»
А.А. Родионов – д.т.н., проф., заведующий кафедрой строительной механики корабля, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
К.В. Рождественский – д.т.н., проф., проректор в области международного сотрудничества и образования, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
А.Е. Сазонов – д.т.н., проф., член-корр. РАН, ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова
О.Я. Тимофеев – д.т.н., проф., Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
В.Н. Тряскин – д.т.н., проф., заведующий кафедрой конструкции и технической эксплуатации судов, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

Подписка на журнал может быть оформлена по каталогу «Прессинформ». Подписной индекс 87730.
Электронная версия журнала доступна по адресу:
www.rs-class.org.
Журнал включен в Российский индекс научного цитирования www.elibrary.ru, Реферативный журнал и фонд научно-технической литературы ВИНИТИ РАН, международную базу данных периодических изданий Ulrich's Periodicals Directory.
Журнал зарегистрирован Министерством связи и массовых коммуникаций Российской Федерации. Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-64086 от 25 декабря 2015 г.
Решением Президиума ВАК журнал «Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства» включен в перечень ведущих научных журналов и изданий, выпускаемых в РФ, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук http://perechen.vak2.ed.gov.ru/

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

Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping, № 66/67, 2022

Scientific and technical periodical has been published since 1916.
The Founder and the Publisher
Russian Maritime Register of Shipping (RS)
Editor-in-Chief
Maxim Boyko
E-mail: boyko.ms@rs-class.org
ISSN 2223-7097

Editorial board
Sergei Shishkin – Deputy Director General, Chairman of Editorial Board, RS
Maxim Boyko – Candidate of Technical Science, Deputy Chairman of Editorial Board, Editor-in-Chief of Research Bulletin by RS
Alexander Bolshev – Doctor of Science, professor of St. Petersburg State Polytechnic University
Andrey Grigoriev – Candidate of Technical Science, Admiral
Alexander Ivanchenko – Doctor of Technical Science, professor, Head of Internal Combustion Engines and Automation of Marine Power Plants Department, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping
Alexey Ilin – Doctor of Technical Science, associate professor, Deputy General Director and Head of Research and Production Complex, NRC "Kurchatov Institute", CRISM "Prometey"
Makarov State University of Maritime and Inland Shipping
Mikhail Kuteynikov – Doctor of Technical Science, Head of Hull Department, RS
Aleksey Marchenko – Doctor of Technical Science, professor, University Centre in Svalbard, Norway
Valery Polovinkin – Doctor of Technical Science, professor, Research Manager, Krylov State Research Centre
Aleksander Rodionov – Doctor of Technical Science, professor of St. Petersburg State Marine Technical University
Kirill Rozhdestvenskiy – Doctor of Technical Science, professor of St. Petersburg State Marine Technical University
Anatoliy Sazonov – Doctor of Technical Science, professor of Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, corresponding member of Russian Academy of Science
Oleg Timofeev – Doctor of Technical Science, St. Petersburg State Marine Technical University
Vladimir Tryaskin – Doctor of Technical Science, professor, St. Petersburg State Marine Technical University

Subscription index is 87730 in Pressinform catalog.
On-line version of the journal is available on website:
www.rs-class.org.
The journal is included in Russian index of scientific citing www.elibrary.ru, VINITI RAS Scientific and Technical Literature Collection, Ulrich's Periodicals Directory international database.
The journal is registered by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology, and Mass Media. Registration Certificate ПИ № ФС77-64086 of 25.12.2015.
The journal is included into the List of Supreme Attestation Commission of leading peer-reviewed scientific magazines and editions, in which basic scientific results of doctoral and post-doctoral theses (in application for the scientific degrees of Doctor and Candidate of Science) shall be published http://perechen.vak2.ed.gov.ru/

Authors are responsible for the contents of information and advertisement materials as well as for use of information not liable to publication in open press.

© Российский морской регистр судоходства, 2022

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СБОРНИК

РОССИЙСКОГО МОРСКОГО РЕГИСТРА СУДОХОДСТВА

№ 66/67

RESEARCH BULLETIN

BY RUSSIAN MARITIME REGISTER OF SHIPPING

Журнал «Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства» публикует результаты научных исследований по широкому спектру вопросов безопасности мореплавания судов и морских объектов, охраны человеческой жизни на море, сохранности грузов, экологической безопасности, обзорные материалы и информацию о существенных изменениях действующих правил и руководств Регистра.
Журнал предназначен для широкого круга специалистов, связанных с вопросами безопасности человеческой жизни на море, охраны окружающей среды, проектирования и строительства судов и средств освоения шельфа. Также журнал будет интересен студентам и курсантам профильных технических образовательных учреждений.
Регистр выражает признательность авторам статей и приглашает ученых и специалистов к публикациям научных работ в журнале.
Журнал распространяется на специализированных отраслевых мероприятиях, конференциях и выставках.
Журнал входит в Перечень ВАК по следующим научным специальностям:
2.5.17 – Теория корабля и строительная механика
2.5.18 – Проектирование и конструкция судов
2.5.20 – Судовые энергетические установки и их элементы (главные и вспомогательные)
2.6.1 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов

Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping is a periodical covering a wide range of questions in the areas of shipbuilding and shipping, offshore development facilities, up-to-date maritime technology, environmental protection and maritime safety. New research results and scientific developments in the area of shipbuilding, are introduced in our journal.
The journal is intended for specialists of shipbuilding and ship repair companies, design engineering bureaus, research institutes, professors and postgraduate students of marine universities.
Russian Maritime Register of Shipping expresses appreciation to the authors and invites scientists and specialists to submit articles for publication in the journal.
The journal is distributed at trade events, conferences and exhibitions.
The Research Bulletin publishes the articles on the specialties in accordance with the nomenclature of specialties of scientific workers:
2.5.17 – Theory of the ship and ship structural mechanics
2.5.18 – Design and construction of ships
2.5.20 – Ship energetics and its components (main and auxiliary)
2.6.1 – Metal science and thermal treatment of metals and alloys

Санкт-Петербург
2022






СОДЕРЖАНИЕ

БЕЗОПАСНОСТЬ МОРЕПЛАВАНИЯ И ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ
MARITIME SAFETY AND ENVIRONMENTAL PROTECTION

Таровик О.В. Безопасная дистанция ледокольной проводки судов с винторулевыми колонками 4

O.V. Tarovik Safe distance for icebreaker escorting of ships with podded propulsors

ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ НА МОРСКОМ ТРАНСПОРТЕ
SEA TRNSPORT ECONOMICS AND MANAGEMENT

Власьев М.В. Обоснование месторасположения перевалочных комплексов бункерного топлива 20

M.V. Vlasiev Justification for bunker fuel transshipment complex location

МОРЕХОДНЫЕ КАЧЕСТВА СУДОВ
SEAWORTHINESS

Семенова В.Ю., Альбаев Д.А. Исследование влияния нелинейного момента на параметрическую бортовую качку судна. 30

V.Yu. Semenova, D.A. Albaev Investigation of the nonlinear moment influence on the parametric rolling of a ship

Мурашов М.А., Веретенников Д.О., Михеев М.Ю., Гоманцов А.А., Прудников П.В. Повышение качества опыта кренования подводных лодок с помощью применения электронных угломерных приборов 39

M.A. Murashov, D.O. Veretennikov, M.Yu. Mikheev, A.A. Gomantsov, P.V. Prudnikov Improving the quality of the inclination test with the help of electronic angular instruments

ПРОЧНОСТЬ СУДОВ И ПЛАВУЧИХ СООРУЖЕНИЙ
STRENGTH OF SHIPS AND FLOATING FACILITIES

Шаринкова О.С., Аносов А.П., Новосельцев И.А. Сравнительная оценка гидродинамических характеристик руля изменяемого профиля в составе винторулевого комплекса судна ледового класса 49

O.S. Sharinkova, A.P. Anosov, I.A. Novoseltsev Comparative evaluation of hydrodynamic characteristics of variable profile rudder as a part of ice class ship propulsion complex

Черейский И.З., Петров А.А., Бродянский С.В., Володченко Е.В. Расчетное обоснование применения однокорпусной конструкции железобетонного стоечного судна-накопителя нефтепродуктов. 58

I.Z. Chereyskiy, A.A. Petrov, S.V. Brodyanskiy, E.V. Volodchenko Computational justification of single-hull structure design for the berth-connected reinforced concrete storage unit for oil products

МАТЕРИАЛЫ И СВАРКА
MATERIALS AND WELDING

Петров А.А. Разработка требований к материалам и технологии изготовления трехслойных панелей, являющихся элементами корпусных конструкций. 68

A.A. Petrov Development of requirements for materials and manufacturing technology for three-layer panels used as elements of hull structures

МЕХАНИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ДВИЖИТЕЛИ
MECHANICAL INSTALLATIONS AND PROPULSION

Подволоцкий Н.М. Гидромеханическая модель грузобалластных операций танкеров 77

N.M. Podvolotsky Hydromechanical model of cargo-ballast operations for tankers

Шурпяк В.К. Сравнение требований различных нормативных документов к параметрам гибки труб судовых трубопроводов 86

V.K. Shurpyak Comparison of various standards requirements for pipe bending parameters for ship pipelines

ПРОБЛЕМЫ ЧЕЛОВЕЧЕСКОГО ФАКТОРА
HUMAN ELEMENT

Зенкова И.Ф. Анализ современных подходов к оценке квалификации на примере специалистов, выполняющих водолазные спуски и подводные работы 92

I.F. Zenkova Analysis of modern approaches to qualification assessment as demonstrated with specialists performing diving and underwater works



БЕЗОПАСНОСТЬ МОРЕПЛАВАНИЯ И ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

УДК 629.123

БЕЗОПАСНАЯ ДИСТАНЦИЯ ЛЕДОКОЛЬНОЙ ПРОВОДКИ СУДОВ С ВИНТОРУЛЕВЫМИ КОЛОНКАМИ

О.В. Таровик, канд. техн. наук, ООО «Бюро Гиперборея», Санкт-Петербург,
e-mail: oleg.tarovik@bureauhyperborea.ru

В статье представлена расчетная зависимость для оценки безопасной дистанции ледокольной проводки судов с винторулевыми колонками (ВРК). Зависимость получена в результате упрощенной трактовки процессов, происходящих при торможении судна во льдах. Ледовое сопротивление судна в канале за ледоколом рассчитывается с помощью эмпирических формул, в которые входят основные проектные параметры, такие как тяга на швартовном режиме, максимальная скорость на чистой воде и другие. Выполнен анализ влияния различных факторов на расчетную дистанцию останова. Предложенная зависимость верифицирована на основе данных модельного эксперимента по останову газовоза типа Ямалмакс в канале за ледоколом Лидер во льдах толщиной 1,5 м. Помимо этого выполнено сопоставление результатов расчетов по предлагаемой зависимости с натурными дистанциями проводки газовоза «Кристоф де Маржери» в ходе транзитного рейса по Северному морскому пути (СМП) в феврале 2021 года. Показано, что средняя дистанция проводки в ходе реальной эксплуатации во льдах оказывается существенно выше расчетной безопасной дистанции во льдах и больше соответствует безопасной дистанции в условиях чистой воды.

Ключевые слова: *ледокольная проводка, дистанция до ледокола, безопасная дистанция, инерция судна, движение в канале*

SAFE DISTANCE FOR ICEBREAKER ESCORTING OF SHIPS WITH PODDED PROPULSORS

O.V. Tarovik, PhD, LLC Bureau Hyperborea, St. Petersburg, e-mail: oleg.tarovik@bureauhyperborea.ru

The article presents a formula to estimate a safe distance for icebreaker escorting of ships with azimuth thrusters. The formula has been obtained using a simplified representation of the processes that occur during ship stopping in ice. Ice resistance of a ship in the channel behind the icebreaker has been calculated using empirical formulae that include the main design parameters of a ship, such as bollard pull, maximum speed in open water, and others. The article also contains an analysis of the influence of various factors on safe distance. The formula has been verified by the model experiment on the stopping of Yamalmax-type LNG carrier in the channel behind the Leader-type icebreaker in 1,5 m thick ice. In addition, the calculation results were compared the full-scale distances between the Christophe de Margerie LNG-carrier and leading icebreaker during a transit voyage along the Northern Sea Route in February 2021. Average full-scale distances have been found to be significantly higher than calculated safe distance, and more corresponding to safe distance in open water conditions.

Keywords: *icebreaker assistance, distance to icebreaker, safe distance, ship inertia, operation in channel*

ВВЕДЕНИЕ

Увеличение интенсивности работы судов в Арктике и появление судов новых типов делают актуальными вопросы дальнейшего развития методов оценки безопасной дистанции проводки судов ледоколами. Особенно это относится к судам с винторулевыми колонками (ВРК). Соответствующие методы необходимы не только для регламентации работы судов и создания ледовых сертификатов, но также и для выполнения расчетных оценок скорости движения судов в караване, которые зачастую невозможны без знания дистанции между судном и ледоколом.

Можно выделить два различных подхода для оценки дистанции проводки судов во льдах.

Первый подход характерен для отечественной практики, а его основные особенности были представлены еще в работе [1, с. 173]. В рамках этого подхода оценка безопасной дистанции выполняется путем решения одномерного дифференциального уравнения движения судна в канале за ледоколом. При этом учитывается инерция судна, сила ледового сопротивления, а также тормозящая сила тяги движителей. Такая постановка опирается на физическую картину, согласно которой лидирующий ледокол совершает условно-мгновенную остановку, а идущее за ним судно должно успеть остановиться, не совершив навала.

На основе подхода [1] были разработаны методические рекомендации [2], в которых приведены решения дифференциального уравнения движения для трех случаев: выбег судна при останове без реверсирования движителей; разгон во льдах; остановка судна с реверсированием движителей.

В работе [3] внесено дополнение в постановку [1], касающееся учета гидродинамического сопротивления, а также представлена иная форма записи дифференциального уравнения. Сопротивление чистой воды рассматривается как сопротивление трения без учета волновой составляющей, которой в ледовых условиях можно пренебречь.

Второй подход представлен в современных зарубежных исследованиях, в которых рассмотрение вопроса безопасной дистанции движения во льдах производится с позиций анализа рисков. Большая часть работ выполнена применительно к условиям Балтийского моря, в котором, однако, ледовые и навигационные условия существенно отличаются от арктических.

В частности, в работе [4] предложена модель сопровождения судна ледоколом, основанная на сходстве этого процесса с движением потока автомобилей. Безопасная дистанция определяется с учетом динамики торможения ледокола, времени реакции судоводителя, а также влияния льда на параметры движения.

В работе [5] эти принципы применяются для анализа движения каравана из нескольких судов, а также приводится соответствующая динамическая модель и выполняется ее сопоставление с натурными данными. В работе [6] похожий подход применен для получения оценок вероятности столкновения судна с ледоколом при проводке, где в качестве регламентирующей безопасную дистанцию принимается вероятность столкновения 2×10^{-4}.

Сравнивая два указанных выше подхода, можно сказать, что для оценки безопасной дистанции в арктических условиях более оправданным представляется применение сценария условно-мгновенной остановки ледокола, для которого характерны большие значения безопасной дистанции.

Действительно, на Балтике соотношение ледопроходимости ледоколов и средней толщины льда является, в целом, более благоприятным, чем в Арктике, а судоходство характеризуется более высокой интенсивностью и наличием стандартных трасс, на которых вероятность условно-мгновенной остановки ледокола невелика. В Арктике же вероятность такого сценария повышается, что говорит о возможности использования его в качестве регламентационного.

Получаемые на основе подхода [1] результаты сильно зависят от расчетных сценариев, принятых при определении ледового сопротивления, а также от применяемых расчетных методов. В частности, при определении ледового сопротивления может рассматриваться симметричное движение в канале за ледоколом с доламыванием или без доламывания кромок, асимметричное движение в канале с доламыванием кромок, движение в мелкобитом льду и т.п. Для оценки сопротивления могут использоваться полуэмпирические расчетные соотношения, или же экспериментальный подход [7].

Однако в целом можно сказать, что существующие полуэмпирические формулы не гарантируют достаточной точности оценки сопротивления в канале за ледоколом. По этой причине ледовое сопротивление можно назвать существенным источником неопределенности, т.к. от его величины напрямую зависят получаемые оценки безопасной дистанции проводки судна во льдах. Эта неопределенность позволяет предложить упрощенный способ оценки безопасной дистанции, не требующий решения дифференциальных уравнений. Получаемая при этом погрешность не должна быть значительной.

В настоящей работе представлена модель для определения дистанции проводки судна во льдах, которая основывается на законе сохранения энергии и упрощенной трактовке динамических процессов, происходящих при торможении судна в ледовых условиях.

1. ДИСТАНЦИЯ ОСТАНОВА СУДНА ВО ЛЬДАХ

1.1 Применение энергетического метода для дистанции останова

Для получения зависимости, связывающей скорость движения судна с дистанцией останова, примем допущение о том, что кинетическая энергия судна E_k должна быть погашена за счет работы сил ледового сопротивления R_i, сопротивления чистой воды R_{ow} и тяги движительного комплекса T_p.

$$E_k = A_i + A_{ow} + A_p, \tag{1}$$

где A_i, A_{ow} и A_p — работы сил R_i, R_{ow} и T_p соответственно.

Кинетическая энергия судна определяется как

$$E_k = \frac{1}{2}\Delta(1 + k_{11})v_0^2, \tag{2}$$

где Δ — массовое водоизмещение судна,
$k_{11} = (0{,}651B/L - 0{,}039)2d/B$ — коэффициент присоединенной массы воды и при поступательном движении согласно [8, стр. 41],
L, B, d — длина, ширина и осадка судна по ватерлинии, соответственно,
v_0 — начальная скорость движения судна.

Для определения работы сил, гасящих кинетическую энергию судна, примем, что скорость v линейно изменяется в зависимости от пути l, пройденного во время останова.

Это допущение является существенным и сильно влияет на дальнейшие результаты. С одной стороны, очевидно, что скорость не будет изменяться линейно. С другой — имеющиеся скудные натурные данные говорят о том, что допущение о линейном характере изменения скорости не является неприемлемым.

В частности, в [1, с. 107] приведена зависимость скорости ледокола от выбега при торможении, которую можно с приемлемой точностью аппроксимировать линейной функцией. Поэтому ввиду приближенности настоящей расчетной модели можно принять допущение о том, что скорость линейно изменяется в зависимости от дистанции (см. рис. 1*а*):

$$v(l) = v_0(1 - l/L), \tag{3}$$

где L — дистанция до останова судна во льдах, измеряемая от носа судна до кормы впередиидущего ледокола.

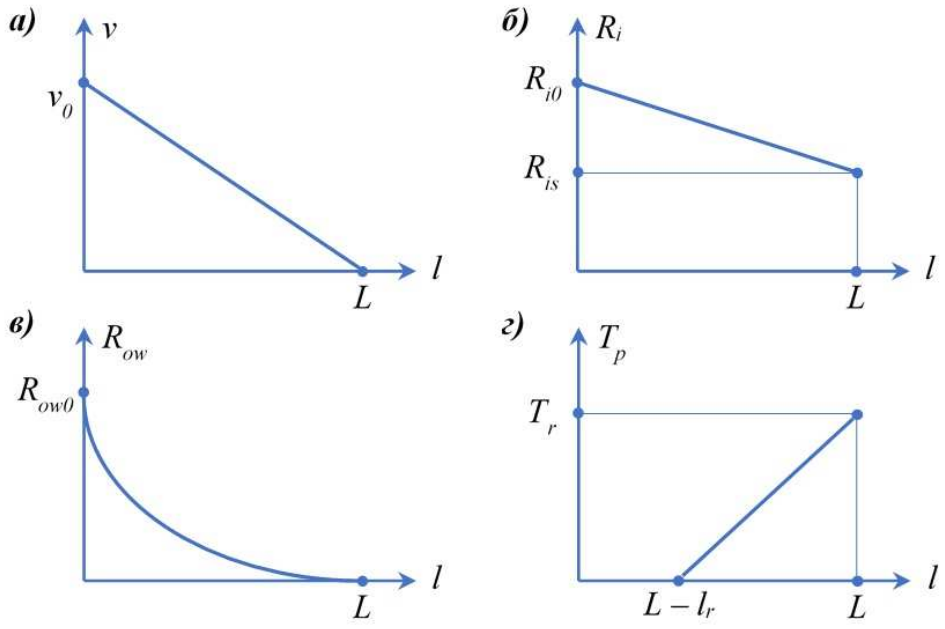


Рис. 1 Принятые допущения об изменении параметров движения в зависимости от дистанции:
а) скорость судна; *б)* ледовое сопротивление; *в)* сопротивление на чистой воде; *г)* тяга движительного комплекса

С допустимой на практике погрешностью можно полагать [9], что если скорость хода не превышает 8 — 10 узлов, то ледовое сопротивление R_i во льдах практически всех типов линейно зависит от скорости. Анализ скоростных режимов движения современных судов в Арктике [10] свидетельствует о том, что в зимние месяцы средние скорости составляют порядка 6 — 10 узлов, редко превышая при этом значение в 12 — 14 узлов. Поэтому допущение о линейном характере изменения ледового сопротивления можно считать приемлемым для решения практических задач.

Полагая линейной зависимость скорости от пройденного пути и учитывая линейный характер изменения сопротивления получим, что и зависимость R_i (l) также будет линейной (см. рис. 1*б*). При этом необходимо учитывать, что существует статическое ледовое сопротивление R_{is}, которое при нулевой скорости не равно нулю.

Представим статическое сопротивление в долях от сопротивления R_{i0} на начальной скорости

$$R_{is} = R_{i0}\, k_i, \tag{4}$$

где R_{i0} — начальное ледовое сопротивление на скорости v_0;
k_i — коэффициент, показывающий долю статического сопротивления в общем ледовом сопротивлении.

Зависимости для оценки коэффициента k_i приведены далее.

Основываясь на этих допущениях, работу сил ледового сопротивления A_i можно оценить как

$$A_i = \frac{1}{2}(1 + k_i)\; R_{i0} L. \tag{5}$$

Работу сил сопротивления от чистой воды A_{ow} вычислим, полагая, что сопротивление R_{ow} пропорционально квадрату скорости

$$R_{ow} = R_{ow0}\; (v/v_0)^2, \tag{6}$$

где R_{ow0} — сила сопротивления на чистой воде, соответствующая скорости v_0.

Тогда, подставляя (3) в (6) получим зависимость R_{ow} от выбега судна (см. рис. 1*в*). Интегрируя полученное выражение по dl на интервале от 0 до L, а также умножив результат на дистанцию выбега L, получим

$$A_{ow} = \frac{1}{3} R_{ow0} L. \tag{7}$$

Работу силы тяги движительного комплекса определим с учетом двух факторов.

Первым фактором является сниженное значение тяги ВРК по сравнению с максимальной тягой на швартовном режиме.

Тяга тянущих ВРК, развернутых на 180°, на полной мощности составляет порядка 85 — 95 % от тяги на переднем ходу. Кроме того, необходимо учитывать, что на стандартном эксплуатационном режиме движения судоводители обычно используют около 40 — 70 % мощности пропульсивного комплекса и не могут мгновенно увеличить это значение до 100 %, поскольку часть дизель-генераторов может находиться в холодном резерве. Поэтому, основываясь на принципе консервативности оценок, будем полагать, что при выполнении маневра останова судоводитель располагает лишь 40 % мощности на валах.

Согласно данным [9] тягу движительного комплекса можно полагать пропорциональной мощности на валах в степени $^2/_3$. Тогда значение максимальной тяги заднего хода T_r составит:

$$T_r = k'_p T_{bp} = (0{,}9 \cdot 0{,}4^{2/3}) T_{bp} \approx 0{,}5 T_{bp}, \tag{8}$$

где T_{bp} — тяга на швартовном режиме на переднем ходу при 100 % мощности;
$k'_p = 0{,}5$ — коэффициент доступной тяги при движении задним ходом.

Вторым фактором является то, что при реверсировании ледовых ВРК их необходимо развернуть.

Отдельным вопросом является возможность разворота ВРК при движении во льдах со скоростями около 8 — 10 уз, поскольку, будучи развернутыми поперек набегающего потока, содержащего фрагменты льда, колонки могут получить повреждения. Тем не менее, такие сценарии в последнее время рассматриваются при регламентации прочности ВРК [11], поэтому будем считать, что эта процедура возможна на любой скорости хода судна.

Угловая скорость поворота ВРК согласно [12] составляет от 5 до 7,5 град/с. В работе [7] приведена оценка скорости поворота колонок Azipod VI на уровне 2,5 град/с при условии использования для этого не всех приводов. Исходя из принципа консервативности оценок примем скорость поворота ВРК на уровне 2,5 град/с,

что соответствует длительности разворота около 70 с. Поскольку согласно рис. 1*а* движение судна является равнозамедленным, то на основе простейшей кинематики точки можно показать, что путь l_r, проходимый за время разворота колонок t_r, составит

$$l_r = \frac{1}{2} v_0 t_r. \quad (9)$$

После завершения поворота колонок судоводитель не может мгновенно дать полную тягу заднего хода, т.к. режим работы винта в обратном потоке на скоростях 8 — 10 узлов связан с риском повреждения лопастей. Кроме того, в системе электродвижения может сработать защита от перегрузки из-за резкого повышения крутящего момента. Поэтому при выполнении приближенной оценки будем полагать, что сразу после разворота ВРК судоводитель линейно повышает тягу заднего хода от нуля до значения T_r, достигаемого в момент остановки судна.

Принимаемая схема изменения тяги движителей показана на рис. 1*г*. Опираясь на очевидные геометрические соотношения, показанные на этом рисунке, получим зависимость для оценки работы сил тяги:

$$A_p = \frac{1}{2} T_r (L - l_r) = \frac{1}{2} k'_p T_{bp} (L - \frac{1}{2} v_0 t_r). \quad (10)$$

1.2 Общая формула для оценки дистанции останова

Подставляя выражения (2), (5), (7) и (10) в зависимость (1) и выразив L, получим формулу для определения дистанции останова:

$$L = \frac{\Delta(1 + k_{11}) v_0^2 + k_p T_{bp} v_0 t_r}{(1 + k_i) R_{i0} + 2/3 R_{ow0} + 2 k_p T_{bp})}, \quad (11)$$

где $k_p = k'_p/2 = 0{,}25$ — коэффициент эффективности использования тяги при экстренном реверсе.

На результаты расчетов по зависимости (11) сильно влияет значение коэффициента k_p, которое в рамках принятых допущений может изменяться в диапазоне от 0 до 0,5. Верхняя граница этого диапазона ($k_p = 0{,}5$) соответствует случаю единомоментной подачи полной тяги заднего хода в момент времени t_r, т.е. очень быстрому набору оборотов. Нижняя граница диапазона ($k_p = 0$) относится к случаю останова судна без привлечения движителей. Значение $k_p = 0{,}25$ соответствует нулевой начальной тяге во время t_r и дальнейшему линейному набору оборотов. Очевидно, что реальное значение k_p сильно зависит от технических особенностей системы электродвижения конкретного судна и стиля управления.

Принятое в настоящей работе значение $k_p = 0{,}25$ является, в целом, умеренно-оптимистичной оценкой. Меньшие значения этого коэффициента возможны, например, в случае если из-за высокой начальной скорости хода разворот ВРК начинается не сразу, а только после естественного снижения скорости до 8 — 10 уз. Возможны также значения k_p более 0,5, что соответствует, например, случаю быстрой подачи на валы мощности более 40 %. Помимо этого на значение k_p оказывает влияние факт того, сможет ли судно развить полную тягу заднего хода до момента полной остановки.

Вариации коэффициента k_p в диапазоне от 0 до 0,5 приводят к изменению дистанции останова соответственно на +50 %...–25 % по сравнению с принятым значением $k_p = 0{,}25$. Таким образом можно сказать, что дистанция останова во льдах без привлечения движителей ($k_p = 0$) ориентировочно на 30 — 50 % превышает дистанцию при принятом сценарии использовании тяги.

Следует также отметить, что основным отличием зависимости (11) от методического подхода, изложенного в [1] и [2], является учет сопротивления тихой воды, а также особенностей реверса ВРК. В частности, в [1] и [2] полагается, что тяга заднего хода реализуется единомоментно, что не полностью соответствует картине работы судов с ВРК.

Основными неизвестными составляющими зависимости (11) являются ледовое сопротивление R_{i0} и коэффициент k_i. Их определению посвящен следующий раздел.

2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЛЕДОВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРИ ЛЕДОКОЛЬНОЙ ПРОВОДКЕ

2.1 Оценка сопротивления с помощью эмпирических моделей

Как было отмечено выше, оценка ледового сопротивления может выполняться с использованием различных полуэмпирических формул и разных сценариев движения судна.

Известно, что существующие расчетные соотношения для определения ледового сопротивления в некоторых случаях могут давать оценки с высокой погрешностью. Кроме того, для некоторых расчетных сценариев, таких как движение в канале с доламыванием кромок, полуэмпирические зависимости носят еще более приближенный характер. По этой причине при определении безопасной дистанции предлагается использовать подход, основанный на эмпирических моделях, которые напрямую связаны с характеристиками рассматриваемого судна, определяющими его ходовые качества во льдах.

К таким характеристикам относятся ледопроходимость, тяга на швартовном режиме, максимальная скорость на чистой воде и другие. Если оценка сопротивления опирается на эти величины, то это должно позволить получать наиболее устойчивые оценки, не зависящие от точности полуэмпирических формул для расчета ледового сопротивления. В соответствии с этой идеей для рассматриваемой задачи предлагается следующий подход.

Максимально достижимая скорость v_m при движении судна во льдах в караване за ледоколом может быть определена на основе эмпирической формулы [13], имеющей вид:

$$v_m = v_{ow}(1 - k_{ch} \cdot h/h_{lim}(v_{ow} - v_{lim})/v_{ow}), \quad (12)$$

где h — толщина льда в районе движения каравана;
h_{lim} — предельная ледопроходимость проводимого судна;
v_{ow} — максимальная скорость хода судна на чистой воде;
v_{lim} — скорость, соответствующая предельной ледопроходимости h_{lim} (обычно v_{lim} равняется 2 уз или 1,03 м/с);
k_{ch} — коэффициент, учитывающий соотношение ширины судна и ледокола:

$$k_{ch} = \begin{cases} 0{,}116 + 0{,}278b^{2{,}29}, & \text{при } b < 1{,}0 \\ 0{,}390 + 0{,}523(b-1), & \text{при } 1{,}0 \leqslant b < 1{,}4; \\ 1{,}0 - 0{,}56/b, & \text{при } b \geqslant 1{,}4 \end{cases}$$

$b = B_s/B_{ib}$ — относительная ширина судна;
B_s — ширина судна, следующего за ледоколом;
B_{ib} — ширина ледокола.

Как видно, скорость хода судна в канале за ледоколом зависит от отношения толщины льда к ледопроходимости судна (h/h_{lim}), а также от относительной ширины судна b. Согласно комментариям, данным в работе [13], случай $b = 0$ соответствует движению в мелкобитом сплоченном льду, при $b = 1$ судно движется в собственном канале, а случай $b \to \infty$ соответствует движению по ненарушенному припаю. Учитывая опыт использования зависимости (12), значение b стоит принимать не менее 0,1.

Зная максимально достижимую скорость движения судна в канале за ледоколом, можно оценить соответствующую этому режиму тягу на гаке T_p, которая согласно [1] будет равна ледовому сопротивлению судна на скорости v_m. Для оценки значения T_p можно использовать известную приближенную зависимость из [1], которая представляет тягу на гаке как функцию от текущей скорости хода v:

$$T_p(v) = T_{bp}(1 - (1 - \beta)v/v_m - \beta \cdot (v/v_m)^2), \quad (13)$$

где β — эмпирический коэффициент, принимаемый по данным [1] в диапазоне $\beta = 0{,}53$ — $0{,}67$, а по данным [14] равный $\beta = 0{,}66$.

Тогда ледовое сопротивление R_{im}, соответствующее скорости v_m, будет определяться как:

$$R_{im} = T_p(v_m). \quad (14)$$

Схема зависимости тяги движительного комплекса T_p и ледового сопротивления R_i от скорости хода приведена на рис. 2.

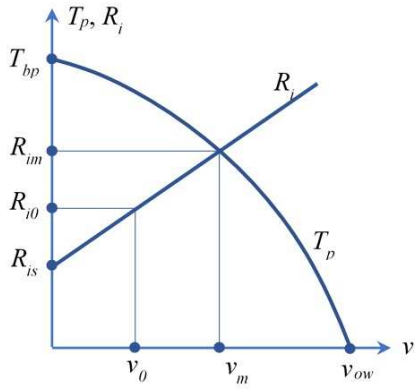


Рис. 2 Зависимости тяги на гаке T_p и ледового сопротивления R_i от скорости v

Зная значение R_{im}, на основе формулы (4) можно определить значение R_{is}, которое будет равно $R_{is} = R_{im}k_i$.

Значение расчетного ледового сопротивления R_{i0} на скорости v_0 может быть получено на основе зависимости, которая следует из рис. 2:

$$R_{i0} = (R_{im} - R_{is})v_0/v_m + R_{is}. \quad (15)$$

Отметим, что целью построений, приведенных на рис. 2 и выраженных формулами (12) — (15), является только восстановление зависимости силы ледового сопротивления от скорости хода, которая используется в дальнейших расчетах. При этом соответствие мощности на валах, принятой при получении формулы (8), и фактической скорости хода судна в канале никак не анализируется.

2.2 Определение величины коэффициента k_i

Значение k_i зависит от множества факторов, среди которых: скорость судна, сплоченность льда, относительная ширина канала и др. Для оценки величины этого коэффициента были выполнены специальные исследования.

Вначале производились вычислительные эксперименты по определению ледового сопротивления в сплошных ровных льдах на основе методов К. Риски [14] и Г. Линдквиста [15], которые часто используются для решения практических задач. Значение коэффициента k_i в ходе этих расчетов определялось по соотношению (4). Для анализа были использованы характеристики современных судов ледового плавания типа «Кристоф де Маржери», «Штурман Альбанов», «Норильский Никель» и «Василий Динков». Толщина льда варьировалась в диапазоне от 0,5 м до 2,0 м с шагом 0,5 м, а скорость судна соответствовала числам Фруда от 0 до 0,21 с шагом 0,03.

В результате этих численных экспериментов было установлено, что на значение коэффициента k_i практически не влияют особенности обводов корпуса судна и толщина льда. Кроме того, два различных полуэмпирических метода дали в целом близкие результаты.

Наибольшее влияние оказывает число Фруда, определяемое как:

$$Fr = v/\sqrt{gL_{wl}}, \quad (16)$$

где L_{wl} — длина судна по ватерлинии.

При $Fr = 0{,}03$ значения k_i составляют около 0,8, а при $Fr = 0{,}18$ снижаются до ориентировочно 0,4. Результаты экспериментов показаны на рис. 3 как случай $b \to \infty$ при общей сплоченности льда $C = 100$ %.

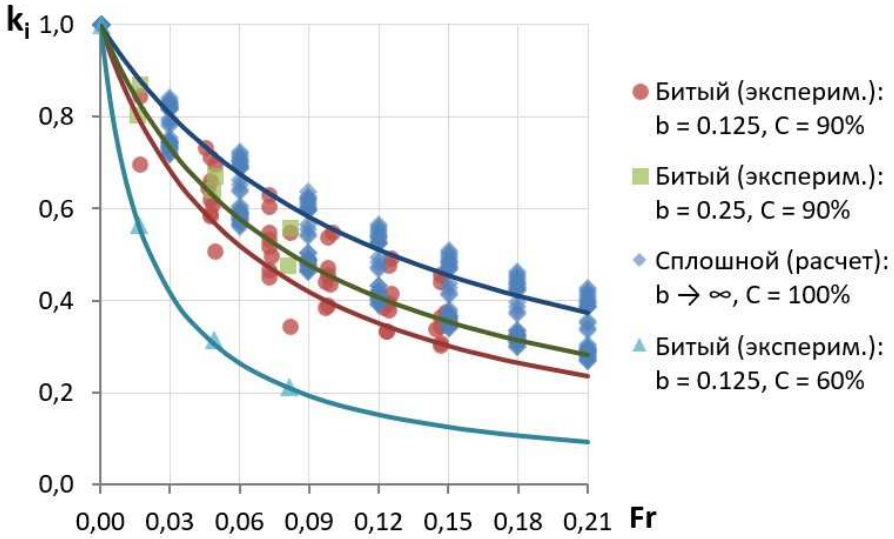


Рис. 3 Зависимость коэффициента k_i от числа Фруда Fr, относительной ширины канала b и общей сплоченности льда C

При движении судна в битых льдах значения k_i, очевидно, будут отличаться, причем в меньшую сторону, поскольку статическая составляющая сопротивления в таком льду должна быть меньше. Однако физичных полуэмпирических методов прогнозирования сопротивления судов в битом льду в настоящий момент не существует. Например, формула А.Я. Рывлина [1] дает значения k_i в районе 0,8 — 0,9 даже при числах Фруда около 0,21. Это связано с большой статической составляющей сопротивления в этом методе.

Поэтому для выполнения настоящего анализа были использованы представительные серии модельных испытаний движения судов во льдах, приведенные в работах [16] и [17]. В статье [16] выполнены модельные испытания серии рыболовных судов в битом льду сплоченностью $C = 90$ % при $b = 0{,}125$ (определяется исходя из соотношения ширины модели и ширины ледового бассейна). В работе [17] модельные испытания выполнены для исследовательского судна «Araon» при сплоченностях льда $C = 90$ % и 60 %, а также при $b = 0{,}125$ и 0,25.

Результаты расчета значений k_i на основе этих данных также приведены на рис. 3. Интересно отметить, что значения коэффициентов k_i при $b = 0{,}125$ и $C = 90$ % по данным двух разных работ имеют близкие значения. Влияние толщины льда в случае битого льда оказалось сопоставимо со случаем сплошного льда, поэтому в силу приближенноости настоящей методики фактором толщины можно пренебречь.

Влияние сплоченности льда C оказалось существенным. При сплоченности 60 % значения k_i резко снижаются по сравнению со сплоченностью 90 — 100 %, что в целом соответствует имеющимся представлениям о характере изменения ледового сопротивления в зависимости от этого параметра [1].

На основе приведенных данных была получена приближенная зависимость для определения k_i в функции от числа Фруда Fr, относительной ширины канала b и общей сплоченности льда C. Зависимость имеет вид:

$$k_i = \frac{1}{[0{,}8/b + 315(1-C)^{2{,}5} + 8]Fr + 1}, \qquad (17)$$

где C — сплоченность в долях от единицы.

В формуле (17) при $b > 10$ необходимо принимать $b = 10$.

Расчетные значения k_i показаны на рис. 3 в виде линий, а данные модельного и вычислительного экспериментов — в виде точек.

3. АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДИСТАНЦИИ ОСТАНОВА СУДНА

Расчетное значение дистанции останова в рамках предлагаемого подхода определяется по следующему алгоритму.

1. На основе зависимости (12) определяется расчетная максимальная скорость v_m движения судна во льду заданной толщины и в канале за выбранным ледоколом.

2. С помощью формул (13) и (14) определяется значение соответствующего ледового сопротивления $R_{im} = T_p(v_m)$.

3. Определяется число Фруда Fr_m на скорости v_m, равное $Fr_m = v_m\sqrt{gL_{wl}}$, и по формуле (17) рассчитывается коэффициент k_{im}, соответствующий числу Fr_m.

4. Определяется статическое ледовое сопротивление, равное $R_{is} = R_{im}k_{im}$.

5. Определяется число Фруда Fr_m на скорости v_0, равное $Fr_0 = v_0/\sqrt{gL_{wl}}$, и рассчитывается коэффициент k_{i0}, соответствующий числу Fr_0. Необходимость этого шага связана с тем, что значение k_i зависит от скорости и будет разным для максимально достижимой скорости v_m и заданной скорости v_0.

6. На основе зависимости (15) определяется ледовое сопротивление R_{iv} на скорости v_0.

7. С помощью зависимости (11) и на основе значений R_{i0} и k_{i0} определяется дистанция останова L.

4. БЕЗОПАСНАЯ ДИСТАНЦИЯ ПРОВОДКИ

Дистанция останова не может выполнять роль безопасной дистанции, поскольку не учитывает время реакции судоводителя, которое необходимо для начала маневра останова, а также минимальную дистанцию между судном и ледоколом. С учетом этих составляющих безопасная дистанция L_s определится в виде:

$$L_s = L + v_0 t_a + L_{\min}, \qquad (17)$$

где t_a — время реакции судоводителя;
$L_{\min}$ — дистанция безопасного останова судна.

Безопасная дистанция представляет собой расстояние от носа судна до кормы впередиидущего ледокола.

Время реакции t_a включает как собственно реакцию судоводителя, так и длительность различных технологических операций, необходимых для начала реверсирования движителей. Соответствующие оценки для судов с электродвижением и ВРК автору найти не удалось. Но существуют оценки для судов с дизельными энергетическими установками (ЭУ).

В [4] приведены значения t_a, полученные по данным проводок грузовых судов с дизельными энергетическими установками ледоколами Fennica и Voima в период с 19.02 по 18.03.2011 года в Балтийском море. Время реакции согласно [4] описывается нормальным законом распределения, среднее значение составляет 84 с, а стандартное отклонение — 36 с.

Важно отметить, что эта оценка включает в себя также и длительную процедуру реверсирования дизельного двигателя, имеющего прямую передачу на винт. При этом в [1] указывается, что для судов с дизельными ЭУ время реверса, не учитывающее реакцию судоводителя, составляет от 60 до 110 с, что практически полностью соответствует данным [4], однако не учитывает при этом длительность реакции судоводителя. Это может говорить о том, что время реакции судоводителя очень незначительно. Основываясь на принципах консервативности оценок будем полагать $t_a = 30$ с.

Это значение включает как человеческий фактор, так и плохие условия видимости в Арктике.

Дистанция безопасного останова судна может быть представлена в долях от длины судна по ватерлинии L_{wl}. Ориентируясь на общие принципы судовождения можно принять $L_{\min} = L_{wl}/2$.

Зависимость (11) позволяет выполнить оценки безопасной дистанции не только для судов с ВРК, но и для судов с традиционным движительным комплексом. Отличия между судами разных типов заключаются в значениях параметра t_r. Например, в [1] указывается, что время t_r у судов с электродвижением и традиционными валами составляет около 10 — 15 с. Поэтому можно принять:

- для судов с ВРК: $t_r = 70$ с;
- для судов с электродвижением и традиционными винтами: $t_r = 10$ с;
- для судов с дизельной ЭУ и прямой передачей на винты: $t_r = 100$ с.

Согласно этим допущениям, тормозной путь судов с традиционным движительным комплексом оказывается приблизительно на 8 — 10 % меньше, чем у судов с ВРК.

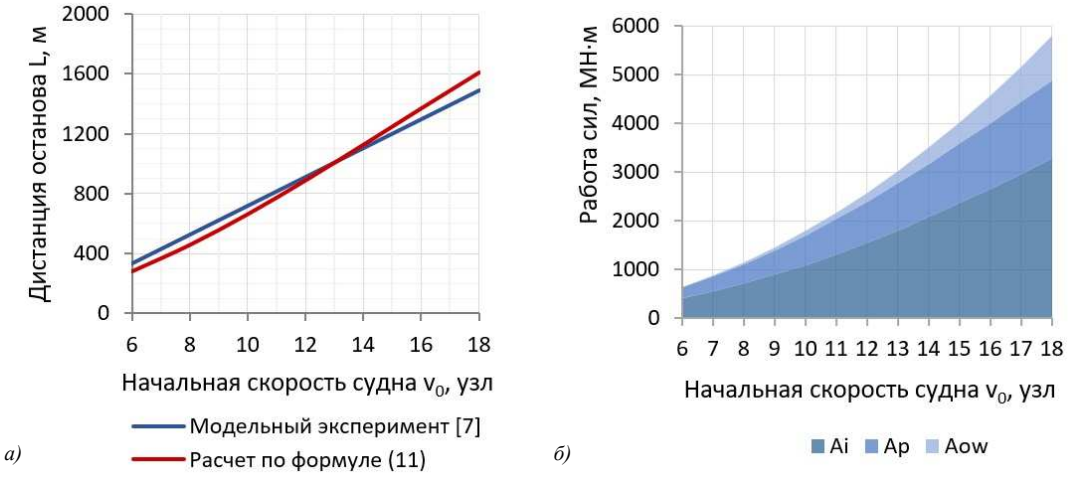
При выполнении расчетов по приведенным выше зависимостям водоизмещение судна задается в тоннах, силы — в [кН], время — в [секундах], линейные размеры (толщины льда, дистанции и размерения судна) — в [метрах], скорости — в [м/с].

5. ВЕРИФИКАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ

5.1 Сопоставление с результатами модельного эксперимента

Анализ правдоподобности получаемых оценок безопасной дистанции может быть выполнен на основе нескольких источников, которые имеют отношение к газовозам типа «Кристоф де Маржери», оборудованным тремя ВРК.

В работе [7] приведены результаты модельных экспериментов, в которых рассматривался останов газовоза при движении в канале за ледоколом проекта 10510 «Лидер» при толщине ровного льда 1,5 м и при начальных скоростях хода от 6 до 19 уз. В ходе модельных экспериментов учитывалась не только механика движения судна в узком канале с доламыванием кромок, но также и разворот ВРК на 180°. Эти данные могут быть использованы для прямой верификации зависимости (11). Результаты такого сопоставления приведены на рис. 4*а*.



а) *б)*

Рис. 4 Изменение параметров останова судов типа «Кристоф де Маржери»
в канале за ледоколом проекта 10510 «Лидер» в зависимости от начальной скорости:
а) сопоставление результатов расчета и экспериментальных данных [7]; *б)* изменение работы сил различной природы

В расчетах тяга движительного комплекса судна типа «Кристоф де Маржери» принималась равной 5000 кН, максимальная скорость на тихой воде — 20,7 уз, ледопроходимость на переднем ходу — 1,7 м, водоизмещение — 130500 т, ширина проводящего ледокола — 46 м. Расчет ледового сопротивления выполнен по методике, приведенной в настоящей работе.

На рис. 4*а* наблюдается хорошее соответствие расчетных и экспериментальных данных. При скоростях хода 6 — 12 узлов расчетные значения находятся чуть ниже экспериментальных, а при более высоких скоростях расчетная кривая проходит выше экспериментальной. Это связано с тем, что в формулу (11) входит скорость в квадрате.

Иллюстрация изменения работы сил различной природы, определенных на основе зависимостей (5), (7) и (10), приведена на рис. 4*б*. Как видно, наибольший вклад в рассматриваемом расчетном случае вносит сила ледового сопротивления, работа которой составляет около 60 %. На тягу движителей приходится около 30 % общей работы, а оставшиеся 10 % занимают силы гидродинамического сопротивления. При изменении толщины льда соотношение работы различных сил существенно изменяется. Например, во льдах толщиной 0,5 м на A_i приходится 30 % общей работы, тогда как работа A_p занимает порядка 60 %.

5.2 Сравнение с натурными данными

Помимо сравнения расчетной и модельной дистанций останова газовоза необходимо также оценить, насколько получаемые результаты соответствуют практике реальной арктической навигации. Для выполнения такого анализа были использованы АИС-треки судна «Кристоф де Маржери» и ледокола «50 лет Победы», осуществлявшего его проводку в период с 07 по 19 февраля 2021 года. Караван двигался от Берингова пролива до входа в Обскую губу (см. рис. 5). Треки судна и ледокола включают порядка 3000 точек каждый, а средний временной шаг между АИС-отметками составляет около 6-7 мин.



Рис. 5 Траектория движения судна «Кристоф де Маржери» от Берингова пролива до входа в Обскую губу под проводкой ледокола «50 лет Победы» в период 07 — 19.02.2021

По данным двух треков была определена дистанция между судном и ледоколом, а также пеленг на ледокол, который показывает расположение судна относительно ледокола. При расчете дистанции учитывалось, что расстояние между передатчиками АИС представляет собой расстояние от ходового мостика судна, до ходового мостика ледокола, дистанция же между судами вычисляется как расстояние от носа судна до кормы впередиидущего ледокола. Поэтому дистанция, полученная на основе АИС была уменьшена на длину газовоза, умноженную на косинус угла пеленга.

Скорость судна вычислялась путем деления дистанции между двумя соседними АИС точками на длительность перехода между ними, т.е. рассматривалась именно средняя скорость между точками. Пеленг с судна на ледокол определялся без учета ориентации на левый и правый борт. Значение 0 соответствует «прямо по курсу», значение 180 — «за кормой», а значение 90 — «на траверзе» (без уточнения борта). При дальнейшем сопоставлении учитывались только точки, в которых пеленг на ледокол не превышал 10°, т.е. судно следовало строго в канале за ледоколом.

Временные ряды изменения дистанции, скорости хода судна и пеленга показаны на рис. 6, а относительные частоты этих параметров — на рис. 7. Средняя дистанция проводки составила 2450 м, средняя скорость судна — 8,6 уз, а в 80 % случаев пеленг на ледокол не превышал 10°.

Согласно ледовым картам, доступным на портале ААНИИ, ледовые условия на маршруте существенно изменялись, однако сплоченность льда практически везде составляла 100 %. В регионе движения наблюдался в основном однолетний тонкий лед, торосистость составляла 2-3 балла, разрушенность 0 баллов, также на трассе очевидно присутствовали ледовые сжатия. Опираясь на эти данные, средняя эквивалентная толщина льда была оценена в 1,0 м. На основе этого значения была построена зависимость безопасной дистанции от скорости хода и выполнено ее сопоставление с натурными значениями.

Для этого были построены три расчетные зависимости безопасной дистанции от скорости хода, описывающие следующие сценарии: останов во льдах при реверсировании движителей ($k_p = 0{,}25$), останов во льдах без реверсирования движителей ($k_p = 0$), а также останов на чистой воде с реверсированием ВРК при $k_p = 0{,}25$. Последний случай соответствует нулевой толщине льда и нулевому ледовому сопротивлению. Все упомянутые данные приведены на рис. 8.

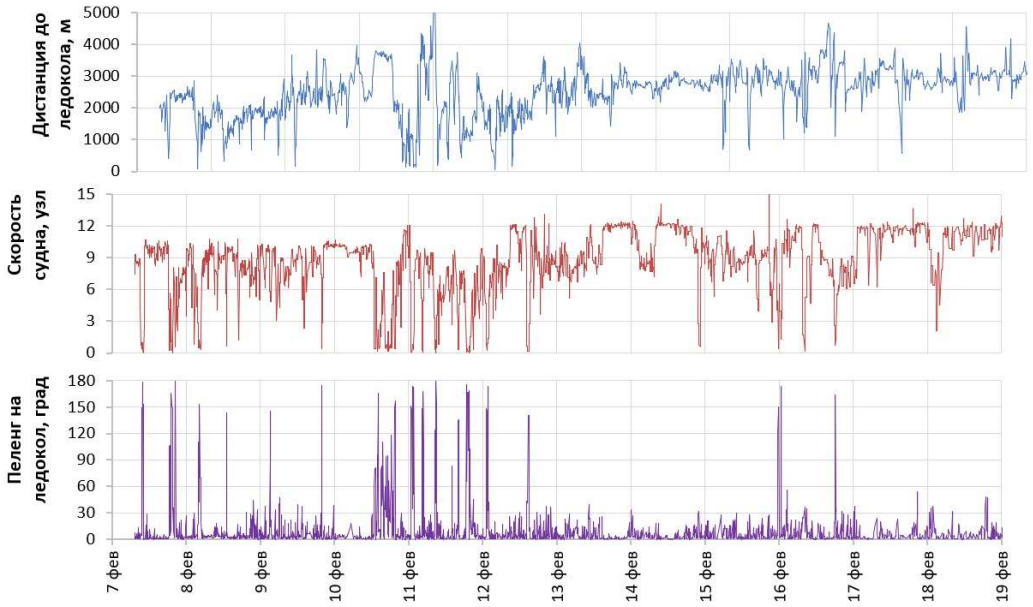


Рис. 6 Временные ряды изменения дистанции до ледокола, скорости хода судна и пеленга на ледокол в ходе рейса 07 — 19.02.2021

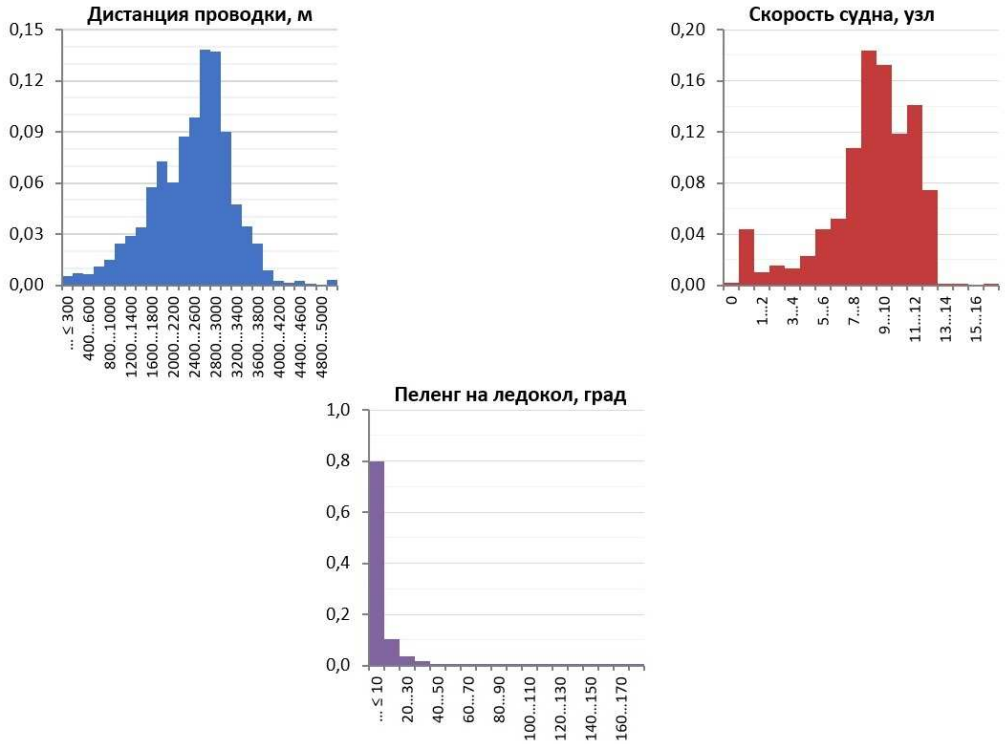


Рис. 7 Относительные частоты дистанции проводки, скорости судна и пеленга на ледокол в ходе рейса 07 — 19.02.2021

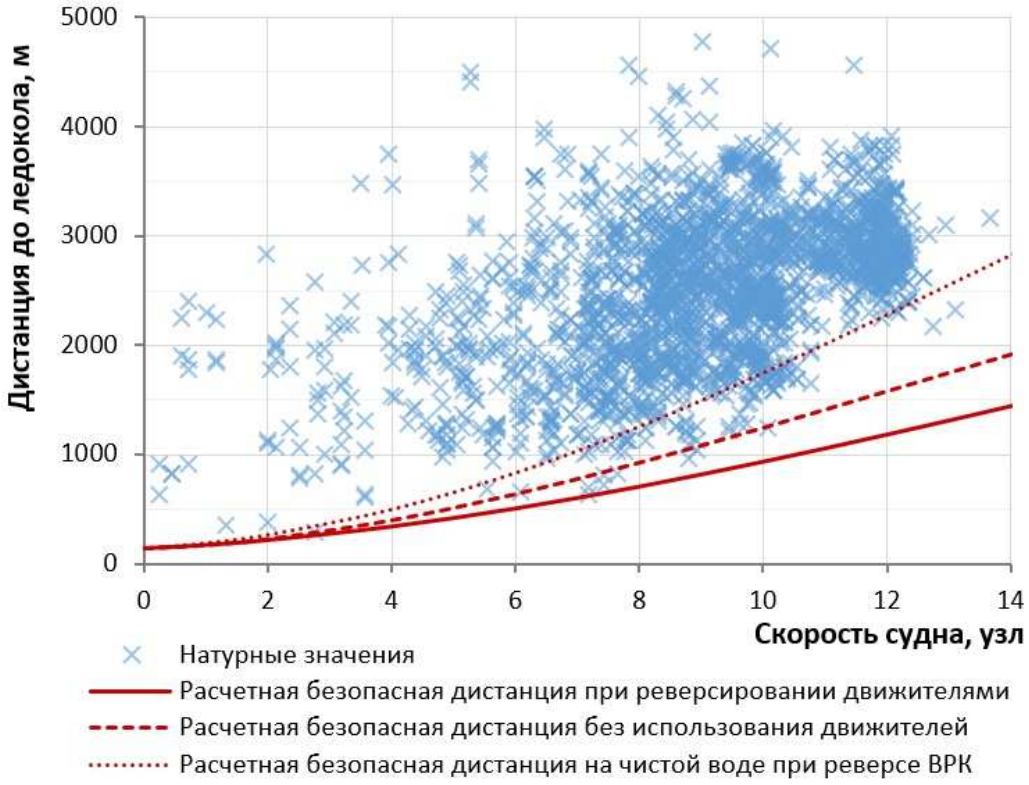


Рис. 8 Сопоставление фактических (точки) и расчетных минимальных (линии) дистанций проводки судна «Кристоф де Маржери» ледоколом «50 лет Победы»

Как видно, зависимость фактических дистанций от скорости хода судна характеризуется наличием некоего подобия Парето-фронта. Он достаточно хорошо соответствует кривым безопасных дистанций во льдах при скоростях менее 10 уз. Касание безопасной кривой, соответствующей случаю движения во льдах и реверсированию движителей, происходит только в некоторых точках. При этом, однако, отсутствуют натурные точки, расположенные существенно ниже этой кривой, что говорит о возможности использования представленного подхода в регламентационных целях.

Минимальная натурная дистанция проводки при скоростях около 12 уз существенно превышает расчетную минимальную и хорошо соответствует безопасной дистанции при движении по чистой воде. При скорости 12 уз фактическая дистанция проводки не сокращалась менее 2300 м, что хорошо соответствует расчетной оценке для случая чистой воды при реверсировании движителей, составляющей 2280 м.

При этом расчетная безопасная дистанция во льдах составляет 1190 м для случая использования движителей и 1580 м без их использования. Это говорит о том, что на относительно высоких скоростях хода судоводитель в целом иначе чувствует «безопасную» дистанцию во льдах, чем это подразумевает расчетная модель. Возможной причиной этого может являться, например, периодическое следование каравана по разрывам сплошности ледяного покрова, которые не отмечаются на ледовых картах. В этой ситуации судно может резко выйти на участок чистой воды, что косвенно учитывается судоводителем при выборе дистанции проводки.

Если рассматривать рис. 8 в целом, то можно отметить, что среднее значение фактической дистанции проводки ориентировочно на 1,0 … 1,5 км превышает расчетные безопасные дистанции, полученные как при $k_p = 0{,}25$, так и при $k_p = 0$.

Таким образом, по результатам верификации представленной модели можно сказать, что она достаточно хорошо соответствует имеющимся экспериментальным данным. Сравнение расчетных и фактических дистанций говорит о том, что средняя дистанция проводки в ходе реальной эксплуатации во льдах оказывается существенно выше расчетной и больше соответствует безопасной дистанции в условиях чистой воды.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлена новая модель для оценки безопасной дистанции ледокольной проводки судов, которая основывается на законе сохранения энергии и упрощенной трактовке процессов, происходящих при торможении судна во льдах. При создании модели был принят ряд существенных допущений, которые не в полной мере соответствуют реальной физической картине описываемого процесса.

Это, однако, представляется допустимым, поскольку определение безопасной дистанции на основе более точных подходов также подвержено действию факторов неопределенности, сильно влияющих на результат. К таким факторам относятся, в первую очередь, сила ледового сопротивления, особенности работы ВРК при реверсировании, а также субъективный характер действий судоводителя.

В предлагаемой модели ледовое сопротивление рассчитывается на основе эмпирических моделей, в которые входят основные проектные параметры судна, такие как тяга на швартовном режиме, максимальная скорость на чистой воде и другие. Это должно позволить избежать существенных ошибок в оценке ледового сопротивления, возникающих при использовании полуэмпирических зависимостей, в особенности — в случае движения судна с доламыванием кромок канала.

Представленная модель оказалась очень чувствительна к параметрам, характеризующим работу движительного комплекса при реверсировании движителей. Это требует дополнительных натурных исследований, которые позволят установить реальные эксплуатационные ограничения современных систем электродвижения судов ледового плавания, оборудованных ВРК.

Верификация полученной зависимости показала хорошее соответствие получаемых результатов и имеющихся экспериментальных данных. Сопоставление результатов расчетов с ограниченным количеством натурных данных также показало, что расчетные и фактические минимальные дистанции достаточно хорошо соответствуют друг другу. При этом было установлено, что среднее значение фактической дистанции проводки оказывается существенно выше расчетной минимальной дистанции и больше соответствует расчетному случаю останова судна на чистой воде с реверсированием движителей.

Автор выражает глубокую признательность проф., д.т.н., К.Е. Сазонову, а также В.В. Якимову за ценные комментарии по тексту статьи и количественный анализ результатов расчетов.

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда «Разработка технологии тактического и оперативного планирования и управления работой ледоколов и судов ледового плавания в условиях круглогодичной навигации по трассам Северного морского пути» (проект № 17-79-20162-П).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рывлин А.Я., Хейсин Д.Е. Испытания судов во льдах. Л.: Судостроение, 1980. 208 с.
2. Методические рекомендации по выполнению расчета допустимых режимов движения судна во льдах, СПб. 2012. 18 с.
3. Goncharov V.K., Klementieva N.Yu. Problem statement on the vessel braking within ice channel. Transportation Safety and Environment. Vol. 3, Issue 1. 2021. pp. 50 — 56, https://doi.org/10.1093/tse/tdaa032.
4. Zhang W., Goerlandt F., Kujala P., Qi Y. A coupled kinematics model for icebreaker escort operations in ice-covered waters. Ocean Engineering. Vol. 167, 2018. pp. 317 — 333 https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.08.035.
5. Zhang W., Zoua Z., Goerlandt F., Qi Y., Kujala P. A multi-ship following model for icebreaker convoy operations in icecovered waters. Ocean Engineering. Vol. 180, 2019. pp. 238 — 253 https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.03.057.
6. Zhang M., Zhang D., Fu S., Yan X., Goncharov V. Safety distance modeling for ship escort operations in arctic ice-covered waters. Ocean Engineering. Vol. 146, 2017. pp. 202 — 216. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2017.09.053.
7. Добродеев А.А., Сазонов К.Е. Определение безопасной дистанции проводки крупнотоннажных судов во льдах // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. 2019. № 54/55. с. 8 — 16.
8. Гофман А.Д. Движительно-рулевой комплекс и маневрирование судна. Справочник. – Л.: Судостроение, 1988. 360 с.
9. Сазонов К.Е. Теоретические основы плавания судов во льдах. Издательство ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. Санкт-Петербург, 2010. 274 с.
10. Ольховик Е.О. Анализ скоростных режимов СПГ-танкеров в акватории Северного морского пути в период зимней навигации 2017 — 2018 гг. // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. 2018. Т. 10. № 2. с. 300 — 308. https://doi.org/10.21821/2309-5180-2018-10-2-300-308.
11. Андрюшин А.В., Федосеев С.С., Кутейников М.А. Ледовые нагрузки на корпус винторулевых колонок судов ледового плавания. Труды КГНЦ. Спец. вып. 2. 2020. с. 19 — 30. https://doi.org/10.24937/2542-2324-2020-2-S-I-19-30.
12. Nowicki J. Stopping of Ships Equipped with Azipods. TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation. Vol 8, No 3. 2014. pp. 373 — 376. https://doi.org/10.12716/1001.08.03.07.
13. Цой Л.Г., Боганов А.А. Математическая модель движения судна во льдах под проводкой ледокола // Перспективные типы судов и их мореходные качества. Сборник научных трудов ЦНИИМФ. вып. 285. 1983, с. 95 — 99.
14. Riska K., Wilhelmson M., Englund K., Leiviska T. Performance of merchant vessels in ice in the Baltic/ Research report No. 52. Helsinki University of Technology. Ship Laboratory. Espoo, December 1997. 73 p.

15. Lindqvist G., 1989. A straightforward method for calculation of ice resistance of ships. Proceedings of POAC 89. Vol. 2. 1989. pp. 722 — 735.
16. Grochowalski S., Hermanski G. Ship Resistance and Propulsion in Ice-Covered Waters: An Experimental Study. Transactions — Society of Naval Architects and Marine Engineers. Vol. 119. 2011. pp. 67 — 92
17. Jeong S.-Y., Choi K., Kim H.-S. Investigation of ship resistance characteristics under pack ice conditions. Ocean Engineering. Volume 219, 1 January 2021, 108264. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.108264

REFERENCES

1. Ryvlin A.Ya., Kheysin D.E. *Ispytaniya sudov vo ldakh* [Ship ice trials]. Leningrad: Sudostroyeniye [Shipbuilding], 1980, 208 p.
2. *Metodicheskiye rekomendatsii po vypolneniyu rascheta dopustimykh rezhimov dvizheniya sudna vo ldakh* [Guidance on Calculation of Permissible Ship Motions when Navigating in Ice]. St. Petersburg. Russian Maritime Register of Shipping, 2012, 18 p.
3. Goncharov V.K., Klementieva N.Yu. Problem statement on the vessel braking within ice channel. Transportation Safety and Environment. Vol. 3, Issue 1. 2021. pp. 50 — 56, https://doi.org/10.1093/tse/tdaa032.
4. Zhang W., Goerlandt F., Kujala P., Qi Y. A coupled kinematics model for icebreaker escort operations in ice-covered waters. Ocean Engineering. Vol. 167, 2018. pp. 317 — 333 https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.08.035.
5. Zhang W., Zoua Z., Goerlandt F., Qi Y., Kujala P. A multi-ship following model for icebreaker convoy operations in icecovered waters. Ocean Engineering. Vol. 180, 2019. pp. 238 — 253 https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.03.057.
6. Zhang M., Zhang D., Fu S., Yan X., Goncharov V. Safety distance modeling for ship escort operations in arctic ice-covered waters. Ocean Engineering. Vol. 146, 2017. pp. 202 — 216. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2017.09.053.
7. Dobrodeev A.A., Sazonov K.E. *Opredelenie bezopasnoy distantsii provodkikrupnotonnazhnykh sudov vo ldah* [Determination of the safe distance for heavy-tonnage ships escorting in ice]. [Research Bulletin of Russian Maritime Register of Shipping]. 2019. Nos. 54/55. pp. 8 — 16.
8. Gofman A.D. *Dvizhitelno-rulevoy kompleks i manevrirovanie sudna* [Propulsion and steering complex and vessel maneuvering]. Handbook. Leningrad: Sudostroyeniye [Shipbuilding], 1988, 360 p.
9. Sazonov K.E. *Teoreticheskie osnovy plavaniya sudov vo ldah* [Theoretical foundations of ship navigation in ice]. Krylov State Research Centre. St. Petersburg. 2010. 274 p.
10. Olkhovik E.O. *Analiz skorostnykh rezhimov SPG-tankerov v akvatorii Severnogo morskogo puti v period zimnej navigatsii 2017 — 2018* [Analysis of speed regime LNG-tankers in the Northern Sea Route in period of winter navigation 2017 — 2018]. Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova. 2018. Vol. 10. No. 2. pp. 300 — 308. https://doi.org/10.21821/2309-5180-2018-10-2-300-308.
11. Andryushin A., Fedoseev S., Kuteinikov M. *Ledovye nagruzki na korpus vintorulevykh kolonok sudov ledovogo plavaniya* [Ice loads on pod unit bodies of ice-going ships]. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2020. Special Edition 2: pp.19 — 30 https://doi.org/10.24937/2542-2324-2020-2-S-I-19-30.
12. Nowicki J. Stopping of Ships Equipped with Azipods. TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation. Vol 8, No 3. 2014. pp. 373 — 376. https://doi.org/10.12716/1001.08.03.07.
13. Tsoy L.G., Bogdanov A.A. *Matematicheskaya model dvizheniya sudna vo ldah pod provodkoy ledokola* [Mathematical model of the ship's movement in ice under the icebreaker assistance] // *Perspektivnye tipy sudov i ih morekhodnye kachestva* [Promising types of ships and their seaworthiness]. Sbornik nauchnyh trudov CNIIMF. Vol. 285. 1983. pp. 95 — 99.
14. Riska K., Wilhelmson M., Englund K., Leiviska T. Performance of merchant vessels in ice in the Baltic/ Research report No 52. Helsinki University of Technology. Ship Laboratory. Espoo, December 1997. 73 p.
15. Lindqvist, G., 1989. A straightforward method for calculation of ice resistance of ships. Proceedings of POAC 89. Vol. 2. 1989. pp. 722 — 735.
16. Grochowalski S., Hermanski G. Ship Resistance and Propulsion in Ice-Covered Waters: An Experimental Study. Transactions — Society of Naval Architects and Marine Engineers. vol 119. 2011. pp. 67 — 92.
17. Jeong S.-Y., Choi K., Kim H.-S. Investigation of ship resistance characteristics under pack ice conditions. Ocean Engineering. Volume 219, 1 January 2021, 108264. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.108264.



ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ НА МОРСКОМ ТРАНСПОРТЕ

УДК 656.614.35+629.563.82

ОБОСНОВАНИЕ МЕСТОРАСПОЛОЖЕНИЯ ПЕРЕВАЛОЧНЫХ КОМПЛЕКСОВ БУНКЕРНОГО ТОПЛИВА

М.В. Власьев, канд. техн. наук, ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет», Санкт-Петербург, e-mail: valmax2006@yandex.ru

В статье рассмотрена и проанализирована актуальная задача по определению месторасположения перевалочных комплексов бункерного СПГ-топлива. Предложен способ ее решения, в основу которого положен эвристический метод Ардалана. Определены основные факторы, влияющие на экономическую эффективность системы доставки топлива с точки зрения бункеровочной компании. Результаты расчета могут быть использованы при технико-экономической оценке вновь создаваемой инфраструктуры и научно-обоснованный выбор схемы доставки топлива в зависимости от объема. Предложенный способ может быть использован также для оценки размещения других предприятий, обслуживающих суда и имеющих нефиксированный радиус обслуживания. Приведено решение задачи по определению месторасположения перевалочных комплексов бункерного СПГ-топлива на примере портов Балтийского моря.

Ключевые слова: *перевалочный комплекс, судно-бункеровщик, бункеровочная база, бункеровка, сжиженный природный газ, судозаходы*

JUSTIFICATION FOR BUNKER FUEL TRANSSHIPMENT COMPLEX LOCATION

M.V. Vlasiev, PhD, Saint Petersburg Marine Technical University, St. Petersburg, e-mail: valmax2006@yandex.ru

The article discusses and analyzes the actual task of determining the location of LNG bunker fuel transshipment complexes. A method for solving this problem based on the Ardalan heuristic method has been proposed, while determining main factors influencing the economic efficiency of the fuel delivery system from the point of view of the bunkering company. Calculation results may be used in the technical and economic assessment of the newly created infrastructure and the scientifically based choice of the fuel delivery scheme depending on the volume. The proposed method can also be used to estimate the location of other enterprises servicing ships and having an unfixed service radius. The solution of the problem of determining the location of transshipment complexes of bunker liquefied natural fuel has also been given using the ports of the Baltic Sea as an example.

Keywords: *transshipment complex, bunkering vessel, bunkering base, bunkering, liquefied natural gas, ship calls*

Комитет по охране морской окружающей среды Международной морской организации (IMO) с 1 января 2020 года ограничил с 3,5 % до 0,5 % максимальное содержание серы в судовом топливе в зонах контроля за выбросами SECA, в которую входят Балтийское и Северное моря, включая пролив Ла-Манш, а также Западное и Восточное побережья Северной Америки, воды Мексиканского залива и Карибского бассейна, относящиеся к США [1]. Позднее эти нормы распространились и на Средиземное море. В среднесрочной перспективе возможно дальнейшее ужесточение нормативно-правового регулирования в данной сфере, поскольку меры в области борьбы с изменениями климата приобретают все более широкий охват. Данные ограничения подталкивают судоходную отрасль к реализации мероприятий по борьбе с загрязнением окружающей среды, включая все более широкое использование альтернативных видов топлив.

Одним из новых видов судового топлива, набирающим популярность, является сжиженный природный газ (СПГ). Использование СПГ в качестве судового топлива позволяет значительно снизить загрязнение окружающей среды оксидами серы и азота и выполнить экологические ограничения IMO, которые становятся все более жесткими.

Бункеровка как хозяйственная деятельность по материально-техническому снабжению судов топливом и смазочными материалами является одной из самых важных и востребованных услуг в любом порту мира.

Поиск способов усовершенствования транспортно-логистических схем доставки топлива конечному потребителю в контексте основных тенденций мирового хозяйства является одной из наиболее актуальных задач для бункерного бизнеса. Использование СПГ в качестве судового топлива потребует создания соответствующей цепи поставок топлива, чтобы удовлетворить спрос на него в разных регионах мира.

Возрастание масштабов производства газового топлива и повышение его роли делают необходимым создание качественно нового подхода и перспективному планированию развития отрасли бункеровки СПГ-топливом, и, прежде всего, к размещению сети перевалочных комплексов и портовых пунктов бункеровки — основной части материально-технической базы. На рис. 1 представлена схема доставки газового бункерного топлива от скважины до конечного потребителя.

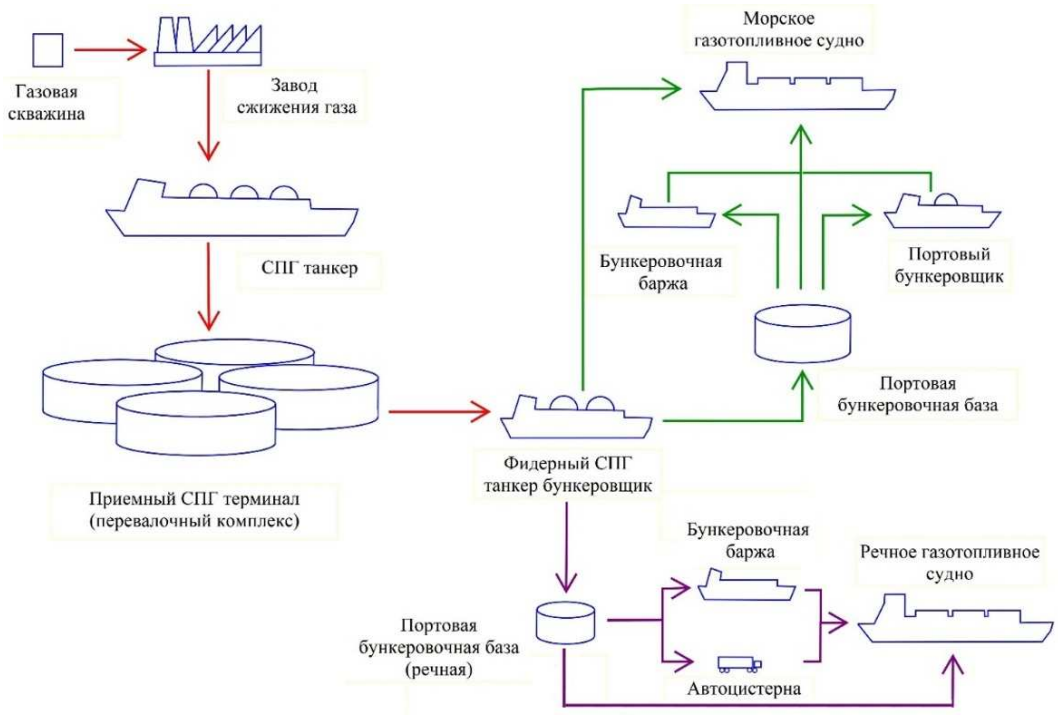


Рис. 1 Схема доставки газового бункерного топлива

При современном развитии морского транспорта бункеровка и портовые бункеровочные базы приобрели важное значение для создания условий работы флота в оптимальном режиме. В идеале все суда, посещающие какой-либо порт, в этом же порту должны быть обеспечены топливом для последующего рейса. Для этого в порту либо создается бункеровочная база, либо топливо завозится судами-бункеровщиками с бункеровочных баз соседних портов.

Обоснование выбора той или иной из перечисленных форм организации бункеровки судов и размещение базовых пунктов бункеровки судов топливом, обычно выполняются путем сопоставления приведенных эксплуатационно-строительных затрат по вариантам.

В составе приведенных эксплуатационно-строительных затрат учитываются капитальные вложения и эксплуатационные расходы по следующим объектам:

- бункеровочная база;
- суда-бункеровщики, осуществляющие доставку топлива на базу и бункеровку судов;
- технические средства смежных видов транспорта, участвующие в доставке топлива от поставщика до базы.

Кроме того, в расчетах учитываются оборотные средства, вложенные в запасы топлива на базе.

Бункеровочные операции в порту, как правило, осуществляются с помощью специализированных танкеров-бункеровщиков разного тоннажа и автозаправщиков. Значительно реже применяется бункеровка судов по трубопроводу с берегового терминала. Соотношение и преимущественное использование того или иного способа доставки топлива на борт судна определяются целым рядом факторов. Среди них основное место занимают интенсивность движения судов, грузооборот порта, география морских путей в регионе, специфика переваливаемых в порту грузов и обслуживания транзитных судовых потоков.

В логистической системе доставки груза конечному потребителю важное место занимает перевалочный комплекс, под которым понимают узловой портовый комплекс (хаб). Основной деятельностью хаба является операция трансшипмента груза (англ. transshipment). Согласно трансшипменту перевозчик выгружает с судна весь груз или его часть на перевалочном комплексе, при этом груз складируется на берегу или перегружается на судно другого перевозчика. Наиболее распространенной формой распределения грузов с помощью перевалочного комплекса является схема «хаб – энд – спок» (англ. spoke) (см. рис. 2).

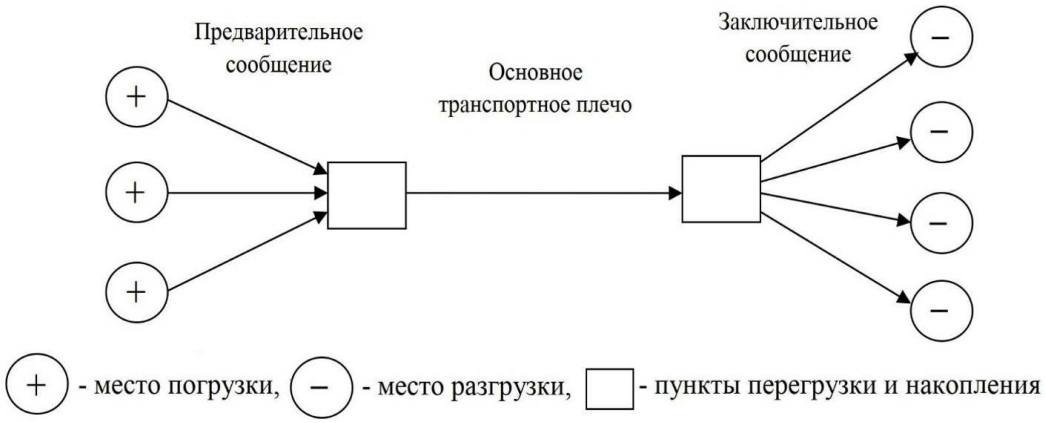


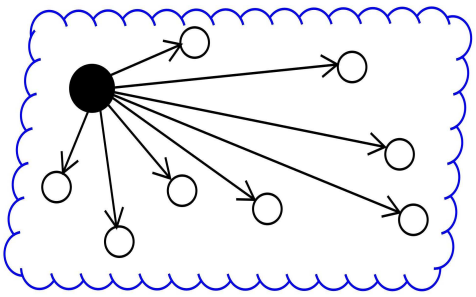
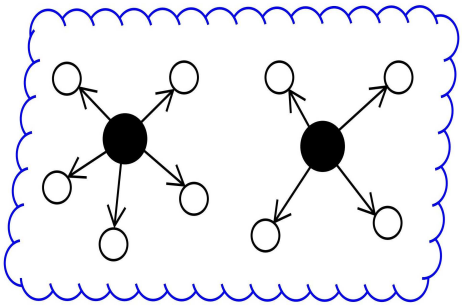
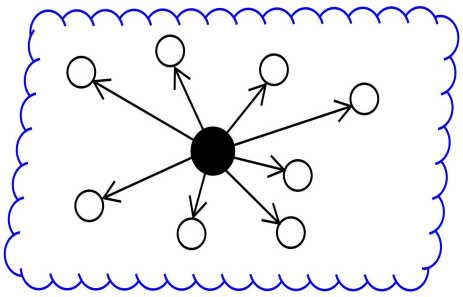
Рис. 2 Структура доставки груза по схеме hub&spoke

В нашем случае перевалочный комплекс обеспечивает связь между глобальной и региональной сетями распределения топлива, которая осуществляется магистральными и фидерными СПГ-газовозами соответственно. Топливные потоки консолидируются на перевалочном комплексе за счет его центрального (наиболее доступного) месторасположения в исследуемом регионе. Вместимость магистральных газовозов, которые перевозят топливо с терминала завода по производству СПГ на перевалочный комплекс, и вместимость фидерных газовозов значительно отличается, т.к. фидерные используются для развозки относительно небольших партий топлива по портовым бункеровочным базам (см. рис. 1). От правильности расположения перевалочного комплекса в совокупности с развитием примыкающих к нему бункеровочных баз и газовозов-бункеровщиков зависит качество и надежность функционирования системы реализации топлива в регионе в целом.

Известно, что в системе распределения любого товара в качестве одной из главных зависимых переменных рассматриваются транспортные расходы по его доставке с распределительного склада потребителям. Однако величина транспортных расходов по доставке товара может также существенно меняться не только в зависимости от количества распределительных складов, но также и от их месторасположения на территории обслуживаемого региона. Тесную зависимость транспортных издержек по обеспечению конечных потребителей товаром в зависимости от расположения складов иллюстрируют схемы, приведенные в табл. 1. [2]

Таблица 1

Варианты размещения распределительных центров на территории обслуживаемого региона

Схема размещения распределительных центров	Варианты расположения распределительных центров	Характеристики
	Один распределительный центр на окраине обслуживаемой территории	1) Высокий уровень транспортных расходов 2) Увеличенное время на пополнение запасов в портовых пунктах бункеровки 3) Высокие уровни запасов в портовых пунктах бункеровки
	Два распределительных центра, расположенных в местах потребления материального потока	1) Низкий уровень транспортных расходов 2) Быстрота выполнения заказов на пополнение запасов топлива в портовых пунктах бункеровки 3) Низкий уровень запасов в портовых пунктах бункеровки 4) Высокие капитальные расходы в строительство инфраструктурных объектов для перевалки топлива 5) Увеличение эксплуатационных и накладных расходов на содержание инфраструктурных объектов для перевалки топлива
	Один распределительный центр в центре обслуживаемой территории	1) Низкий уровень транспортных расходов 2) Низкий уровень запасов в портовых пунктах бункеровки 3) Быстрота выполнения заказов на пополнения запасов топлива в портовых пунктах бункеровки 4) Сложность размещения в центре обслуживаемой территории

Бункеровочные базы по отношению к объектам обслуживания (бункеруемые суда) располагаются таким образом, чтобы, во-первых, предоставить свои услуги как можно большему количеству судов, а во-вторых, максимально снизить затраты времени бункеруемых судов на ожидание процедуры бункеровки. Валовый доход бункеровочной базы прямо пропорционален объему перевалки топлива, а этот объем, в свою очередь, зависит от спроса на топливо. Анализ бункерного рынка позволил определить основные факторы, влияющие на уровень потребления топлива в портах и на водном транспорте (см. рис. 3). К ним относятся, прежде всего, численный состав судов, удельный вес каждого из типов судов, заходящих в порты, концентрация производства в районах, прилегающих к портам, экспортно-импортные товарные потоки, проходящие через порты.

Основным выводом является то, что чем мощнее поток судов в порту, тем больше может образовываться в нем потенциальных потребителей, при этом порты имеют неодинаковую структуру потока судов, которые в свою очередь проявляют различную потребительную активность с точки зрения пользования услугами бункерных компаний. Следовательно, оба фактора — доход базы и спрос на топливо — действуют в одном направлении и требуют увеличения запасов топлива на базе. Но из-за большой стоимости инфраструктуры для сжиженного природного газа и стоимости его хранения, создание чрезмерных запасов топлива является нецелесообразным.

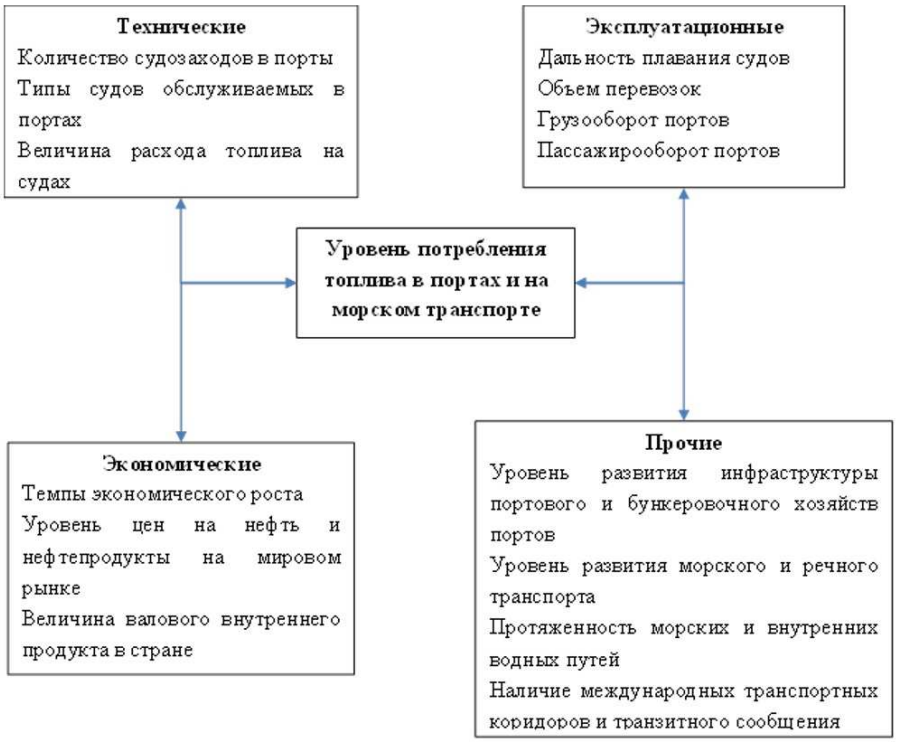


Рис. 3 Факторы, влияющие на уровень потребления судового топлива в портах и на водном транспорте

Очевидно, что минимум затрат времени на доставку топлива на бункеровочную базу будет в том случае, когда база расположена по возможности ближе к перевалочному комплексу. Но тогда пришлось бы строить такой комплекс возле каждого порта, что является нереальным. В силу разбросанности потребителей и ограниченности финансовых ресурсов топливная компания не может построить перевалочный комплекс в каждом порту. Любая попытка оптимизировать работу комплекса без учета интереса всей совокупности снабжаемых топливом судов приведет к нахождению, как принято говорить, ложного оптимума, при достижении которого выигрыш значительно перекроется потерями.

Наукой и практикой выработаны различные методы определения месторасположения центров распределения груза: к ним относятся алгоритмические, имитационные и эвристические [2]. Первые два метода требуют от расчетчика высокого уровня математических знаний, а также относительно трудоемки по времени. Под эвристическими методами понимаются подходы, базирующиеся на опыте и интуиции выполняющего расчет эксперта и позволяющие получить близкий к оптимуму результат при невысокой сложности вычислений. Для решения задачи по определению месторасположения перевалочных комплексов СПГ-топлива может быть применен эвристический метод последовательного перебора, разработанный Ардаланом [3]. Этот метод позволяет определять месторасположение фиксированного количества центров распределения груза на исследуемой территории с целью максимального охвата потребителей.

Задача по определению оптимального месторасположения перевалочных комплексов бункерного СПГ-топлива может быть решена путем сопоставления расходов по транспортировке топлива с перевалочного комплекса на портовые бункеровочные базы. В качестве критерия стоимости доставки топлива в расчете принимается расстояние от каждого порта до других портов. Таким образом, стоимость доставки топлива с перевалочного комплекса, размещенного в том же порту, где располагается перевалочный комплекс, будет равна нулю. В методе Ардалана также учитываются количество судозаходов в порты на исследуемой акватории и коэффициент относительной важности порта. Коэффициент относительной важности порта — это комплексный показатель, определяемый экспертным путем. В нашем случае он учитывает типы судов, обслуживаемые в порту, объем перевозок и грузооборот порта, а также состояние портовой инфраструктуры. Структура и направление развития системы распределения топлива производится по результатам решения задачи, в которой целевой функцией является сумма расходов по доставке топлива от перевалочного комплекса на портовые бункеровочные базы.

Приведенное расстояние DAB от порта A до порта B показывает относительное неудобство для бункеровочных компаний порта A, связанное с размещением перевалочного комплекса в порту B. Оно рассчитывается как произведение расстояния между портами SAB, количества судозаходов в порт A — N_A и коэффициента относительной важности размещения перевалочного центра в порту A — I_A:

$$D_{AB} = S_{AB} \cdot N_A \cdot I_A$$

Решение задачи по определению месторасположения перевалочного центра СПГ-топлива было выполнено на примере портов Балтийского моря (см. рис. 4). Указанные порты расположены на пересечении или вблизи основных транспортных путей Балтийского моря. Определение месторасположения перевалочного комплекса бункерного топлива выполнено для двух вариантов решения задачи: с учетом коэффициента важности портов и без него, при этом в обоих вариантах на исследуемой акватории размещается два топливных перевалочных комплекса.

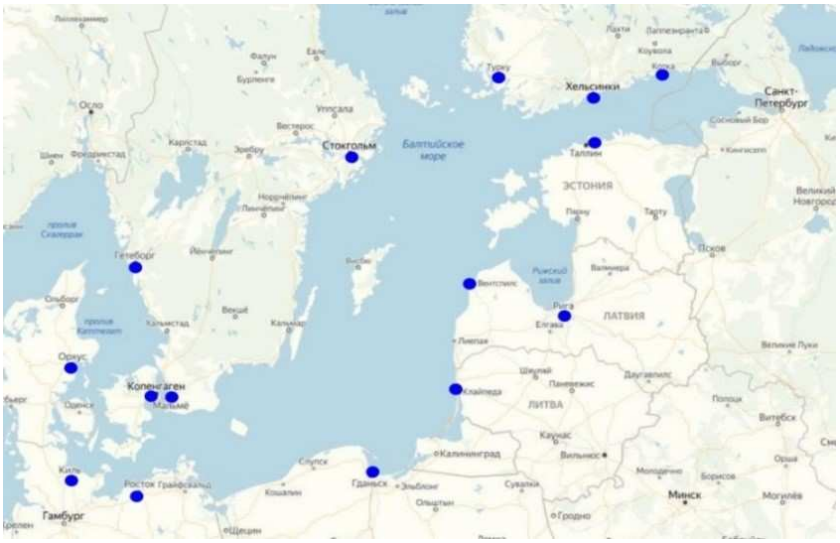


Рис. 4 Схема размещения портов Балтийского моря

Диаграмма судозаходов в указанные порты Балтийского моря за период 2020 — 2021 гг. представлена на рис. 5. Из диаграммы видно, что в «ковидный» 2020 год количество судозаходов значительно снизилось (в среднем на 40 — 50 %) в связи с замедлением международной торговли. Начиная с 2021 года, объемы международной торговли снова находятся в состоянии роста. Поэтому в рамках данного исследования используются данные о судозаходах за 2021 год.

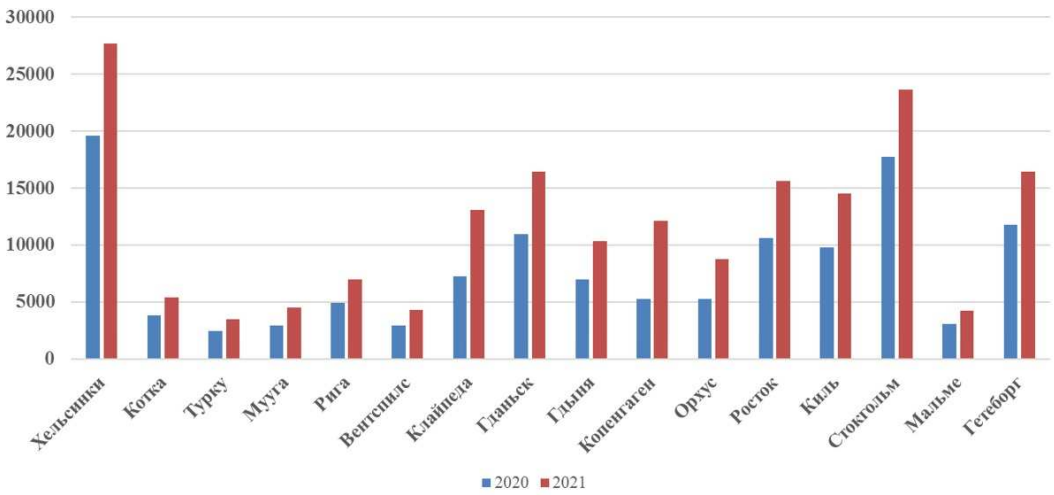


Рис. 5 Количество судозаходов в основные порты Балтийского моря за период 2020 — 2021 гг.

Таблица 2

Приведенные расстояния между исследуемыми портами для выбора первого перевалочного центра СПГ-топлива без учета коэффициентов важности портов

Наименование порта	Количество судозаходов в порт	Коэффициент	Приведенные расстояния, *S*															
			Хельсинки	Котка	Турку	Мууга	Рига	Вентспилс	Клайпеда	Гданьск	Гдыня	Копенгаген	Орхус	Росток	Киль	Стокгольм	Мальме	Гетеборг
Хельсинки	21732	1	0	2410422	5125610	1329888	8755096	6455498	9336922	11691932	11581108	15376830	18369078	16069480	17482486	6566322	15376830	19034022
Котка	4108	1	1010361	0	1302123	534897	2015319	1566870	2128782	2625858	2593440	3295830	3868548	3436308	3728070	1604691	3295830	4003623
Турку	2661	1	635475	827835	0	549600	924015	666390	1023630	1325910	1312170	1707195	2081610	1796505	1978560	563340	1707195	2174355
Мууга	3523	1	215568	444609	718560	0	1306881	943110	1419156	1823346	1805382	2393703	2874240	2505978	2739510	974547	2407176	2986515
Рига	5478	1	2195884	2591977	1869281	2022159	0	868625	1639964	2307068	2279272	3321622	4072114	3495347	3821950	1848434	3328571	4231941
Вентспилс	3300	1	996541	1240330	829738	898170	534625	0	496132	902447	885339	1535443	1993082	1638091	1877603	765583	1531166	2095730
Клайпеда	10117	1	4408971	5154702	3898734	4134228	3087588	1517628	0	1530711	1478379	4225809	5612607	4526718	5193951	3466995	4225809	5926599
Гданьск	12801	1	6947808	8001504	6355104	6684384	5466048	3473904	1926288	0	197568	4511136	6239856	4560528	5663616	5680080	4494672	6684384
Гдыня	8001	1	4330480	4972800	3957520	4164720	3398080	2144520	1170680	124320	0	2797200	3885000	2828280	2828280	3532760	2786840	4164720
Копенгаген	9206	1	6711060	7376120	6009724	6445036	5779976	4341028	3905716	3313208	3264840	0	1366396	1305936	1958904	5163284	241840	1656604
Орхус	6383	1	5800587	6264284	5301894	5599360	5126914	4077034	3753321	3315871	3280875	988637	0	1382342	1163617	4689464	1014884	1321099
Росток	11959	1	9050900	9924780	8161415	8707590	7849315	5976715	5399330	4322585	4260165	1685340	2465590	0	1310820	7084670	1654130	3745200
Киль	11627	1	9153286	10009140	8355456	8848660	7978300	6368134	5758882	4990064	3960138	2349972	1929298	1218504	0	7209482	2335466	3423416
Стокгольм	18244	1	5605761	7024941	3879092	5132701	6291698	4233887	6268045	8160285	8065673	10099831	12678008	10738462	11755541	0	10170790	13245680
Мальме	3187	1	2329335	2560170	2085909	2249592	2010363	1502526	1355631	1145781	1128993	83940	486852	444882	675717	1804710	0	608565
Гетеборг	12478	1	11273670	12159810	10387530	10912650	9993690	8040900	7433730	6662460	6596820	2248170	2477910	3938400	3872760	9189600	2379450	0
СУММА			**70665687**	**80963424**	**68237690**	**68213635**	**70517908**	**52176769**	**53016209**	**54241846**	**52690162**	**56620658**	**70400189**	**59885761**	**66051385**	**60143962**	**56950649**	**75302453**

Таблица 3

Приведенные расстояния между исследуемыми портами для выбора второго перевалочного центра СПГ-топлива без учета коэффициентов важности портов

Наименование порта	Количество судозаходов в порт за 2021 год (N)	Коэффициент	Приведенные расстояния, S																
			Хельсинки	Котка	Турку	Мууга	Рига	Вентспилс	Клайпеда	Гданьск	Гдыня	Копенгаген	Орхус	Росток	Киль	Стокгольм	Мальме	Гетеборг
Хельсинки	21732	1	0	2410422	5125610	1329888	6455498	6455498	6455498	6455498	6455498	6455498	6455498	6455498	6455498	6455498	6455498	6455498
Котка	4108	1	1010361	0	1302123	534897	1566870	1566870	1566870	1566870	1566870	1566870	1566870	1566870	1566870	1566870	1566870	1566870
Турку	2661	1	635475	666390	0	425760	666390	666390	666390	666390	666390	666390	666390	666390	666390	666390	666390	666390
Мууга	3523	1	215568	444609	718560	0	943110	943110	943110	943110	943110	943110	943110	943110	943110	943110	943110	943110
Рига	5478	1	868625	868625	868625	868625	0	868625	868625	868625	868625	868625	868625	868625	868625	868625	868625	868625
Вентспилс	3300	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Клайпеда	10117	1	1517628	1517628	1517628	1517628	1517628	1517628	0	1517628	1478379	1517628	1517628	1517628	1517628	1517628	1517628	1517628
Гданьск	12801	1	3473904	3473904	3473904	3473904	3473904	3473904	1926288	0	197568	3473904	3473904	3473904	3473904	3473904	3473904	3473904
Гдыня	8001	1	2144520	2144520	2144520	2144520	2144520	2144520	1170680	124320	0	2144520	2144520	2144520	2144520	2144520	2144520	2144520
Копенгаген	9206	1	4341028	4341028	4341028	4341028	4341028	4341028	3905716	3313208	3264840	0	1366396	1305936	1958904	4341028	184120	1261222
Орхус	6383	1	4077034	4077034	4077034	4077034	4077034	4077034	3753321	3315871	3280875	988637	0	1382342	1163617	4077034	1014884	1321099
Росток	11959	1	5976715	5976715	5976715	5976715	5976715	5976715	5399330	4322585	4260165	1685340	2465590	0	1310820	5976715	1654130	3745200
Киль	11627	1	6368134	6368134	6368134	6368134	6368134	6368134	5758882	4990064	3960138	2349972	1929298	1218504	0	6368134	2335466	3423416
Стокгольм	18244	1	4233887	4233887	2992016	4233887	4233887	4233887	4233887	4233887	4233887	4233887	4233887	4233887	4233887	0	4233887	4233887
Мальме	3187	1	1502526	1502526	1502526	1502526	1502526	1502526	1355631	1145781	1128993	83940	486852	444882	675717	1502526	0	608565
Гетеборг	12478	1	8040900	8040900	8040900	8040900	8040900	8040900	7433730	6662460	6596820	2248170	2477910	3938400	3872760	8040900	2379450	0
СУММА			**44406305**	**46066322**	**48449323**	**44835446**	**51308144**	**52176769**	**45437958**	**40126297**	**38902158**	**29226491**	**30596478**	**30160496**	**30852250**	**47942882**	**29438482**	**32229934**

Таблица 4

Приведенные расстояния между исследуемыми портами для выбора первого перевалочного центра СПГ-топлива с учетом

Наименование порта	Количество судозаходов в порт за 2021 г. (*N*)	Коэффициент	Приведенные расстояния, *S*															
			Хельсинки	Котка	Турку	Мууга	Рига	Вентспилс	Клайпеда	Гданьск	Гдыня	Копенгаген	Орхус	Росток	Киль	Стокгольм	Мальме	Гетеборг
Хельсинки	21732	1,3	0	2457889	5226546	1356076	8927505	6582622	9520789	11922175	11809168	15679638	18730810	16385928	17826759	6695629	15679638	19408849
Котка	4108	1	768196	0	990028	406692	1532284	1191320	1618552	1996488	1971840	2505880	2941328	2612688	2834520	1220076	2505880	3044028
Турку	2661	1	492285	641301	0	425760	715809	516234	792978	1027146	1016502	1322517	1612566	1391703	1532736	436404	1322517	1684413
Мууга	3523	1	169104	348777	563680	0	1025193	739830	1113268	1430338	1416246	1877759	2254720	1965834	2149030	764491	1888328	2342795
Рига	5478	0,8	1384838	1634635	1178865	1275278	0	547800	1034246	1454956	1437427	2094787	2568086	2204347	2410320	1165718	2099169	2668881
Вентспилс	3300	0,8	615120	765600	512160	554400	330000	0	306240	557040	546480	947760	1230240	1011120	1158960	472560	945120	1293600
Клайпеда	10117	0,8	2727543	3188878	2411892	2557577	1910089	938857	0	946951	914576,8	2614232	3472154	2800385	3213159	2144804	2614232	3666400
Гданьск	12801	1	5402022	6221286	4941186	5197206	4249932	2701011	1497717	0	153612	3507474	4851579	3545877	4403544	4416345	3494673	5197206
Гдыня	8001	1	3344418	3840480	3056382	3216402	2624328	1656207	904113	96012	0	2160270	3000375	2184273	2184273	2728341	2152269	3216402
Копенгаген	9206	1,5	7663995	8423490	6863073	7360197	6600702	4957431	4460307	3783666	3728430	0	1560417	1491372	2237058	5896443	276180	1891833
Орхус	6383	1,5	6347893	6855342	5802147	6127680	5610657	4461717	4107460	3628735	3590437	1081918	0	1512771	1273408	5131932	1110642	1445749
Росток	11959	1,3	9017086	9887701	8130924	8675058	7819990	5954386,1	5379158	4306435	4244249	1679043	2456378	0	1305922	7058201	1647950	3731208
Киль	11627	1,5	11004955	12033945	10045728	10638705	9592275	7656379,5	6923878	5999532	4761256	2825361	2319586	1465002	0	8667928	2807920	4115958
Стокгольм	18244	1,5	6485742	8127702	4488024	5938422	7279356	4898514	7251990	9441270	9331806	11685282	14668176	12424164	13600902	0	11767380	15324960
Мальме	3187	1,2	2122542	2332884	1900726	2049878	1831887	1369135	1235281	1044061	1028763	76488	443630	405386	615728	1644492	0	554538
Гетеборг	12478	1,5	12858579	13869297	11847861	12446805	11398653	9171330	8478801	7599102	7524234	2564229	2826267	4492080	4417212	10481520	2713965	0
СУММА			**70404319**	**80629208**	**67959224**	**68226139**	**71448662**	**53342775**	**54624780**	**55233910**	**53475029**	**52622640**	**64936315**	**55892931**	**61163534**	**58924885**	**53025865**	**69586822**

Таблица 5

Приведенные расстояния между исследуемыми портами для выбора второго перевалочного центра СПГ-топлива с учетом коэффициентов важности портов

Наименование порта	Количество судозаходов в порт за 2021 г. (*N*)	Коэффициент	Приведенные расстояния, *S*															
			Хельсинки	Котка	Турку	Мууга	Рига	Вентспилс	Клайпеда	Гданьск	Гдыня	Копенгаген	Орхус	Росток	Киль	Стокгольм	Мальме	Гетеборг
Хельсинки	21732	1,3	0	2457889,2	5226546	1356076,8	8927505,6	6582622,8	9520789,2	11922175	11809169	15679638	15679638	15679638	15679638	6695629	15679638	15679638
Котка	4108	1	768196	0	990028	406692	1532284	1191320	1618552	1996488	1971840	2505880	2505880	2505880	2505880	1220076	2505880	2505880
Турку	2661	1	492285	641301	0	425760	715809	516234	792978	1027146	1016502	1322517	1322517	1322517	1322517	436404	1322517	1322517
Мууга	3523	1	169104	348777	563680	0	1025193	739830	1113268	1430338	1416246	1877759	1877759	1877759	1877759	764491	1877759	1877759
Рига	5478	0,8	1384838,4	1634635,2	1178865,6	1275278,4	0	547800	1034246,4	1454957	1437427	2094787	2094787	2094787	2094787	1165718	2094787	2094787
Вентспилс	3300	0,8	615120	765600	512160	554400	330000	0	306240	557040	546480	947760	947760	947760	947760	472560	945120	947760
Клайпеда	10117	0,8	2614232,8	2614232,8	2411892,8	2557577,6	1910089,6	938857,6	0	946951,2	914576,8	2614233	2614233	2614233	2614233	2144804	2614233	2614233
Гданьск	12801	1	3507474	3507474	3507474	3507474	3507474	2701011	1497717	0	153612	3507474	3507474	3507474	3507474	3507474	3494673	3507474
Гдыня	8001	1	2160270	2160270	2160270	2160270	2160270	1656207	904113	96012	0	2160270	2160270	2160270	2160270	2160270	2160270	2160270
Копенгаген	9206	1,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Орхус	6383	1,5	1081918,5	1081918,5	1081918,5	1081918,5	1081918,5	1081918,5	1081918,5	1081919	1081919	1081919	0	1081919	1081919	1081919	1081919	1081919
Росток	11959	1,3	1679043,6	1679043,6	1679043,6	1679043,6	1679043,6	1679043,6	1679043,6	1679044	1679044	1679044	1679044	0	1305923	1679044	1647950	1679044
Киль	11627	1,5	2825361	2825361	2825361	2825361	2825361	2825361	2825361	2825361	2825361	2825361	2319587	1465002	0	2825361	2825361	2825361
Стокгольм	18244	1,5	6485742	8127702	4488024	5938422	7279356	4898514	7251990	9441270	9331806	11685282	11685282	11685282	11685282	0	11685282	11685282
Мальме	3187	1,2	76488	76488	76488	76488	76488	76488	76488	76488	76488	76488	76488	76488	76488	76488	0	76488
Гетеборг	12478	1,5	2564229	2564229	2564229	2564229	2564229	2564229	2564229	2564229	2564229	2564229	2564229	2564229	2564229	2564229	2564229	0
СУММА			**26424302,3**	**30484921,3**	**29265980,5**	**26408990,9**	**35615021,3**	**27999437**	**32266933,7**	**37099417**	**36824699**	**52622640,1**	**51034947**	**49583238**	**49424158**	**26794467**	**52499618**	**50058411**

Решение задачи по размещению перевалочных комплексов бункерного СПГ-топлива показало, что в первом варианте (без учета коэффициентов важности портов) один перевалочный комплекс следует располагать в порту Вентспилс, другой — в порту Копенгаген (см. табл. 2 и 3). Во втором варианте (с учетом коэффициента важности портов) один перевалочный комплекс следует размещать в порту Копенгагена (см. табл. 4), а другой — в порту Мууга (см. табл. 5).

Размещение перевалочного комплекса российских бункерных компаний в порту Вентспилс, несмотря на его удобное географическое положение, может столкнуться с рисками, в первую очередь, политического характера, поэтому в качестве альтернативного месторасположения перевалочного комплекса целесообразно рассмотрение порта Балтийск в Калининградской области либо порта Стокгольм. Реализация проекта по размещению перевалочного комплекса в порту Мууга также, вероятнее всего, столкнется с рисками политического характера.

Стоимость проекта по размещению перевалочного комплекса в порту Копенгаген может иметь значительную величину, т.к. этот порт характеризуется недостаточным количеством свободных причальных стенок и высокой стоимостью земли в порту. Учитывая, что управление портами Копенгагена и Мальме осуществляет одна компания, в данном случае в качестве альтернативного месторасположения перевалочного комплекса может быть рассмотрен порт Мальме, расположенный на противоположном от Копенгагена берегу пролива Эресунн.

Таким образом, на основе решения задачи по определению мест расположения перевалочных комплексов бункерного топлива было установлено, что на выбор влияет географическое положение портов исследуемого региона, активность судов в портах и наличие в них подходящей инфраструктуры. Однако решению по размещению перевалочных комплексов должны предшествовать как исследования рынка бункеровки и оценка потенциального уровня спроса на газовое топливо в портах на исследуемой акватории, так и анализ действий компаний-конкурентов.

Вывод российских компаний на рынок судового газового топлива в Европе может принести серьезные дивиденды за счет получения прибыли от добавленной стоимости, как в случае поставок самого топлива, так и в случае участия в реализации его логистической и распределительной инфраструктуры.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный способ определения месторасположения перевалочных комплексов бункерного топлива может быть применен на начальных этапах обоснования состава бункеровочной инфраструктуры на исследуемой акватории. Апробация предложенного способа расчета выполнена на примере портов Балтийского моря. Предложенный способ может быть использован для оценки размещения объектов инфраструктуры других предприятий, обслуживающих суда и имеющих не фиксированный радиус обслуживания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Резолюция МЕРС. 286(71) Поправки к приложению к протоколу 1997 года об изменении Международной конвенции по предотвращению загрязнения с судов 1973 года, измененной протоколом 1978 года к ней. Поправки к Приложению VI к Конвенции МАРПОЛ (Назначение Балтийского и Северного морей в качестве районов контроля выбросов NO_x по ярусу III): принята 07.07.2017 / URL: http://rise.odessa.ua/texts/MEPC286_71.php3 (дата обращения: 26.03.2022).
2. Гаджинский А.М. Практикум по логистике — 2-е изд., перераб. и доп. — М. : Маркетинг, 2001. — 177 с.
3. Чейз Р.Б. Производственный и операционный менеджмент: [Пер. с англ.] / Ричард Б. Чейз, Николас Дж. Эквилайн, Роберт Ф. Якобе. — 8-е изд. — М. и др. : Вильямс, 2001. — 691 с.

REFERENCES

1. Resolution MEPC.286 (71) Amendments to the annex of the protocol of 1997 to amend the international convention for the prevention of pollution from ships, 1973, as modified by the protocol of 1978 relating thereto amendments to MARPOL Annex VI (Designation of the Baltic Sea and the North Sea Emission Control Areas for NO_X Tier III control) / URL: http://rise.odessa.ua/texts/MEPC286_71.php3 (accessed on: 26.03.2022).
2. Gadzhinsky A.M. *Praktikum po logistike* [Practicum on logistics] — 2nd ed., reprint. — M. Marketing, 2001. — 177 p.
3. Chase R.B. Production and operational management: [Trans. from English] / Richard B. Chase, Nicholas J. Equiline, Robert F. Jacob. — 8th ed. — M. et al. : Williams, 2001. — 691 p.



МОРЕХОДНЫЕ КАЧЕСТВА СУДОВ

УДК 629.12.073.243.4

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НЕЛИНЕЙНОГО МОМЕНТА НА ПАРАМЕТРИЧЕКУЮ БОРТОВУЮ КАЧКУ СУДНА

В.Ю. Семенова, д-р техн. наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербург, e-mail: sem_viktoria@mail.ru
Д.А. Альбаев, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербург, e-mail: albaevdanil@gmail.com

В статье рассматривается метод определения характеристик параметрической бортовой качки на основании формулы В.В. Луговского. Производится учет дополнительного нелинейного момента M_X^{24}. Приведена математическая формулировка задачи и ее решение. Приводятся расчеты параметрической качки для пяти судов различных типов — пассажирского теплохода, танкера, контейнеровоза, лесовоза и балкера — при качке на курсовых углах 60°, 90° и 120°. Для перечисленных судов проведен расчет амплитудно-частотной характеристики параметрического резонанса с учетом нелинейного момента и без него. Расчеты проводились при заданной диаграмме статической остойчивости, а частотные графики были построены на основании метода Власова. Показано значительное влияние нелинейного момента на максимальные амплитуды параметрической качки — особенно при расположении судна лагом — и необходимость его учета.

Ключевые слова: *параметрический резонанс, нелинейный момент, частотный график, диаграмма статической остойчивости, вертикальная качка*

INVESTIGATION OF THE NONLINEAR MOMENT INFLUENCE ON THE PARAMETRIC ROLLING OF A SHIP

V.Yu. Semenova, DSc, professor, St. Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, e-mail: sem_viktoria@mail.ru
D.A. Albaev, St. Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, e-mail: albaevdanil@gmail.com

The article discusses the definition of parametric roll charatecristics based on the formula of V.V. Lugovskiy. An additional non-linear moment M_X^{24} is taken into account. Mathematical formulation of the problem has been given, together with its solution. Test calculations of parametric roll for five ships of different types: passenger ship, oil tanker, container ship, timber carrier and bulk carrier — have been given. Roll calculations have been performed at heading angles of 60°, 90° and 120°. RAOs for ships have been calculated with and without non-linear moment consideration. The calculations have been carried out for a given static stability diagram with frequency graphs built based on the Vlasov method. A significant influence of non-linear moment on the maximum amplitudes of parametric rolling have shown, especially for the ship positioned in beam waves, thus demonstrating the need to take the non-linear moment.

Keywords: *parametric resonance, nonlinear moment, frequency graph, static stability diagram, heave*

ВВЕДЕНИЕ

В работе [4] В.В. Луговским было рассмотрено влияние вертикальной качки на бортовую, а также выведены основные зависимости. Расчет главного параметрического резонанса можно провести либо путем численного интегрирования системы нелинейных дифференциальных уравнений качки соответствующих математической модели [3], либо с помощью аналитических зависимостей, полученных в результате приближенного решения нелинейного дифференциального уравнения бортовой качки, сопровождающейся линейной продольной и поперечно-горизонтальной качкой, одним из методов нелинейной механики, например, методом гармонического баланса [1]. И в том, и в другом случае следует по возможности точнее учесть влияние конечности амплитуд бортовой качки не только на ее кинематические, но и гидромеханические характеристики, особенно на возмущающий и демпфирующий моменты, которые, в основном, и определяют величину резонансной амплитуды.

Повышение точности разложений в ряды по малым параметрам в гидродинамической задаче о качке конечной амплитуды ведет к существенному усложнению граничных условии как на смоченной поверхности судна, так и на свободной поверхности жидкости и, по существу, является самостоятельной проблемой нелинейной гидродинамической теории качки.

Однако выполненные за последние сорок лет теоретико-расчетные исследования и многочисленные модельные испытания убедительно показывают, что на бортовую качку в режиме главного параметрического резонанса в первом приближении, когда колебания близки к гармоническим, влияет только та часть возмущающего момента, которая определяется в рамках гипотезы А.Н. Крылова, а его дифракционные компоненты могут не учитываться. Это дает физические основания увеличить точность разложении в ряды показательных тригонометрических функций, входящих в выражение момента сил давления набегающих волн на смоченную поверхность качающегося судна, доведя ее до $\alpha_0\theta^3$ включительно. Именно с такой степенью точности в статье [6] определен возмущающий момент при бортовой качке судна с заданной диаграммой остойчивости на косых курсах по отношению к регулярному волнению.

1. ОПИСАНИЕ МЕТОДА РАСЧЕТА

Проведя корректировку соответствующих формул и приводя их к принятому в VI главе справочника [7], после несложных преобразований В.В. Луговским была получена новая нелинейная добавка к возмущающему моменту для прямостенного судна, обводы которого аппроксимированы параболами:

$$\overline{M}_X^{24} = \frac{r}{3T}\varkappa_\beta^{II} + \frac{a}{6T}\varkappa_\beta^{I} - kT[1{,}33\psi_1 + \frac{z_p}{T}(1{,}33\ \frac{z_w}{T}\varkappa_\beta^{I} - 0{,}67\psi_5)] + \frac{(kT)^2}{2}[4{,}5\psi_2 - 8{,}5(B/T)^2\psi_4 - 4{,}5\frac{z_p}{T}\psi_1] -$$
$$-\frac{(kT)^3}{6}[10{,}65\psi_3 - \frac{z_p}{T}(10{,}65\psi_2 - 2{,}64(B/T)^2\psi_4)]; \qquad (1)$$

$$\left.\begin{aligned}
\psi_1 &= (B/T)^2 f_2(\alpha)\,\frac{p_4(\chi)}{\chi}\,\varkappa_\beta^{II} - p_1(\chi)\varkappa_\beta^{I},\\
\psi_2 &= (B/T)^2 f_2(\alpha)\,\frac{p_5(\chi)}{\chi}\,\varkappa_\beta^{II} - p_2(\chi)\varkappa_\beta^{I},\\
\psi_3 &= (B/T)^2[f_2(\alpha)\,\frac{p_6(\chi)}{\chi} - f_4(\alpha)\,\frac{p_7(\chi)}{\chi}]\varkappa_\beta^{II} - p_3(\chi)\varkappa_\beta^{I},\\
\psi_4 &= (B/T)^2\,\frac{f_4(\alpha)}{\chi}\,\varkappa_\beta^{III},\\
\psi_5 &= (B/T)^2\,\frac{f_2(\alpha)}{\chi}\,\varkappa_\beta^{II},
\end{aligned}\right\} \qquad (2)$$

а коэффициенты полноты $f_i(\alpha)$ и $p_i(\chi)$ определяются формулами:

$$\left.\begin{aligned}
&f_2(\alpha)=\frac{\alpha^2}{2(\alpha+1)(2\alpha+1)};\\
&f_4(\alpha)=\frac{3\alpha^4}{2(\alpha+1)(2\alpha+1)(3\alpha+1)(4\alpha+1)};\\
&p_1(\chi)=\frac{1}{3(3-2\chi)};\ p_2(\chi)=\frac{1}{4(4-3\chi)};\ p_3(\chi)=\frac{1}{5(5-4\chi)};\\
&p_4(\chi)=1-3(1-\chi)+\frac{3(1-\chi)}{1+\chi}-\frac{1-\chi}{1+2\chi};\\
&p_5(\chi)=3\Big[1/2-+\frac{3(1-\chi)}{2-\chi}+\frac{3(1-\chi)}{1+\chi}-\frac{1-\chi}{1+2\chi}\Big];\\
&p_6(\chi)=6\Big[1/3-+\frac{3(1-\chi)}{3-2\chi}+\frac{3(1-\chi)}{3-\chi}-\frac{1-\chi}{3}\Big];\\
&p_7(\chi)=1-5(1-\chi)+\frac{10(1-\chi)}{1+\chi}-\frac{10(1-\chi)}{1+2\chi}+\frac{5(1-\chi)}{1+3\chi}-\frac{1-\chi}{1+4\chi}.
\end{aligned}\right\} \qquad (3)$$

Более того, учет влияния вертикальной качки на восстанавливающий момент также изменится и с точностью до θ^3 включительно, кроме обычно учитываемого линейного члена, пропорционального $z_p\zeta_{gm}\theta$, появляется соответствующая нелинейная добавка, пропорциональная $z_p\zeta_{gm}\theta^3/6$. В итоге часть момента сил давления воды, которая обуславливает параметрический резонанс, с точностью до $\alpha_0\theta^3$ включительно запишется в виде

$$(M_{X_1}+M_{X_2})^{\text{пар.}}=-\rho gSz_p(\theta-\theta^3/6)+\Big[\rho gSz_p\zeta_A\theta(\varkappa_\beta^I-\varkappa_\beta^I(k_1^2J_X)/2S)-$$
$$-DT\alpha_0(\overline{M}_X^{23}\theta+\overline{M}_X^{24}\theta^3)\Big]\cos\sigma t. \qquad (4)$$

Здесь ζ_{gm} — амплитуда вертикальной качки.

Для оценки влияния нелинейных добавок в общем случае качки «конечного» судна, идущего под произвольным курсовым углом к волнению, нужно рассчитать $\overline{M}_X^{24}$ в соответствии с (1) при различных характеристиках формы корпуса и нагрузках на разных курсовых углах в зоне кажущихся частот σ, близких к удвоенной собственной частоте $2\omega_\theta$, вычисленной с учетом нелинейности диаграммы остойчивости.

Используя предложенный в главе VI книги [5] метод последовательных приближений в комбинации с принципом гармонического баланса, последовательно решаем линейное дифференциальное уравнение вертикальной качки, сопровождающейся килевой, и нелинейное уравнение бортовой качки, сопровождающейся линейной вертикальной и поперечно-горизонтальной качкой. Тогда в первом приближении, когда параметрические бортовые колебания близки к гармоническим: $\theta=\theta_m\ \sin(\sigma t/2+\delta_\theta)$, опуская довольно громоздкие промежуточные выкладки, получим стационарную зависимость между амплитудой качки и частотой набегающих волн в виде:

$$(\sigma_1/2)^2=\omega_\theta^2(\theta_m)-2f_1^2(\theta_m)/(\theta_m^2)\pm\sqrt{\alpha_0^2/4\left\{(\zeta_{gm}/\zeta_A)^2(z_p/\chi T)^2(1-\theta_m^2/12)+\Big[\frac{z_p}{T}d_2+kT(\overline{M}_X^{23}+\overline{M}_X^{24}\theta^2/2)\Big]^2-\right.}$$
$$\left.-2\Big[\frac{z_p}{T}d_2+kT(\overline{M}_X^{23}+\overline{M}_X^{24}\theta^2/2)\Big]\times\zeta_{gm}/\zeta_A\times z_p/\chi T\times h_0/\zeta_A\times\cos\delta_\zeta\right\}\omega_\theta^4/(kh_0)^2-4\omega_\theta^2(\theta_m)f_1^2(\theta_m)/(\theta_m^2)+4f_1^4(\theta_m)/\theta_m^4). \qquad (5)$$

Зависимость для определения резонансной амплитуды качки в режиме главного параметрического резонанса, вызванного относительной вертикальной качкой и участием судна в редуцированном орбитальном движении, на любых курсах по отношению к волнению:

$$4\omega_\theta^2(\theta_m)=(\alpha_0/2)^2\omega_\theta^4/(kh_0)^2\theta_m^2/f_1^2(\theta_m)\left\{(\zeta_{gm}/\zeta_A)^2(z_p/\chi T)^2(1-\theta_m^2/12)+\Big[\frac{z_p}{T}d_2+kT(\overline{M}_X^{23}+\overline{M}_X^{24}\theta^2/2)\Big]^2-\right.$$
$$\left.-2\Big[\frac{z_p}{T}d_2+kT(\overline{M}_X^{23}+\overline{M}_X^{24}\theta^2/2)\Big]\times\zeta_{gm}/\zeta_A\times z_p/\chi T\times h_0/\zeta_A\times\cos\delta_\zeta\right\}+4f_1^2(\theta_m)/\theta_m^2). \qquad (6)$$

Здесь, так же, как и в выражении (5) определение момента $\overline{M}_X^{23}$ и коэффициента d_2 производится по следующим формулам:

$$\begin{aligned}&\overline{M}_X^{23} = \varkappa_\beta^{II} r/T - \varkappa_\beta^I a/T - kT\left\{\varkappa_\beta^{II}(B/T)^2 f_2/\chi\left[p_4(1+\sin^2\beta) - (z_p/T)\sin^2\beta\right] - \varkappa_\beta^I[p_1(1+\sin^2\beta) - 2(z_p z_w)/T^2]\right\} + \\ &+ (kT)^2/2\left[\varkappa_\beta^{II}(B/T)^2 \frac{f_2 p_5}{\chi}(2+7\sin^2\beta) - \varkappa_\beta^I p_2(1+\sin^2\beta) - \varkappa_\beta^{III}(B/T)^4 \frac{f_4}{\chi}\sin^2\beta\right] - (kT)^3/6 \times \\ &\times\left[\varkappa_\beta^{\text{II}}(B/T)^2 \frac{f_2 p_6}{\chi}(1+6\sin^2\beta+\sin^4\beta)/2 - \varkappa_\beta^I p_3(1+3\sin^2\beta) - \varkappa_\beta^{III}(B/T)^4 \frac{f_4 p_5}{\chi}\sin^2\beta(3+\sin^2\beta)\right].\end{aligned} \tag{7}$$

Определение амплитуды вертикальной качки, входящей в выражение (5), производится на основании решения системы дифференциальных уравнений вертикальной и килевой качки:

$$\left.\begin{aligned}&(D/g+\lambda_{33k})\ddot{\zeta}g + \nu_{33k}\dot{\zeta}_g + \rho g S_0 \zeta_g - \lambda_{35k}\ddot{\psi} - (\nu_{35k} - \nu_0\lambda_{35k})\psi - \\ &-(\rho g S_0 x_f - \nu_0\nu_{33k})\psi = r_0(\rho g a_0 - \omega b_0' - \omega^2 a_0'')\cos\omega_k t - r_0(\rho g b_0 - \omega a_0' - \omega^2 b_0'')\sin\omega_k t, \\ &(J_y+\lambda_{35k})\ddot{\psi} + (\nu_{55k} - \frac{\nu_0^2}{\omega^2}\nu_{35k})\psi + (DH_0 - \nu_0^2\lambda_{35k})\psi - \lambda_{35k}\ddot{\zeta}_g - (\nu_{35k}+\nu_0\lambda_{33k})\dot{\zeta}_g - \\ &-(\rho g S_0 x_f - \nu_0\nu_{35k})\zeta_g = -r_0(\rho g a_1 - \omega b_1' - \omega^2 a_1'')\cos\omega_k t + r_0(\rho g b_1 - \omega a_1' - \omega^2 b_1'')\sin\omega_k t.\end{aligned}\right\} \tag{8}$$

Коэффициенты системы рассчитывались на основании работ [2]:

$$\left.\begin{aligned}&\varkappa_\beta^I = \sum_{i=0}^{\infty}(-1)^i \frac{u^{2i}}{(2i+1)!}\frac{1}{\alpha+(2i+1)(1-\alpha)}; \\ &\varkappa_\beta^{II} = \sum_{i=0}^{\infty}(-1)^i \frac{u^{2i}}{(2i+1)!}\frac{\alpha+1}{\alpha+(2i+1)(1-\alpha)}\frac{2\alpha+1}{[2\alpha+(2i+1)(1-\alpha)][3\alpha+(2i+1)(1-\alpha)]}; \\ &\varkappa_\beta^{III} = \sum_{i=0}^{\infty}(-1)^i \frac{u^{2i}}{(2i+1)!}\frac{\alpha+1}{\alpha+(2i+1)(1-\alpha)}\frac{2\alpha+1}{[2\alpha+(2i+1)(1-\alpha)][3\alpha+(2i+1)(1-\alpha)]}\times \\ &\quad\times\frac{(3\alpha+1)(4\alpha+1)}{[4\alpha+(2i+1)(1-\alpha)][5\alpha+(2i+1)(1-\alpha)]} \\ &u = \frac{L}{2T}kT\cos\beta.\end{aligned}\right\} \tag{9}$$

2. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

На основании изложенного метода были проведены расчеты для пяти типов судов: теплохода, танкера, контейнеровоза, лесовоза и балкера, — основные характеристики которых приведены в табл. 1.

Таблица 1

Судно	L, м	B, м	T, м	H, м	δ	z_c, м	r, м	h_0, м
Теплоход «Любовь Орлова»	90	16,2	4,65	7	0,598	2,54	4,365	1,18
Танкер «Баскунчак»	74	12	4,65	7,6	0,646	2,529	2,65	1
Контейнеровоз «Художник Сарьян»	157,2	25,4	9,22	16,8	0,56	5,074	5,6	2,74
Балкер «Капитан Панфилов»	134	20,6	9,4	13,5	0,78	4,94	3,94	1,45
Лесовоз «Николай Новиков»	140	21	8,68	11,57	0,74	4,55	4,13	2,31

Для перечисленных судов был проведен расчет амплитудно-частотной характеристики параметрического резонанса с учетом нелинейного момента M_X^{24} и без него. Расчеты проводились при заданной диаграмме статической остойчивости, а частотные графики были построены на основании метода Власова [2].

При расчете был использован квадратичный закон демпфирования. Коэффициент квадратичного сопротивления определялся на основании формулы Авдеева — Анфимова [2]. Расчеты проводились для курсовых углов: 60°, 90° и 120° и представлены на рис. 1 — 15.

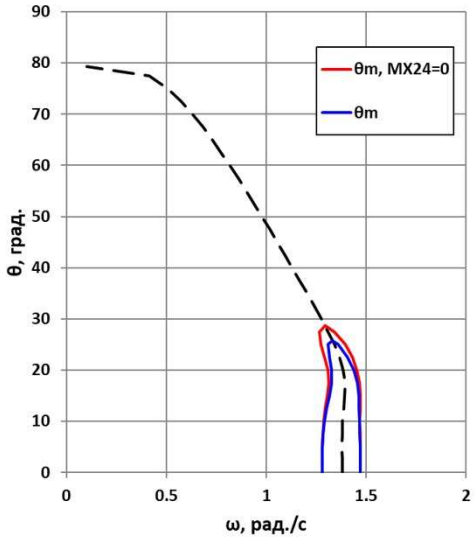


Рис. 1 АЧХ параметрической бортовой качки лесовоза «Николай Новиков» при курсовом угле 60°

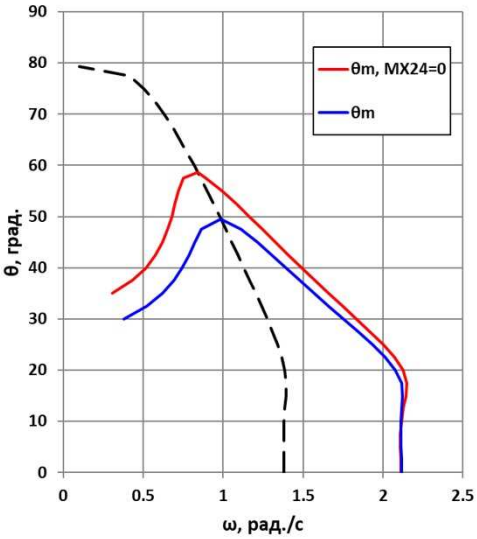


Рис. 2 АЧХ параметрической бортовой качки лесовоза «Николай Новиков» при курсовом угле 90°

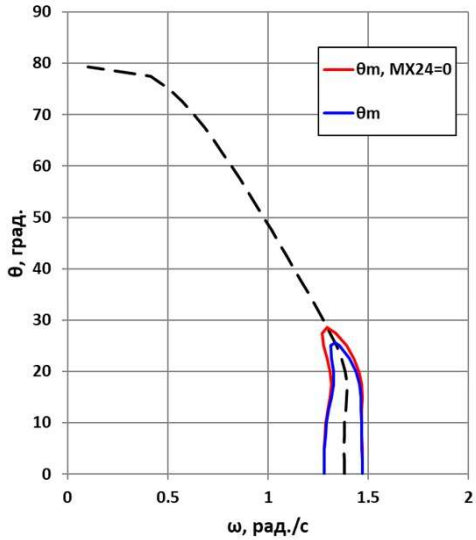


Рис. 3 АЧХ параметрической бортовой качки лесовоза «Николай Новиков» при курсовом угле 120°

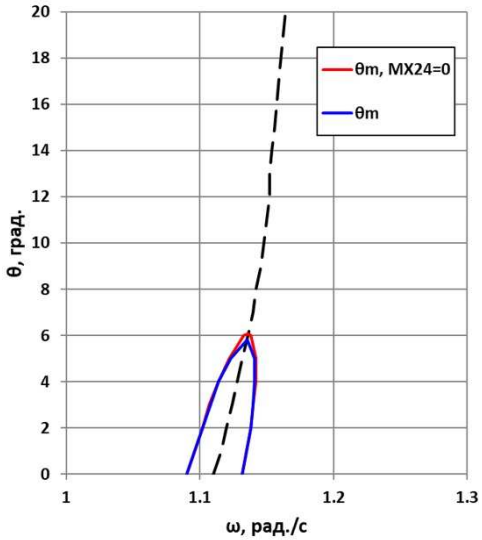


Рис. 4 АЧХ параметрической бортовой качки контейнеровоза «Художник Сарьян» при курсовом угле 60°

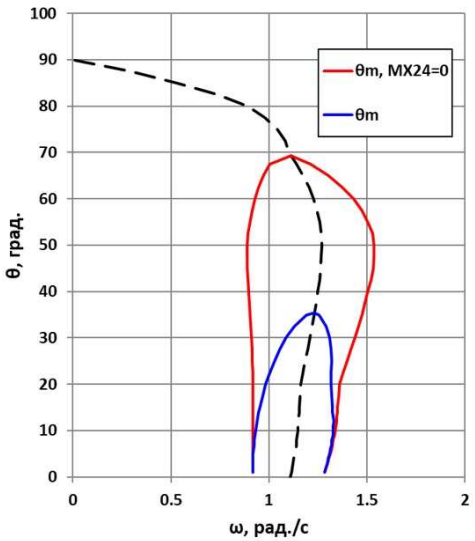


Рис. 5 АЧХ параметрической бортовой качки контейнеровоза «Художник Сарьян» при курсовом угле 90°

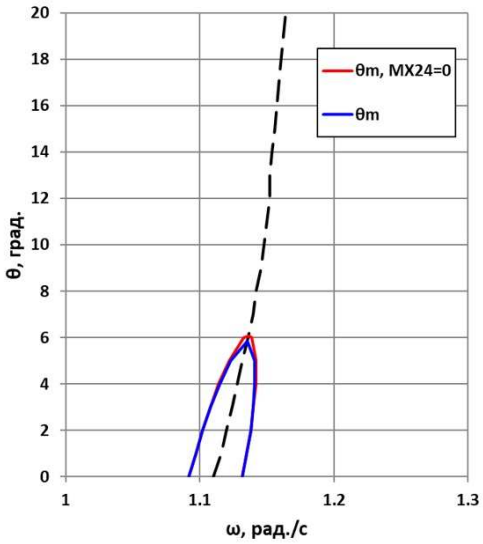


Рис. 6 АЧХ параметрической бортовой качки контейнеровоза «Художник Сарьян» при курсовом угле 120°

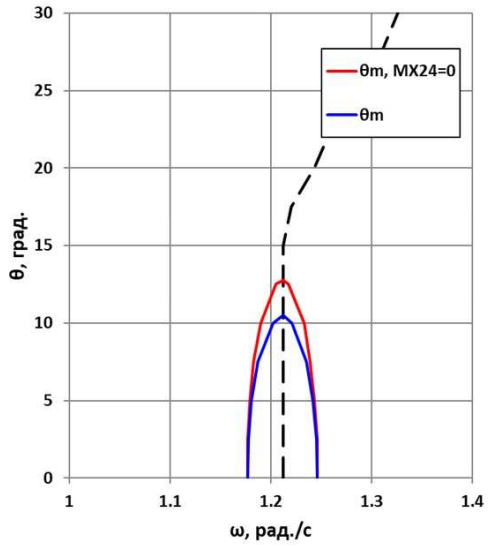


Рис. 7 АЧХ параметрической бортовой качки теплохода «Любовь Орлова» при курсовом угле 60°

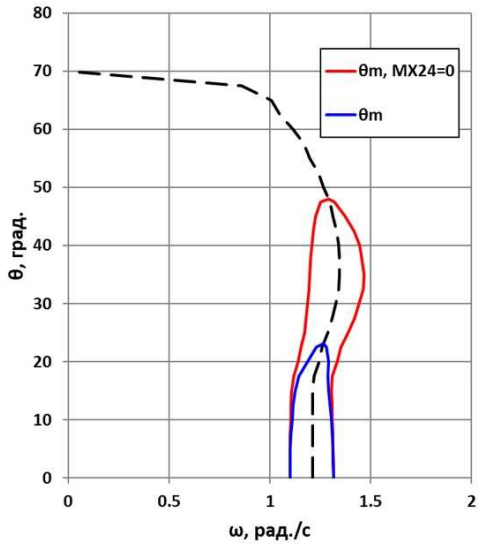


Рис. 8 АЧХ параметрической бортовой качки теплохода «Любовь Орлова» при курсовом угле 90°

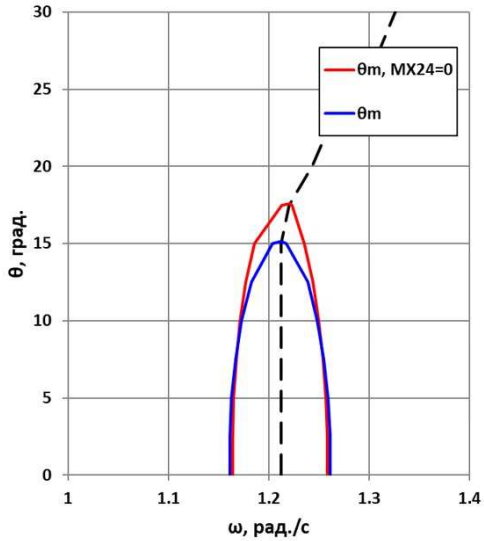


Рис. 9 АЧХ параметрической бортовой качки теплохода «Любовь Орлова» при курсовом угле 120°

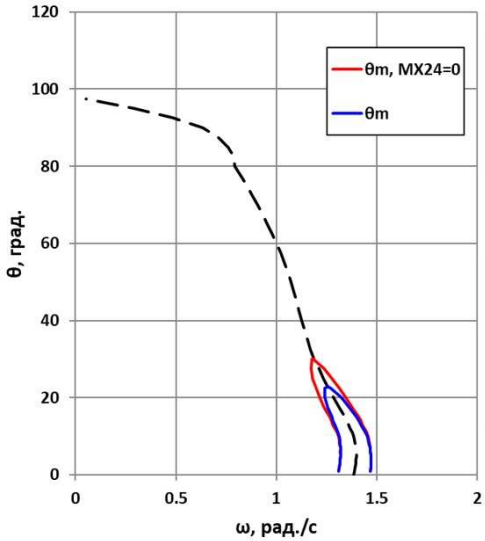


Рис. 10 АЧХ параметрической бортовой качки танкера «Баскунчак» при курсовом угле 60°

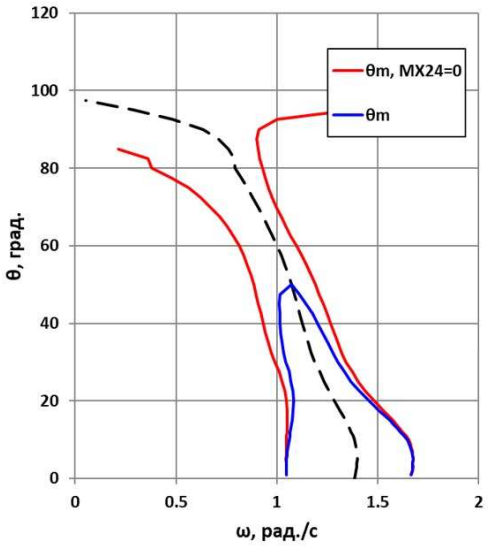


Рис. 11 АЧХ параметрической бортовой качки танкера «Баскунчак» при курсовом угле 90°

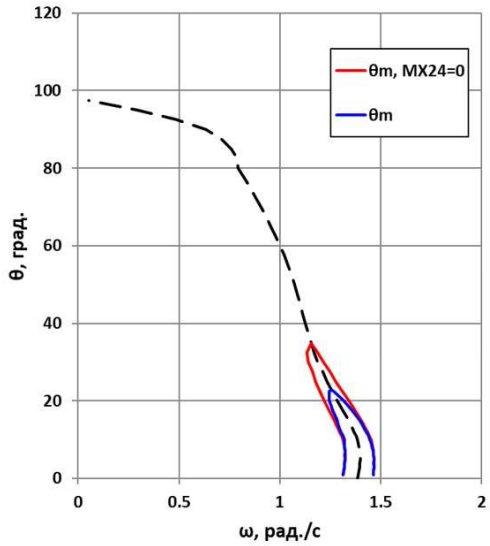


Рис. 12 АЧХ параметрической бортовой качки танкера «Баскунчак» при курсовом угле 120°

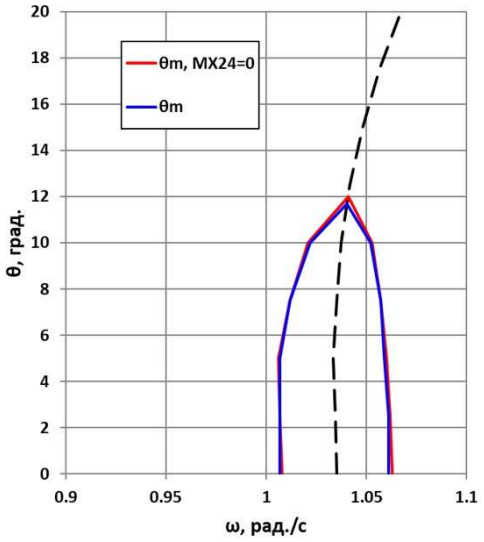


Рис. 13 АЧХ параметрической бортовой качки балкера «Капитан Панфилов» при курсовом угле 60°

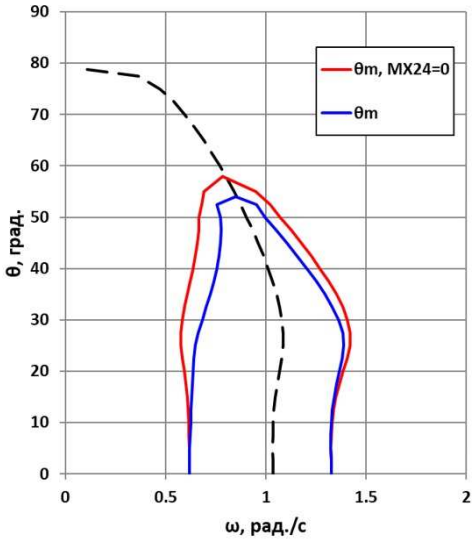


Рис. 14 АЧХ параметрической бортовой качки балкера «Капитан Панфилов» при курсовом угле 90°

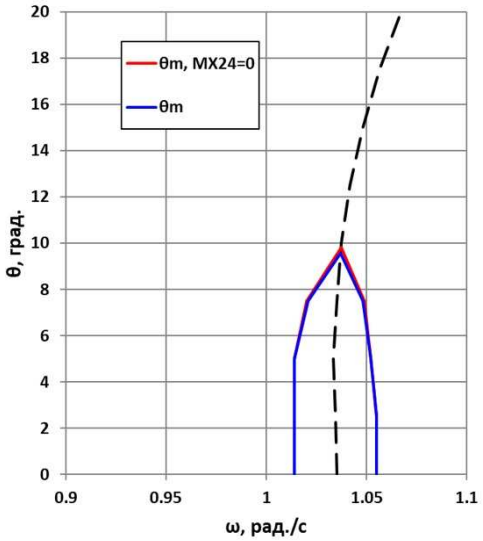


Рис. 15 АЧХ параметрической бортовой качки балкера «Капитан Панфилов» при курсовом угле 120°

Анализ полученных результатов показал, что параметрическая бортовая качка возникает для всех пяти судов на рассмотренных курсовых углах 60°, 90° и 120°. При этом наибольшие амплитуды имеют место при расположении судна лагом. Так, для контейнеровоза «Художник Сарьян» максимальная амплитуда параметрической качки достигает 35° при курсовом угле 90° (см. рис. 5). На курсовых углах 60° и 120° максимальные амплитуды равны и составляют 5,5 градусов (см. рис. 4 и 6).

Для танкера «Баскунчак» при расположении лагом максимальная амплитуда параметрической качки составляет 50° (см. рис. 11), а на косых углах — 22° (см. рис. 10 и 12).

Влияние нелинейного момента MX24 наибольшим образом проявляется также при расположении судна лагом. Учет данного момента в выражении (6) приводит в ряде случаев к значительному уменьшению амплитуды параметрической качки. Например, для контейнеровоза «Художник Сарьян» отмечается двукратное уменьшение амплитуд. Без учета нелинейного момента M_X^{24} максимальная амплитуда составляет 70°, с его учетом 35° (см. рис. 5).

Также, двукратное уменьшение амплитуд параметрической качки наблюдается и у контейнеровоза «Любовь Орлова» (см. рис. 8). Амплитудно-частотная характеристика параметрической качки танкера «Баскунчак» без учета нелинейного момента M_X^{24} вообще не имеет максимума, что может быть объяснено низким значением коэффициента демпфирования. На косом встречном угле 120° максимальная амплитуда параметрической качки данного судна без учета M_X^{24} составляет 35°, с его учетом — 22° (см. рис. 12)

Значительно ниже влияние нелинейного момента M_X^{24} проявилось при расчетах параметрической качки лесовоза «Николай Новиков» и балкера «Капитан Панфилов» (см. рис. 2, 14 и 15). На косых углах 60° и 120° влияние момента M_X^{24} для этих судов практически не проявляется.

Анализ полученных результатов также показал, что влияние нелинейного момента M_X^{24} распространяется только на значения амплитуд параметрической качки. На зону действия параметрического резонанса данный момент не влияет. Она остается такой же, как и без учета данного нелинейного момента (рис. 5, 8 и 11). При этом, наиболее широкие зоны действия имеют место для всех судов также при расположении лагом.

Таким образом, применение формулы В.В. Луговского (6), учитывающей не только вертикальную качку, но и дополнительный нелинейный момент M_X^{24}, позволяет значительным образом уточнить результаты расчета.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Боголюбов Н.Н., Крылов Н.М. Введение в нелинейную механику //Изд-во АН УССР, Киев. — 1937.
2. Луговский В.В. Качка корабля. СПб, 1999.
3. Луговский В.В. Математические модели для исследования устойчивости нелинейной качки судов на волнении. Труды Междунар. симп. По гидродинамике судна, СПб, 1995, с. 83 — 91.
4. Луговский В.В. Некоторые вопросы нелинейной теории качки, связанные с обеспечением остойчивости судна на волнении. СПБГМТУ 2008, с. 93 — 114.
5. Луговский В.В. Нелинейные задачи мореходности корабля Л., Судостроение, 1966.
6. Луговский В.В. Теория и приближенный расчет бортовой качки судна с заданной диаграммой остойчивости на косых углах по отношению к волнению. // НТО Судпрома. Сб. статей № 39. Л., 1961, с. 117 — 136.
7. Справочник по теории корабля, т. 2. / (под редакцией Я.И. Войткунского) Л., Судостроение, 1985.

REFERENCES

1. Bogolyubov N.N., Krylov N.M. *Vvedenie v nelineynuyu mekhaniku* [Introduction into non-linear mechanics] //Izd-vo AN USSR, Kiev. — 1937.
2. Lugovskiy V.V. *Kachka korablya* [Ship motions] SPb, 1999.
3. Lugovskiy V.V. *Matematicheskie modeli dlya issledovaniya ustoychivosti nelineynoy kachki sudov na volnenii* [Mathematical models to describe the stability of non-linear ship motions in waves] Publ. of International Ship Hydrodynamics Symposium, SPb, 1995, pp. 83 — 91.
4. Lugovskiy V.V. *Nekotorye voprosy nelineynoy teorii kachki, svyazannye s obespecheniem ostoychivosti sudna na volnenii* [Some aspects of non-linear ship motions theory related to ship stability], SPBGMTU 2008, pp. 93 — 114.
5. Lugovskiy V.V. *Nelineynye zadachi morekhodnosti korablya* [Aspects of non-linear ship motions], L., Sudostroenie, 1966.
6. Lugovskiy V.V. *Teoriya i priblizhenny raschet bortovoy kachki sudna s zadannoy diagrammoy ostoychivosti na kosykh uglakh po otnosheniyu k volneniyu* [Theory and approximate calculations of ship roll motions with given stability diagram for quartering seas] // NTO Sudproma. Collection of articles No. 39. L., 1961, pp. 117 — 136.
7. *Spravochnik po teorii korablya* [Ship theory reference book], Vol. 2. / (ed. Ya.I. Voytkunsky) L., Sudostroenie, 1985.

УДК 629.5.015.1

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ОПЫТА КРЕНОВАНИЯ ПОДВОДНЫХ ЛОДОК С ПОМОЩЬЮ ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ УГЛОМЕРНЫХ ПРИБОРОВ

М.А. Мурашов, АО «ЦКБ МТ «Рубин», Санкт-Петербург, e-mail: mmurashov@yandex.ru
Д.О. Веретенников, АО «ЦКБ МТ «Рубин», Санкт-Петербург, e-mail: vdmitry@mail.ru
М.Ю. Михеев, АО «ЦКБ МТ «Рубин», Санкт-Петербург, e-mail: maxfc@mail.ru
А.А. Гоманцов, АО «ЦКБ МТ «Рубин», Санкт-Петербург, e-mail: terekshero@gmail.com
П.В. Прудников, АО «ЦКБ МТ «Рубин», Санкт-Петербург, e-mail: pprudnikov@list.ru

Кренование является одним из важнейших этапов испытаний подводных лодок (ПЛ) и надводных кораблей. Целью кренования является определение поперечной метацентрической высоты, которая характеризует остойчивость заказа, и приведение ее значения к проектному за счет изменения центра тяжести по высоте с помощью перемещения твердого балласта. В основе кренования — определение приращений углов наклонения. Точность измерения углов наклонения напрямую влияет на точность определения поперечной метацентрической высоты и остойчивости в целом. В статье приведены результаты практического применения нового, защищенного патентом, устройства регистрации и способа обработки углов наклонения ПЛ в период приемо-сдаточных испытаний — электронного угломерного прибора «ЭУ-1». Произведено сравнение с ближайшими аналогами.

Ключевые слова: *угломер, кренование, крен, остойчивость, электронный, оптический, подводная лодка, испытания*

IMPROVING THE QUALITY OF THE INCLINATION TEST WITH THE HELP OF ELECTRONIC ANGULAR INSTRUMENTS

M.A. Murashov, JSC "CDB ME "Rubin", St. Petersburg, e-mail: mmurashov@yandex.ru
D.O. Veretennikov, JSC "CDB ME "Rubin", St. Petersburg, e-mail: vdmitry@mail.ru
M.Yu. Mikheev, JSC "CDB ME "Rubin", St. Petersburg, e-mail: maxfc@mail.ru
A.A. Gomantsov, JSC "CDB ME "Rubin", St. Petersburg, e-mail: terekshero@gmail.com
P.V. Prudnikov, JSC "CDB ME "Rubin", St. Petersburg, e-mail: pprudnikov@list.ru

Inclination test is one of the most critical test phases for submarines and vessels. Its purpose is to determine the transverse metacentric height that characterizes the stability of the ship, and to adjust its value to the design value by changing the center of gravity of the ship via application of solid ballast. The basis of the inclination test is to determine the increments in inclination angles. The accuracy of angles measurements directly affects the accuracy of transverse metacentric height determination and stability of the ship as a whole. The article presents the results of practical application of new patent-protected recording instrument. In addition, method to process submarine inclination angles during the acceptance trials has been given, using the instrument under review, namely, the EU-1 electronic angle-measuring instrument. The article also provides comparisons with nearest analogues.

Keywords: *angle measuring instrument, inclination test, list, stability, electronic, optical, submarine, tests*

ВВЕДЕНИЕ

Суть метода кренования заключается в определении приращений углов крена при перемещении крен-балласта с одного борта на другой и вычислении с учетом полученных данных значения поперечной метацентрической высоты h [4, с. 83, 2, 7].

$$h = \frac{M_{кр}}{D \sin \Delta\theta}, \quad (1)$$

где h — поперечная метацентрическая высота ПЛ в подводном положении, м;
$M_{кр}$ — кренящий момент от перемещения крен-балласта, тм;
D — массовое водоизмещение ПЛ, т;
$\Delta\theta$ — изменение угла крена в процессе перемещения крен-балласта, град.

В настоящее время кренование на ПЛ, как правило, проводится с помощью:

весков (см. рис. 1) — вертикально подвешенные отвесы длиной 3 — 5 м с грузиками на конце, помещенные в емкость с водой или маслом с установленной линейкой для снятия значений перемещений веска;

оптических угломеров, например, «ОУ-2»;

иных приборов визуального контроля углов крена.

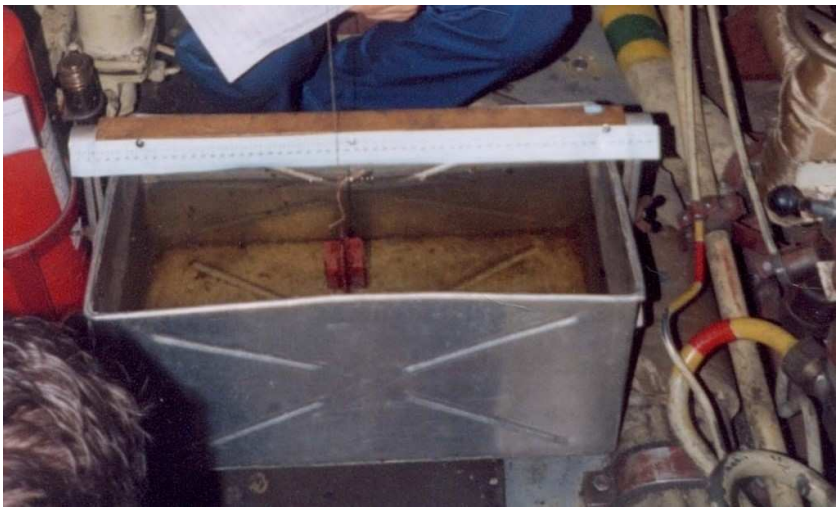


Рис. 1 Проведение кренования с помощью веска, качающегося в бачке с жидкостью (водой или маслом)

Перечисленные выше устройства имеют ряд недостатков.

1. Трудоемкая, ручная запись данных и отсутствие автоматизации.
2. На каждом приборе задействованы по два человека (один для непрерывного снятия показаний приборов, второй для ручной записи на бланках методик или в блокнотах).
3. Субъективность визуального контроля и фиксации показаний, особенно в реальных морских условиях при наличии волнения.
4. Невозможность записи и передачи цифрового массива данных для обработки на ЭВМ.
5. Угломеры «ОУ-2» сняты с производства (серийно выпускались на Киевском заводе «Арсенал» им. В.И. Ленина).
6. Проведение экспресс-оценки качества полученных результатов для подтверждения возможности завершения испытаний затруднено.

КОНСТРУКЦИЯ ЭЛЕКТРОННОГО УГЛОМЕРНОГО ПРИБОРА

С целью исключения ошибок регистрации углов наклонения, автоматизации записи данных, сокращения задействованных специалистов и устранения прочих недостатков был разработан и запатентован [8] электронный угломерный прибор «ЭУ-1» (см. рис. 2) и программный комплекс «Кренование».

Основной составляющей прибора является прецизионный датчик угла наклона — инклинометр. Так как при разработке прибора приоритет отдавался комплектующим отечественного производства, установленный на макетном образце немецкий датчик-инклинометр MEAS (HL-Planar) NS-5/PI, на опытном образце был заменен на отечественный аналог ИН-Д3Ц разработки НТП «Горизонт», г. Москва, который показал чуть более высокую точность и практически отсутствие собственного дрейфа нуля показаний.

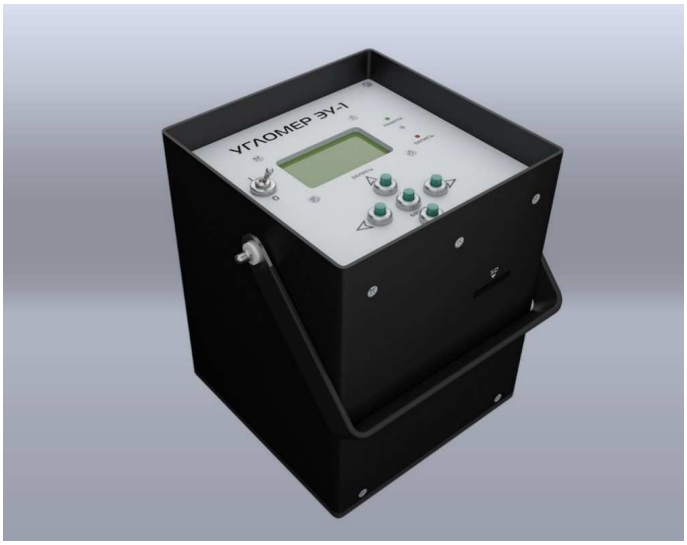


Рис. 2 Электронный угломерный прибор «ЭУ-1»

В состав прибора входят аналого-цифровой преобразователь и вычислительный блок (см. рис. 3). Зарегистрированные и математически обработанные данные отображаются на встроенном в корпус дисплее вывода результатов.

В связи со значительной продолжительностью опыта кренования была предусмотрена возможность работы «ЭУ-1» как от автономного источника электропитания, так и от штатной сети 220 В.

По результатам климатических испытаний во ВНИИМ им. Д.И. Менделеева и испытаний на утверждение типа средств измерений прибор внесен в Государственный Реестр средств измерений.

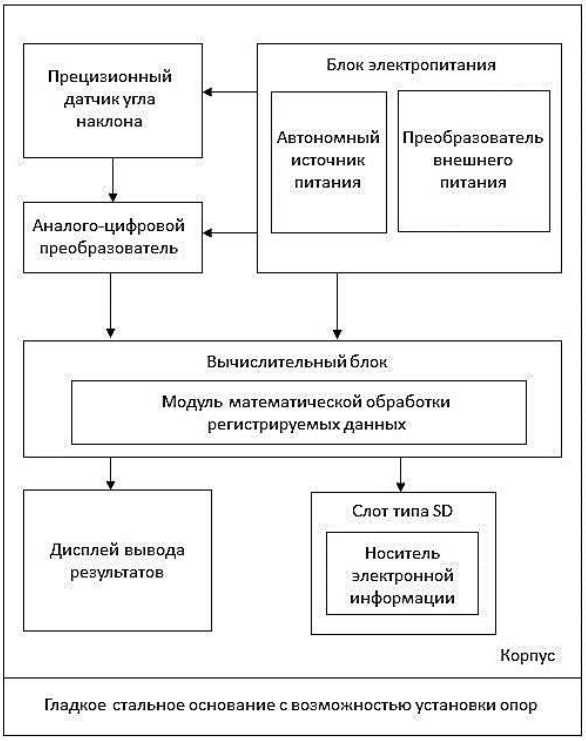


Рис. 3 Структурная схема «ЭУ-1»

ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОННОГО УГЛОМЕРА

В 2018 и 2019 гг. в акватории Белого моря в процессе заводских ходовых испытаний двух ремонтируемых ПЛ ВМС Индии и отечественной ПЛ для регистрации углов наклонения были использованы «ЭУ-1». В ходе одного из испытаний параллельно с «ЭУ-1» применялись оптические угломеры «ОУ-2». Всего было проведено 3 серии (повторения) кренования (см. рис. 4 и 5).

Таблица 1

Зафиксированные углы крена

Серия	Оптический угломер «ОУ-2», град			Электронный угломер «ЭУ-1», град		
	1	2	3	1	2	3
1	0,931	0,987	0,986	0,957	0,979	0,984
2	0,978	0,982	0,975	0,955	0,982	0,974
3	0,964	0,970	0,965	0,946	0,964	0,966

Как видно из рис. 4, 5 и табл. 1, в первой серии наклонений разница между показаниями оптических угломеров достигает 6 %, что говорит о возможном влиянии человеческого фактора на появление погрешностей измерений. С другой стороны, показания трех электронных угломеров, производивших замеры одновременно с оптическими, коррелируются между собой по характеру кривой, а максимальная разница не превышает 2,8 %.

На практике свою эффективность подтвердили вычисляемые в модуле математической обработки амплитуды качки Ам и отклонения математического ожидания угла наклонения *Mt*. Отображение на дисплее «ЭУ-1» (см. рис. 6) текущего значения Ам в требуемом диапазоне и выход на установившийся режим параметра *Mt* позволили точно определять возможность начала и допустимость окончания записи, что было невозможно делать с помощью обычных оптических приборов и весков.

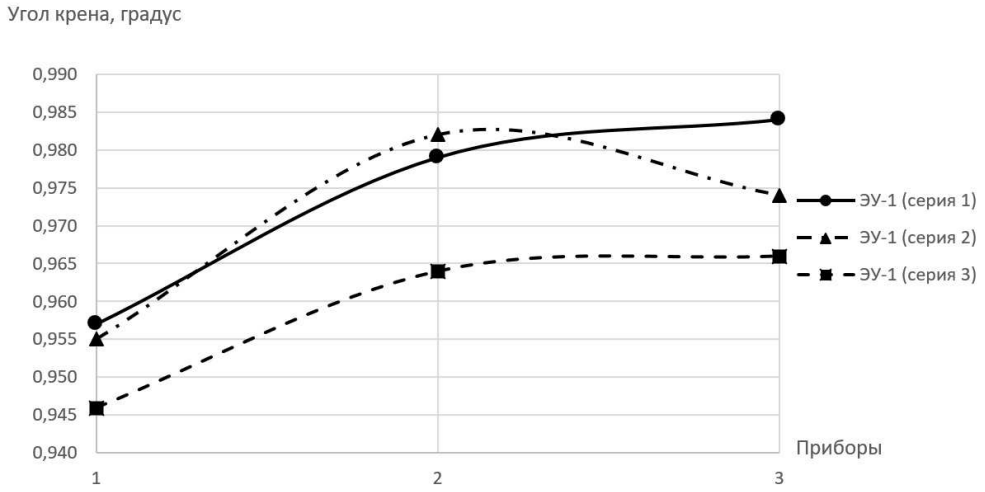


Рис. 4 Углы наклонения, зафиксированные «ЭУ-1»

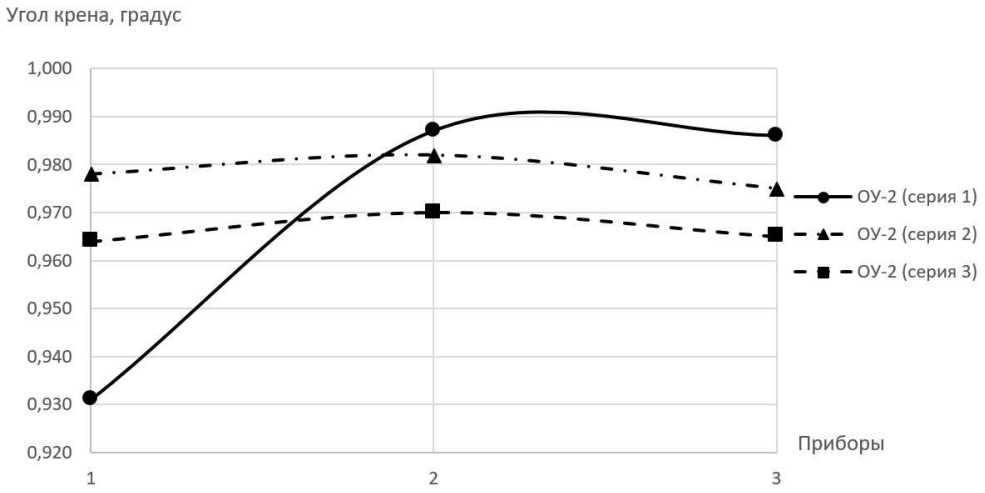


Рис. 5 Углы наклонения, зафиксированные «ОУ-2»

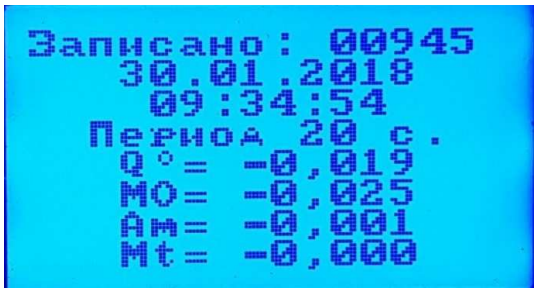


Рис. 6 Отображение регистрируемых параметров

В связи с кратно превосходящим числом регистрируемых «ЭУ-1» значений углов наклонения (см. рис. 7) в процессе каждого замера по сравнению с оптическим или маятниковым угломерами (см. табл. 2), соответственно 400 и 20 ÷ 40 значений, удалось добиться повышения точности определения угла наклонения и, как следствие, качества опыта кренования.

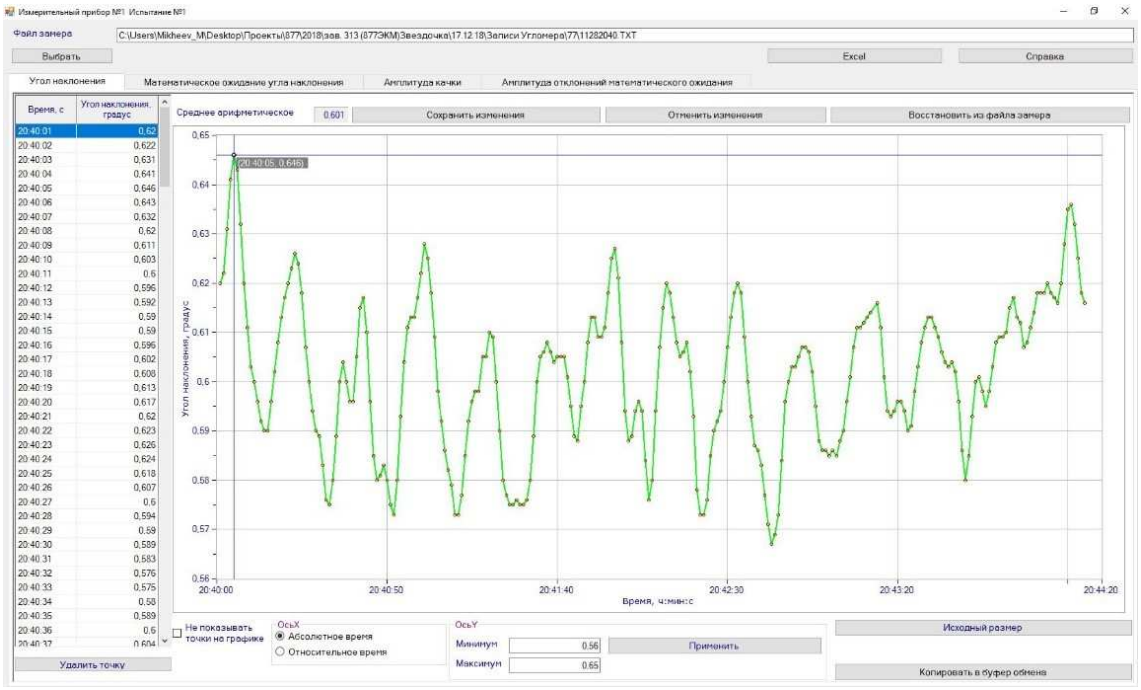


Рис. 7 Регистрируемые «ЭУ-1» углы наклонения в программном комплексе «Кренование»

Таблица 2

Пример ручной записи углов наклонений при замере оптическим и маятниковым угломерами

Номера фиксированных положений отсчетного индекса		Номера наблюдений и обозначение									
		0		1		2		3		4	
Влево	Вправо	X0		X1		X2		X3		X4	
1	2	−3	5	22	29	−1	3	−22	−18	−2	3
3	4	−3	7	22	28	0	2	−22	−20	0	5
5	6	−3	4	22	30	0	1	−24	−19	−3	3
7	8	−1	6	20	29	0	1	−22	−18	1	2
9	10	0	2	21	30	−2	2	−24	−17	1	2
11	12	0	4	21	27	−3	1	−24	−19	−2	5
13	14	0	4	23	27	0	2	−23	−18	−4	4
15	16	0	3	21	30,5	−3	0	−23	−19	−2	4
17	18	−1	4	20	27	−3	5	−23	−17	−4	5
19	20	−1	4	22	26	−4	3	−22	−18	−2	3
Σ		31		497,5		4		−412		19	
Ср. арифметическое		X0 = 1,55		X1 = 24,88		X2 = 0,20		X3 = −20,60		X4 = 0,95	

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ КАЧКИ НА ТОЧНОСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УГЛОВ НАКЛОНЕНИЯ

Одними из наиболее достоверных считаются результаты, полученные с помощью веска. В 2021 году на одном из отечественных заказов проведено кренование с использованием трех электронных угломерных приборов «ЭУ-1», а также одного веска. Результаты записи углов крена представлены в табл. 3.

Таблица 3

Сравнение результатов измерений при креновании с помощью «ЭУ-1» и веска

№	Наименование прибора/веска	Предельная приборная погрешность, градус	Средние арифметические показания приборов для серии испытаний, градус					Изменение угла крена от переноса балласта с борта на борт	Отклонение приборов «ЭУ-1» от веска
			X0	X1	X2	X3	X4		
1	ЭУ-1 зав. № 81-75	0,015°	0,126°	0,697°	0,130°	−0,42°	0,137°	1,119°	1,89 %
2	ЭУ-1 зав. № 81-76	0,015°	−0,08°	0,511°	−0,07°	−0,62°	−0,06°	1,141°	−0,04 %
3	ЭУ-1 зав. № 81-77	0,015°	0,087°	0,684°	0,104°	−0,43°	0,133°	1,135°	0,44 %
4	Весок	0,015°	4,833°	4,247°	4,812°	5,393°	4,846°	1,140°	—

Как видно из табл. 2, углы крена электронных угломерных приборов и веска достаточно близки. Однако, важным вопросом является влияние качки на точность регистрации углов крена. Ниже приведено сравнение погрешностей от влияния качки для «ЭУ-1» и веска.

Электронный угломерный прибор позволяет проводить отсчеты угла крена с заданной частотой (1 Гц) и длиной реализации. Для реальных условий работы прибора из следствий центральной предельной теоремы вытекает, что при увеличении объема выборки (длины реализации при заданной частоте отсчетов угла крена) выборочное распределение среднего значения выборки приближается к нормальному распределению независимо от вида распределения исходной величины [1, 5, 6]. В соответствии с этим может быть проведена статистическая обработка данных, записываемых электронным угломерным прибором для данной реализации.

По записи углов крена от времени (для «ЭУ-1» частота регистрации 1 Гц, для веска производилось примерно по 50 замеров амплитудных значений) была определена дисперсия угла крена по формуле

$$D[\theta] = \frac{1}{N-1}\sum_{i=1}^{N}(\theta_i - MO[\theta])^2, \quad (2)$$

где $D[\theta]$ — дисперсия угла крена;
N — число замеров;
θ_i — угол крена;
$MO[\theta]$ — математическое ожидание угла крена.

Далее рассчитывались погрешности определения угла крена при качке (инструментальная погрешность не учитывалась) для вероятностей 0,97 (3 % обеспеченность) и 0,8. Для этого использовались формулы [3]

$$\Delta\theta_k|_{3\%} = \varepsilon|_{3\%} = 2{,}1\sqrt{D[\theta]/N}; \quad (3)$$

$$\Delta\theta_k|_{P=0,8} = \varepsilon|_{P=0,8} = 1{,}29\sqrt{D[\theta]/N}, \quad (4)$$

где $\varepsilon|_{3\%}$ — отклонение математического ожидания угла наклонения от своего истинного значения для вероятности 0,97;
$\varepsilon|_{P=0,8}$ — отклонение математического ожидания угла наклонения от своего истинного значения для вероятности 0,8.

Зависимость погрешности определения угла крена от влияния качки $\Delta\theta_k$ от времени регистрации данных приведена на рис. 8 на примере электронного угломерного прибора «ЭУ 1» № 81-75-2018 для вероятности 0,97 (3 % обеспеченность). Аналогичная зависимость для веска, но только от количества замеров в ручном режиме (за тот же время, что и регистрация с помощью прибора «ЭУ-1») приведена на рис. 9.

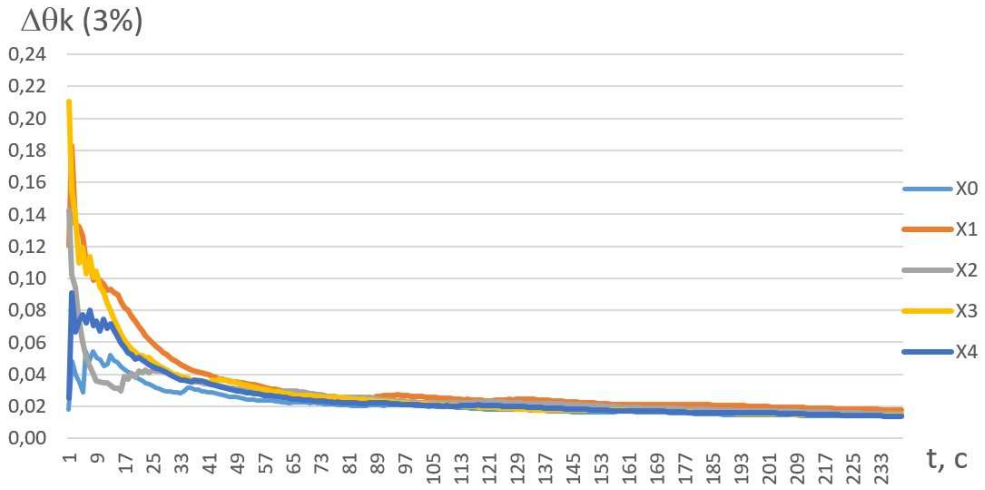


Рис. 8 Зависимость $\Delta\theta_k$ от времени регистрации на примере прибора «ЭУ-1» зав. № 81-75-2018

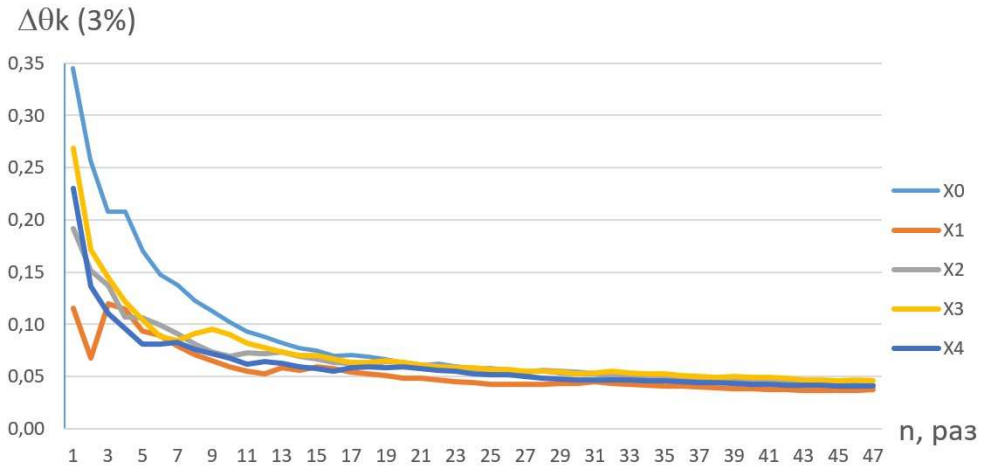


Рис. 9 Зависимость $\Delta\theta_k$ от количества замеров на примере веска (за то же время, что и «ЭУ-1»)

Ниже в табл. 4 и 5 представлены результаты расчетов погрешностей определения угла крена $\Delta\theta_k$ для вероятностей 0,97 (3 % обеспеченность) и 0,8 соответственно, для электронных угломерных приборов «ЭУ-1» № 81-75-2018, № 81-76-2018 и № 81-77-2018, а также для веска. Погрешности определены от влияния качки (инструментальная погрешность не учитывалась) на момент окончания регистрации данных (конец режима).

Таблица 4

Погрешность определения угла крена $\Delta\theta_k$ для вероятности $P=0,97$ (3 % обеспеченность)

№ замера	$\Delta\theta_k$ для «ЭУ-1» зав. № 81-75-2018, град	$\Delta\theta_k$ для «ЭУ-1» зав. № 81-76-2018, град	$\Delta\theta_k$ для «ЭУ-1» зав. № 81-77-2018, град	$\Delta\theta_k$ для веска, град
X0	0,014	0,012	0,012	0,044
X1	0,018	0,015	0,015	0,037
X2	0,015	0,013	0,013	0,042
X3	0,014	0,013	0,013	0,046
X4	0,014	0,011	0,011	0,041

Таблица 5

Погрешность определения угла крена $\Delta\theta_k$ для вероятности $P=0,8$

№ замера	$\Delta\theta_k$ для «ЭУ-1» зав. № 81-75-2018, град	$\Delta\theta_k$ для «ЭУ-1» зав. № 81-76-2018, град	$\Delta\theta_k$ для «ЭУ-1» зав. № 81-77-2018, град	$\Delta\theta_k$ для веска, град
X0	0,009	0,008	0,007	0,027
X1	0,011	0,009	0,009	0,023
X2	0,009	0,008	0,008	0,026
X3	0,009	0,008	0,008	0,028
X4	0,009	0,007	0,007	0,025

Как видно из табл. 4 и 5, погрешность определения угла крена от влияния качки для веска больше в три-четыре раза. Связано это, в первую очередь, с меньшим количеством визуально фиксируемых дискретных значений углов крена. А погрешность, как известно, уменьшается с увеличением длины реализации. Кроме того, при регистрации данных с веска может иметь место человеческий фактор, тогда как с помощью электронного угломерного прибора «ЭУ-1» углы крена фиксируются непрерывно в автоматическом режиме.

ВЫВОДЫ

В работе описано устройство электронного угломера для регистрации углов наклонения и математической обработки данных в процессе кренования ПЛ.

Приведены некоторые результаты испытаний отечественных и зарубежных ПЛ с применением «ЭУ-1» для оценки его эффективности.

Показана целесообразность замены аналоговых средств измерения углов наклонения на электронный способ регистрации:

1) повышение точности определения параметров остойчивости, поперечной метацентрической высоты, благодаря:

1.1) исключению человеческого фактора при записи углов наклонения;

1.2) регистрации значительно большего массива данных, в среднем в 20 раз превышающего количество зафиксированных данных оптическим и маятниковым угломерами;

1.3) определению допустимости начала и окончания замера углов по выводимым на табло прибора параметрам – амплитуды качки и отклонения математического ожидания угла наклонения;

2) сокращение сроков испытания заказа в целом, ориентировочно на 20 ч, благодаря уменьшению времени обработки данных и формирования отчета;

3) снижение трудозатрат за счет автоматизации процесса и сокращения вдвое количества задействованных в испытаниях человек - трое вместо шести человек заняты измерениями;

4) прорабатываются варианты оптимизации угломера в части установки прецизионного датчика-инклинометра расширенного диапазона регистрируемых углов для надводных заказов.

Для настоящей статьи получено Заключение о возможности открытого опубликования от ЦКБ МТ «Рубин» № 24/22 от 05.04.2022.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бендат Дж., Пирсол А. Измерение и анализ случайных процессов, М.: Мир, 1971. 408 с.
2. Борисов Р.В., Луговский В.В., Мирохин Б.В., Рождественский В.В. Статика корабля, СПБ, Судостроение, 2005. 256 с.
3. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория вероятностей и ее инженерные приложения. М.:Наука, 1988. 480 с.
4. Ефимьев Н.Н. Основы теории подводных лодок, М., Воениздат, 1965. 383 с.
5. Мудров В.И., Кушко В.Л. Методы обработки измерений, М.: Сов. Радил, 1976.
6. Пиотровский Я. Теория измерений для инженеров, М.: Мир, 1989, 335 с.
7. Разумеенко Ю.В., Кузнецов В.Ю., Ейбоженко А.В., Кухарев А.М. Теория корабля. Теория и управление подводной лодкой, Пушкин, ВМИИ, 2009. 543 с.
8. Способ определения метацентрической высоты подводных и надводных объектов и устройство электронного угломерного прибора для его осуществления/Патент на изобретение № 2670319 // А.Ю. Каверинский, М.А. Мурашов, Д.О. Веретенников, С.А. Белянский, Р.О. Кашкарев, П.В. Прудников, А.В. Любимов, А.Н. Тихомиров. — БИ № 30, 22.10.2018.

REFERENCES

1. Bendat J. , Pirsol A. *Izmerenie i analiz sluchaynih processov* [Measurement and analysis of random processes]. Moscow, Mir, 1971, 408 p.
2. Borisov R.V., Lugovskiy V.V., Mirohin B.V., Rogdestvenskiy V.V. *Statika korablya* [Ship statics]. St. Petersburg, Sudostroenie, 2005, 256 p.
3. Ventsel E.S., Ovcharov L.A. *Teoriya veroyatnosti i ee inzhenerniye prilozheniya* [Probability theory and its engineering applications]. Moscow, Nauka, 1988, 480 p.
4. Efimev N.N. *Osnovy teorii podvodnykh lodok* [Fundamentals of the theory of submarines]. Moscow, Voenizdat, 1965, 383 p.
5. Mudrov V.I., Kushko V.L. *Metody obrabotki izmereniy* [Methods of measurement processing]. Moscow, Sov. Radil, 1976.
6. Piotrovskiy Y. *Teoriya izmereniy dlya inzhenerov* [Measurement theory of engineers]. Moscow, Mir, 1989, 335 p.
7. Razumeenko U.V., Kuznetsov V.U., Eybogenko A.V., Kukharev A.M. *Teoriya korablya. Teoriya i upravlenie podvodnoy lodkoy* [Theory of the ship. Submarine theory]. Pushkin, VMII, 2009, 543 p.
8. *Sposob opredeleniya metatsentricheskoy vysoty podvodnykh i nadvodnykh obektov i ustroystvo elektronnogo uglomernogo pribora dlya ego osuchestvleniya* [A method for determining the metacentric height of underwater and surface objects and a device of electronic angle measurement for its implementation] /Patent for invention № 2670319// A.U. Kaveriskiy, M.A. Murashov, D.O. Veretennikov, S.A. Belynskiy, R.O. Kashkarev, P.V. Prudnikov, A.V. Lubimov, A.N. Tihomirov. — BI No. 30, 22.10.2018.



ПРОЧНОСТЬ СУДОВ И ПЛАВУЧИХ СООРУЖЕНИЙ

УДК 621.74:624.012

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РУЛЯ ИЗМЕНЯЕМОГО ПРОФИЛЯ В СОСТАВЕ ВИНТОРУЛЕВОГО КОМПЛЕКСА СУДНА ЛЕДОВОГО КЛАССА

О.С. Шаринкова, ФГБУ НО «Национальный оператор исследовательского флота», Владивосток, e-mail: sharinkova@mail.ru
А.П. Аносов, д-р техн. наук, Дальневосточный Федеральный Университет, Владивосток, e-mail: anosov49@mail.ru
И.А. Новосельцев, Дальневосточный Федеральный Университет, Владивосток, e-mail: igor_roller@mail.ru

Одними из наиболее повреждаемых конструкций судна при плавании во льдах являются элементы винторулевого комплекса (ВРК). Несмотря на это, в научно-технической и нормативной литературе содержится мало информации по вопросу защиты ВРК от воздействия льда. Рассмотрена новая конструктивная противоледовая защита ВРК в сочетании с рулем изменяемого профиля, защищенная двумя патентами на изобретения. С использованием программного продукта SolidWorks выполнена расчетная сравнительная оценка гидродинамических характеристик обыкновенного руля и руля изменяемого профиля в комплексе с противоледовой защитой. Подтверждена эффективность рулевого устройства судна ледового класса, оборудованного предлагаемой противоледовой защитой при использовании руля изменяемого профиля.

Ключевые слова: *противоледовая защита винторулевого комплекса судна, судовой руль изменяемого профиля, гидродинамические характеристики судового руля*

COMPARATIVE EVALUATION OF HYDRODYNAMIC CHARACTERISTICS OF VARIABLE PROFILE RUDDER AS A PART OF ICE CLASS SHIP PROPULSION COMPLEX

O.S. Sharinkova, FSBI of Scientific Service "National Operator of the Research Fleet", Vladivostok, e-mail: sharinkova@mail.ru
A.P. Anosov, DSc, Far Eastern Federal University, Vladivostok, e-mail: anosov49@mail.ru
I.A. Novoseltsev, Far Eastern Federal University, Vladivostok, e-mail: igor_roller@mail.ru

One of the most easily damaged structures of a ship when sailing in ice are the elements of the propeller-rudder complex (PRC). Despite this, there is little information in the scientific, technical, and regulatory literature on the issue of protecting the PRC from the effects of ice. The article considers a new constructive anti-ice protection of the PRC in combination with a variable profile rudder, protected by two patents for inventions. With the use of the SolidWorks software product, a calculated comparative assessment of the hydrodynamic characteristics of an ordinary rudder and a variable profile rudder in combination with anti-ice protection has been

performed. The effectiveness of the steering gear of an ice navigation ship equipped with the proposed anti-ice protection using a variable profile rudder has been confirmed.

Keywords: *anti-ice protection of the propeller-rudder complex of ships, variable profile of a ship rudder, hydrodynamic characteristics of a ship rudder*

ВВЕДЕНИЕ

Одними из наиболее повреждаемых конструкций судна при плавании во льдах являются элементы винторулевого комплекса (ВРК). Несмотря на это, в научно-технической и нормативной литературе содержится мало информации по вопросу защиты ВРК от воздействия льда. Основным нормативным документом, определяющим требования к конструкциям судов, являются правила Российского морского регистра судоходства.

Единственное конструктивное решение по защите пера руля от воздействия льда для судов ледового плавания и ледоколов, которое регламентируется Правилами, — это ледовый зуб. Он предназначен для защиты пера руля от контакта со льдом при движении задним ходом и в соответствии с циркулярным письмом Главного управления Регистра (ГУР) № 312-11-812ц от 15.04.2015 со ссылкой на Финско-шведские Правила «должен по своим габаритам выходить за границу нижней ледовой ватерлинии (в той мере, в какой это возможно для рассматриваемой конструкции)».

Однако несмотря на это, льдины могут под наклоном уходить под корму и, минуя ледовый зуб, упираться в перо руля [1]. Величина возникающих при этом усилий зависит от массы и скорости судна, массы льдины и прочностных характеристик льда и может достигать сотен тонн, что приводит к массовым повреждениям элементов ВРК.

С целью предотвращения повреждений элементов ВРК судов ледового класса, возникающих при их взаимодействии со льдом, была разработана новая, защищенная патентами на изобретения конструкция противоледовой защиты ВРК [2, 3]. В патентной документации намечена лишь общая схема защитного устройства. Для обоснования его конструкции и создания полноценной методики расчетного проектирования устройства необходимо решить комплекс задач, касающихся прочностных и гидродинамических аспектов. Вопросы прочности элементов конструктивной противоледовой защиты рассмотрены в статье [4].

Целью работы является сравнительная оценка гидродинамических характеристик обыкновенного руля и руля изменяемого профиля в комплексе с элементами противоледовой защиты.

КОНСТРУКЦИЯ ПРОТИВОЛЕДОВОЙ ЗАЩИТЫ ВРК В КОМПЛЕКСЕ С РУЛЕМ ИЗМЕНЯЕМОГО ПРОФИЛЯ

Решение проблемы противоледовой защиты ВРК на первый взгляд очевидно: следует исключить прямой контакт повреждаемых элементов ВРК со льдом. Однако абсолютно эффективных и надежных конструктивных решений в этом направлении нет. Основная идея предлагаемой конструктивной противоледовой защиты ВРК состоит в обеспечении защиты руля при движении задним ходом по всей его высоте (см. рис. 1) [2].

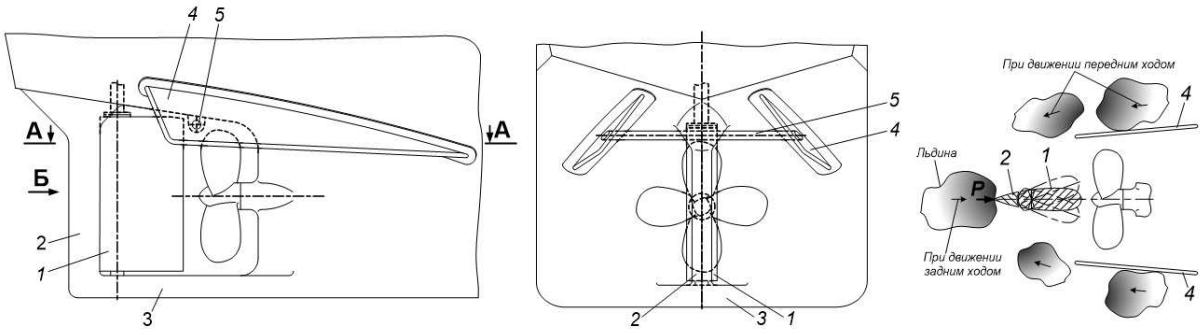


Рис. 1 Конструктивная противоледовая защита ВРК (боковой вид, вид Б, сечение А-А)

Устройство включает перо руля *1* со смещенной к задней кромке осью вращения, рудерпост-ледорез *2*, который расположен в отличие от традиционной конструкции не впереди, а позади пера руля по всей его высоте. В нижней части рудерпост *2* соединен с пяткой *3*, образуя тем самым жесткую замкнутую раму. Рудерпост-ледорез *2* и перо руля *1* при прямом положении руля образуют единый обтекаемый профиль. Для защиты элементов ВРК от контакта с льдинами при движении передним ходом предусмотрены отбойники льда *4*, установленные по бокам от ВРК и перекрывающие по высоте район переменных ватерлиний.

Устройство работает следующим образом.

При движении судна передним ходом движущиеся вдоль бортов льдины, уходя в кормовой подзор, вступают в контакт с отбойниками льда *4* и движутся вдоль них в сторону кормы. Отбойники льда расположены таким образом, что исключается контакт льдин с винтом и пером руля независимо от угла его перекладки.

При движении судна задним ходом льдины вступают в контакт с рудерпостом-ледорезом и либо раскалываются на две части, либо смещаются в сторону одного из бортов. За счет смещения баллера к задней кромке пера руля эта его часть при движении задним ходом оказывается защищенной рудерпостом-ледорезом от непосредственного контакта с льдинами, как при прямом положении пера руля, так и при его перекладке на любой из бортов. Тем самым исключается повреждение задней кромки пера руля и возникновение опасных скручивающих моментов в баллере.

Кроме того, при перекладке пера руля профиль комплекса «перо руля — рудерпост» в потоке с кормы принимает вогнуто-выпуклую форму, что существенно увеличивает создаваемое пером руля боковое усилие (подъемную силу), улучшая управляемость судна на заднем ходе, которая обычно низка из-за пониженной скорости движения при выполнении этого маневра.

Однако при движении передним ходом эта же форма снижает эффективность пера руля. Кроме того, смещение оси баллера к задней кромке пера руля по сравнению с его балансирным вариантом увеличивает крутящий момент на баллере, что приведет к увеличению его диаметра и потребной мощности рулевой машины. Оба указанных недостатка могут быть частично или полностью компенсированы введением в конструкцию дополнительных поворотных частей пера руля, подобных элементам механизации крыла самолета — предкрылкам и закрылкам. Таким образом, получается руль изменяемого профиля.

С учетом сказанного было разработано рулевое устройство судна ледового плавания с рулем изменяемого профиля [3], обеспечивающее защиту ВРК в сочетании с приемлемыми гидродинамическими характеристиками при движении передним и задним ходом.

В качестве привода для поворота предкрылка выбран рычажный механизм, размещенный внутри основной части руля и, таким образом, защищенный от внешних воздействий, имея в виду возможные прямые контакты руля со льдом (см. рис. 2). При этом рудерпост-ледорез, играющий роль закрылка при движении передним ходом и предкрылка на заднем ходу, жестко закреплен на корпусе судна и, в связи с этим, неподвижен при любых положениях подвижных частей руля.

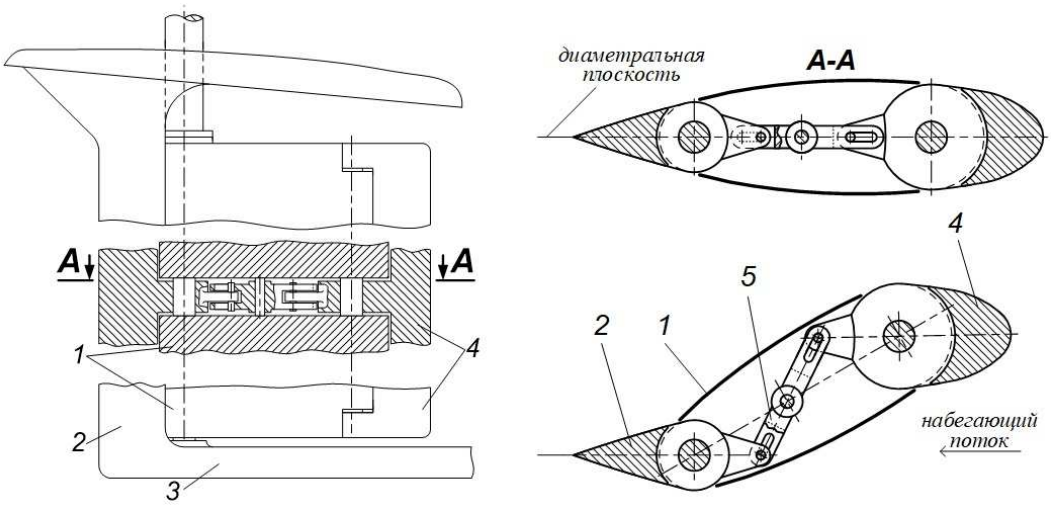


Рис. 2 Рулевое устройство судна ледового плавания с рулем изменяемого профиля:
1 — основная часть руля; *2* — рудерпост-ледорез; *3* — пятка; *4* — предкрылок;
5 — рычажный механизм

Защитная конструкция аналогична описанной выше, но в отличие от нее перо руля снабжено предкрылком, компенсирующим возникающий при движении передним ходом отрицательный гидродинамический эффект.

Автоматический поворот предкрылка осуществляется рычажным механизмом в зависимости от перекладки основной части. При этом оптимальный угол перекладки предкрылка может быть обеспечен выбором соответствующего соотношения плеч рычагов. Принцип действия устройства очевиден из рисунка и не требует дополнительных пояснений.

Положительный гидродинамический эффект при движении передним ходом возникает за счет того, что предкрылок и основная часть руля в потоке с носа образуют выпукло-вогнутый профиль (см. рис. 2).

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБЫКНОВЕННОГО РУЛЯ И РУЛЯ ИЗМЕНЯЕМОГО ПРОФИЛЯ

Для расчетов использован профиль NACA-0021 двух типов: цельный (неизменяемый) и состоящий из трех частей (изменяемый). Для сопоставления гидродинамических характеристик этих профилей рассматривался не реальный руль, находящийся в струе винта под корпусом судна с учетом влияния всех побочных факторов (попутный поток, наличие верхней твердой границы, струя от винта), а изолированный руль, который вертикально расположен в потоке так, что его верхняя кромка совпадает с поверхностью воды (см. рис. 3).

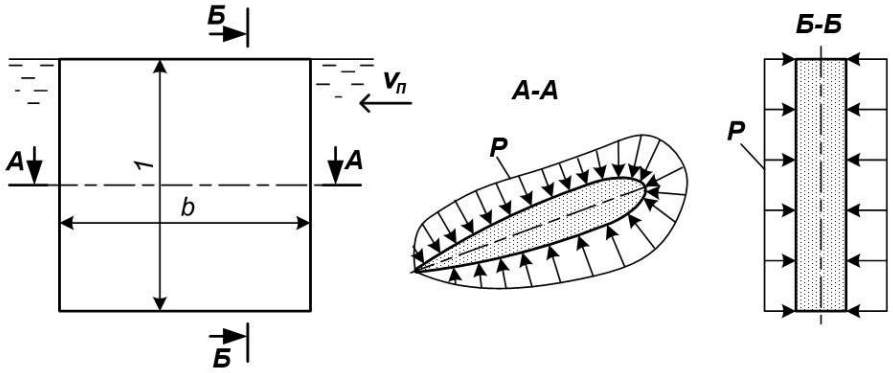


Рис. 3 Распределение давлений по поверхности «условного» руля

С помощью программного продукта SolidWorks рассчитывалось распределение давлений воль контура профиля на половине высоты руля. Далее рассматривались гидродинамические характеристики «условного» руля единичной высоты, нагруженного этими давлениями при их равномерном распределении по высоте (см. рис. 3). На рис. 4 показана 3D-модель обыкновенного руля и пример цветовой визуализации распределения давлений по периметру контура профиля.

Были выполнены расчеты нормальных сил, действующих на изолированные рули, и моменты на баллерах в зависимости от угла перекладки (атаки) α при фиксированной скорости набегающего потока морской воды v при движении судна передним и задним ходом. Рассмотрены два варианта: обыкновенный руль и руль изменяемого профиля в комплексе с рудерпостом-ледорезом (см. рис. 5).

Оба руля в плане имеют форму квадрата высотой $l = 1{,}0$ м и шириной $b = 1$ м (удлинение $\lambda_P = 1$). У обоих рулей баллеры расположены на расстоянии $c = 0{,}3$ м от их задней кромки, а верхняя кромка руля находится на уровне свободной поверхности воды.

На рис. 6 показан расчетный характер распределения давлений по контурам профилей рассматриваемых рулей при угле атаки $\alpha = 20°$ и скорости набегающего потока $v = 6$ м/с. Для составного руля углом атаки считается угол перекладки основной его части. В табл. 1 и на рис. 7 приведены расчетные зависимости коэффициентов нормальной силы от угла атаки для двух исследуемых рулей при движении передним ходом.

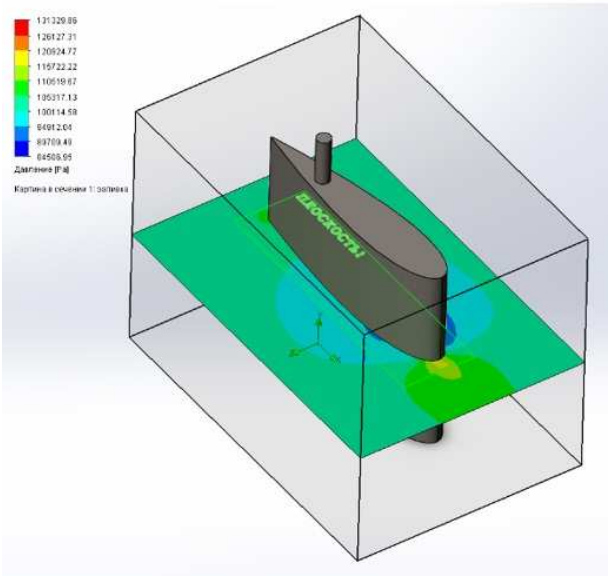


Рис. 4 3D-модель руля и цветовая визуализация распределения давлений по периметру контура профиля

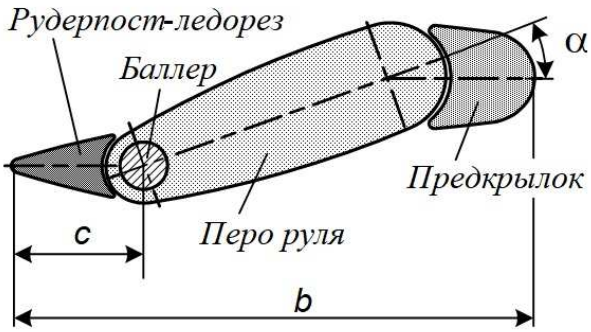


Рис. 5 Руль изменяемого профиля в составе противоледовой защиты ВРК

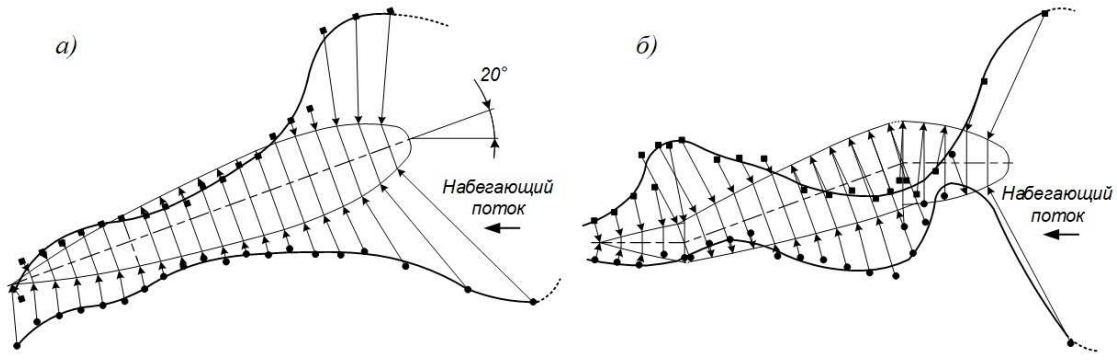


Рис. 6 Распределение давлений по контуру профилей:
а) — обычного руля; *б)* — руля изменяемого профиля

Таблица 1

Коэффициенты C_n в зависимости от угла атаки при скорости набегающего потока 6 м/с

Тип руля	Угол атаки α, град				
	5	10	15	20	25
Обыкновенный	0,192	0,227	0,264	0,302	0,330
Изменяемого профиля	0,160	0,192	0,244	0,266	0,288

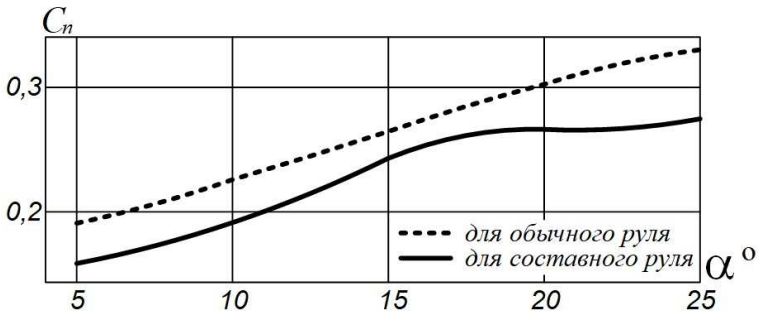


Рис. 7 Коэффициенты нормальной силы для обыкновенного и составного рулей профиля NACA-0021 на переднем ходу, в зависимости от угла атаки

Для оценки адекватности принятой модели и методики расчета использованы результаты, полученные в [5] при определении с помощью программного продукта SolidWorks гидродинамических сил, действующих на расположенное горизонтально крыло профиля NACA-0021 шириной 1 м, размахом 6 м ($\lambda_P = 6$) при угле атаки 20° и скорости набегающего потока пресной воды 6 м/с.

Получена величина коэффициента подъемной силы $C_Y = 1{,}05$. В нашем случае при тех же исходных данных, кроме $\lambda_P = 1$, вертикального положения руля, т.е. наличия градиента статической составляющей давления, и наличия свободной поверхности, величина коэффициента нормальной силы $C_n = 0{,}308$. Далее коэффициент $C_Y = 1{,}05$ был пересчитан с учетом различия исходных параметров по формуле:

$$C_{nK\Rightarrow P} = C_{YK} K_\rho K_\lambda K_{Y\Rightarrow n}.$$

Коэффициенты пересчета K_i, учитывающие разницу плотностей воды, разные удлинения и переход от C_Y к C_n, определены с использованием известных зависимостей [6, 7]. В результате пересчета величина $C_{nK\Rightarrow P} = 0{,}469$, что больше коэффициента полученного прямым расчетом $C_n = 0{,}308$ на 55 %.

Имеет место значительный разброс значений коэффициента подъемной силы, полученных разными способами. Для крыла с $\lambda = 6$ по формуле Прандтля $C_Y^{\lambda=6} = 1{,}64$, по формуле Ф. Манделя $C_Y^{\lambda=6} = 1{,}48$, полученный в работе [5] $C_Y^{\lambda=6} = 1{,}05$ и коэффициент, полученный в результате продувки крыла, $C_Y^{\lambda=6} = 1{,}37$. Максимальный разброс значений $C_Y^{\lambda=6}$ составляет 56 %.

На фоне этой картины отличие в 55 % не выглядит из ряда вон выходящим, особенно если учесть, что пересчетом не учтены еще два влияющих фактора — градиент статической составляющей давления и наличие свободной поверхности.

Таким образом, к абсолютным значениям получаемых характеристик следует относиться с осторожностью, имея в виду необходимость дополнительных исследований. При этом, если принять вполне правомерное допущение, что *все факторы, кроме формы профилей рулей, в равной мере влияют на абсолютную величину гидродинамических характеристик двух одинаковых по исходной форме рулей, находящихся в одинаковых условиях, и не влияют на соотношение величин этих характеристик*, то сравнительные оценки характеристик обыкновенного руля и руля изменяемого профиля с использованием предложенной методики расчета представляются вполне допустимыми.

Возвращаясь к сравнительной оценке гидродинамических характеристик обыкновенного руля и руля изменяемого профиля, можно заключить, что при движении передним ходом составной руль переменного профиля менее эффективен, чем обыкновенный руль. Разница величин нормальных сил меняется в зависимости от величины угла атаки в диапазоне (8,2 — 21) % при среднем значении 15,8 %.

Важной характеристикой с точки зрения потребной мощности рулевой машины и необходимого диаметра баллера является крутящий момент на баллере, который зависит от величины нормальной силы, создаваемой рулем, и от положения точки ее приложения по отношению к оси баллера.

Рассмотрены три варианта рулей, показанные на рис. 8. Дополнительно рассмотрен традиционный для судов ледового плавания руль с баллером, установленным у его передней кромки (рис. 8, *б*).

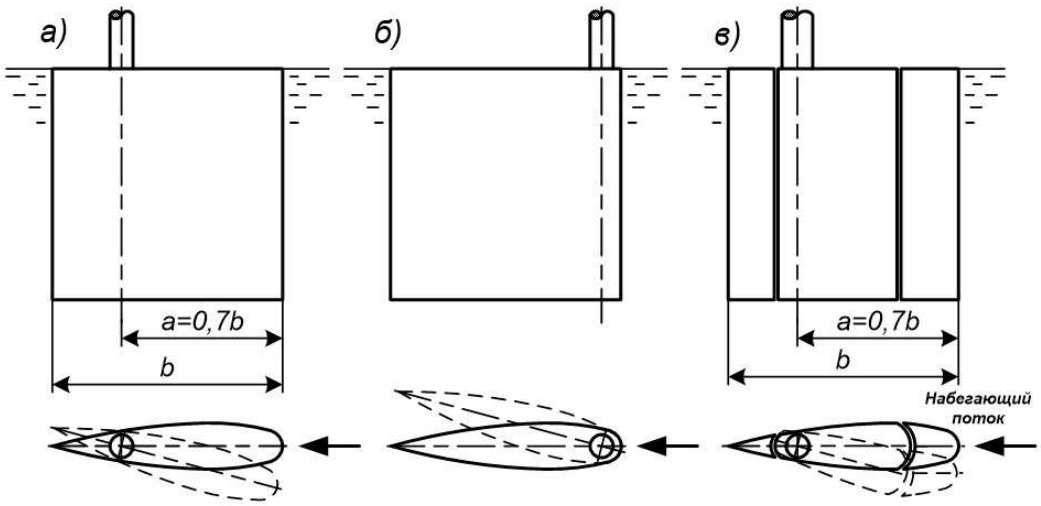


Рис. 8 Варианты рулей для сравнения расчетных моментов в баллере:
а — обычный руль при $a=0{,}7b$; *б* — обычный руль при $a=0$; *в* — составной руль при $a=0{,}7b$

Зависимость коэффициентов момента на баллере от угла атаки иллюстрируется рис. 9. Для определения мощности рулевой машины и для проектировочного расчета баллера значение имеет максимальный эксплуатационный момент, действующий на баллере — в данном случае при угле атаки $\alpha=25°$.

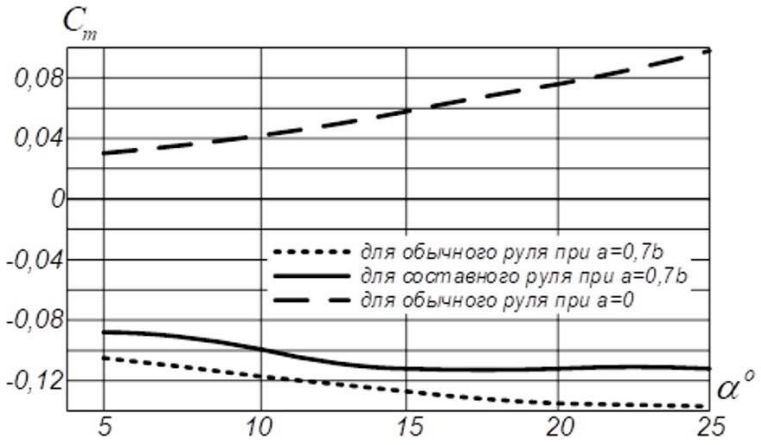


Рис. 9 Коэффициенты крутящего момента на баллере руля профиля NACA-0021
на переднем ходу в зависимости от угла атаки при скорости 6 м/с

За базу сравнения принят руль, характерный для судов ледового плавания, с баллером у передней кромки ($a=0$). Для этого руля расчетный момент в баллере $M_{max1}=1493$ кНм. Для обычного руля при $a=0{,}7b$ момент $M_{max2}=2767$ кНм, а для такого же, но составного руля момент $M_{max3}=2413$ кНм.

Для составного руля по сравнению с обычным рулем при одинаковом расположении баллера ($a=0{,}7b$) M_{max3} меньше M_{max2} на 14,7 %. При этом по сравнению с обычным рулем с баллером вблизи передней кромки ($a=0$) у составного руля M_{max3} больше M_{max1} на 62 %. При использовании составного руля это приведет к увеличению потребной мощности рулевой машины приблизительно на 60 %. При этом диаметр баллера, имея в виду величину полярного момента сопротивления, пропорциональную кубу диаметра,

увеличится в $\sqrt[3]{1{,}62} = 1{,}17$ раза, т.е. на 17 %. Ни то, ни другое не представляет серьезной технической проблемы.

Расчеты при движении задним ходом выполнены при тех же углах атаки $\alpha = 5 — 25$ градусов и при скорости набегающего потока v = 1, 5 м/с (2,92 уз). Коэффициенты нормальной силы приведены в табл. 2, а графическая интерпретация зависимости $C_n = f(\alpha)$ иллюстрируется рис. 10.

Таблица 2

Коэффициенты C_n в зависимости от угла атаки при скорости набегающего потока 1,5 м/с при движении задним ходом

Тип руля	Угол атаки α, градусы				
	5	10	15	20	25
Обыкновенный	1,40	1,51	1,56	1,61	1,66
Изменяемого профиля	1,56	1,65	1,67	1,72	1,75

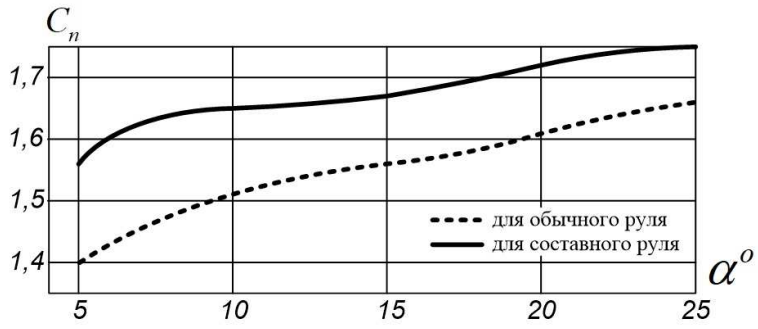


Рис. 10 Коэффициенты нормальной силы C_n в зависимости от угла атаки при скорости заднего хода 1,5 м/с

Видно, что при движении задним ходом в отличие от переднего хода, картина прямо противоположная: составной руль переменного профиля с принятыми параметрами более эффективен, чем обыкновенный руль. Разница величин нормальных (а, значит, и подъемных) сил колеблется в зависимости от величины угла атаки в диапазоне (7,2 — 11) % при среднем значении 8 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Расчеты гидродинамических характеристик трехзвенного руля в сопоставлении с обычным рулем показали следующее.

1. Составной руль в сравнении с обычным дает положительный эффект в управляемости при движении задним ходом около 8 %, но уступает ему в эффективности на переднем ходу — нормальная (подъемная) ниже на 15,8 %.

2. Наличие предкрылка уменьшает момент в баллере на 14,7 % при его расположении на задней кромке подвижных частей руля, обусловленном конструкцией и принципом действия противоледовой защиты ВРК.

3. Момент на баллере составного руля больше момента для обычного руля с передним расположением баллера на 62 %, что потребует пропорционального увеличения мощности рулевой машины. Одновременно диаметр баллера увеличится на 17 %.

Таким образом, предложенная конструктивная противоледовая защита ВРК в сочетании с рулем изменяемого профиля вполне приемлема и с точки зрения параметров рулевой машины и конструктивных размеров баллера, и в аспекте эффективности рулевого устройства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лобанов В.А. Численные оценки ледовых качеств винтов. — Институт государственного управления, права и инновационных технологий (ИГУПИТ). Интернет-журнал «Науковедение», № 4, 2012. — с. 1 — 15.
2. Кормовая оконечность судна ледового плавания. Патент на изобретение № 2551638 / А.П. Аносов, О.С. Шаринкова. — БИ № 15, 27.05.2015.
3. Рулевое устройство судна ледового плавания. Патент на изобретение № 2610778 / А.П. Аносов, О.С. Шаринкова. — БИ №5, 15.02.2017.
4. Шаринкова О.С., Аносов А.П. Исследование прочности конструктивной противоледовой защиты винторулевого комплекса. Труды Крыловского государственного научного центра. Специальный выпуск, 2/2020. с. 31 — 40.
5. Лебедева Е.Г., Дзюнин Г.Р. Пример решения инженерной задачи при помощи программы CosmosFloWorks. — М.: «Молодой ученый», № 4 (94), 2015. — с. 160 — 162.
6. Справочник по судовым устройствам. В 2-х т. Т. 1. Рулевые, якорные и швартовные устройства / А.Н. Гурович, В.И. Асиновский, Б.Н. Лозгачев, Д.А. Гринберг. — Л.: Судостроение, 1975. — 352 с.
7. Справочник по теории корабля: В трех томах. Том 3. Управляемость водоизмещающих судов. Гидродинамика судов с динамическими принципами поддержания / Под ред. Я.И. Войткунского. — Л.: Судостроение, 1985. — 540 с.

REFERENCES

1. Lobanov V.A. *Chislennye otsenki ledovykh kachestv vintov* [Numerical estimations of propeller ice qualities] — Institute of Public Administration, Law and Innovative Technologies (IGUPIT). Internet journal "Science", No. 4, 2012. — pp. 1 — 15.
2. *Kormovaya okonechnost sudna ledovogo plavaniya* [Aft end of an ice navigation vessel]. Patent for invention No. 2551638 / A.P. Anosov, O.S. Sharinkova. — Bull No. 15, 05.27.2015.
3. *Rulevoye ustroystvo sudna ledovogo plavaniya* [The steering device of the ice navigation vessel]. Patent for invention No. 2610778 / A.P. Anosov, O.S. Sharinkova. — Bull No. 5, 02.15.2017.
4. Sharinkova O.S., Anosov A.P. *Issledovaniye prochnosti konstructivnoy protivoledovoy zaschity vintorulevogo kompleksa* [Study of the strength of the structural anti-ice protection of the propeller-rudder complex] Proceedings of the Krylov State Research Center, special iss, 2/2020. pp. 31 — 40.
5. Lebedeva E.G., Dzyunin G.R. *Primer resheniya inzhenernoy zadachi pri pomoschi programmy CosmosFloWorks* [An example of solving an engineering problem using the CosmosFloWorks program] — M.: "Young scientist", No. 4 (94), 2015. — pp. 160 — 162.
6. *Spravochnik po sudovym ustroystvam. T. 1 Rulevye, yakornye i shvartovnye ustroystva* [Guide of ship devices. In 2 vol. V. 1. Steering, anchor and mooring devices / A.N. Gurovich, V.I. Asinovsky, B.N. Lozgachev, D.A. Greenberg. — L.: Shipbuilding, 1975. — 352 p.
7. *Spravochnik po teorii korablya. T. 3. Upravlyaemost vodoizmeschayuschikh sudov. Gidrodinamika sudov s dinamicheskimi printsipami podderzhaniya* [Guide of ship theory: In three volumes. Volume 3. Controllability of displacement ships. Hydrodynamics of vessels with dynamic principles of maintenance] / Reference book ed. Voytkunsky. — L.: Shipbuilding, 1985. — 540 p.

УДК 629.5.022.1;504.06

РАСЧЕТНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ОДНОКОРПУСНОЙ КОНСТРУКЦИИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОГО СТОЕЧНОГО СУДНА-НАКОПИТЕЛЯ НЕФТЕПРОДУКТОВ

И.З. Черейский, АО «ЦНИИМФ», Санкт-Петербург, e-mail: Stabedit@cniimf.ru
А.А. Петров, канд. техн. наук, АО «ЦНИИМФ», Санкт-Петербург, e-mail: Petrov25@cniimf.ru
С.В. Бродянский, АО «ЦНИИМФ», Санкт-Петербург, e-mail: BrodyanskiySV@cniimf.ru
Е.В. Володченко, АО «ЦНИИМФ», Санкт-Петербург, e-mail: VolodchenkoEV@cniimf.ru

В статье приведены основные результаты научно-исследовательской работы, направленной на анализ возможности и расчетное обоснование альтернативного проектного решения для железобетонного стоечного судна-накопителя нефтепродуктов в соответствии с требованиями резолюций MEPC.110(49) и MEPC.311(73) с учетом особенностей эксплуатации. Судно проектируется без двойного дна и двойных бортов, что не соответствует требованиями 19.3.1 и 19.3.6 Приложения 1 к МАРПОЛ 73/78. Обоснование безопасности альтернативного конструктивного решения производится посредством расчета индекса предотвращения загрязнения, вычисляемого на основании параметров вылива нефти в случае бортовых и днищевых повреждений корпуса судна-накопителя согласно резолюции MEPC.110(49). Дополнительно выполняются расчеты прочности корпуса судна при сравнительно несильном столкновении, а также оценка вероятности наступления такого происшествия. На основании вышеперечисленного производится комплексная оценка риска и выносится решение о безопасности альтернативного проектного решения конструкции судна для выполнения поставленных эксплуатационных задач.

Ключевые слова: *железобетонное стоечное судно, вылив нефтепродуктов, предотвращение загрязнения, столкновение судов, статистика, тяжесть последствий, оценка рисков*

COMPUTATIONAL JUSTIFICATION OF SINGLE-HULL STRUCTURE DESIGN FOR THE BERTH-CONNECTED REINFORCED CONCRETE STORAGE UNIT FOR OIL PRODUCTS

I.Z. Chereyskiy, JSC CNIIMF, St. Petersburg, e-mail: Stabedit@cniimf.ru
A.A. Petrov, PhD, JSC CNIIMF, St. Petersburg, e-mail: Petrov25@cniimf.ru
S.V. Brodyanskiy, JSC CNIIMF, St. Petersburg, e-mail: BrodyanskiySV@cniimf.ru
E.V. Volodchenko, JSC CNIIMF, St. Petersburg, e-mail: VolodchenkoEV@cniimf.ru

The article presents the main results of the scientific research work aimed at analyzing the possibility and computational justification of an alternative design solution for a berth-connected reinforced concrete storage vessel for oil products. The design is made in accordance with the requirements of resolutions MEPC.110(49) and MEPC.311(73) taking into account the special aspects of operation. The vessel is designed without a double bottom and double sides, which does not meet the requirements of 19.3.1 and 19.3.6 of MARPOL 73/78 Annex 1. The justification of alternative design solution safety has been made by calculation of the pollution prevention index. Such index is determined on the basis of oil spill parameters in the event of a side and bottom damage of the vessel hull in accordance with resolution MEPC.110(49). Additionally, calculations of the hull strength in a relatively mild collision have been carried out, together with assessment of the occurrence probability of such incident. Based on the above, a risk assessment have been carried out and decisions on the safety of an alternative vessel design solution for the assigned operation purposes have been made.

Keywords: *berth-connected reinforced concrete vessel, oil spill, pollution prevention, ship collision, statistics, severity of consequences, risk assessment*

ВВЕДЕНИЕ

Правилом 19 Приложения I к МАРПОЛ 73/78 [1] на судах, перевозящих нефтепродукты, предусмотрено обязательное наличие двойных бортов и двойного дна. Резолюцией MEPC.311(73) [2] рекомендуется применять аналогичные требования также к плавучим установкам для производства, хранения и выгрузки нефтепродуктов (FPSO) и плавучим установкам для хранения нефтепродуктов (FSU). Вместе с тем, описанные в [2] FPSO и FSU — морские сооружения, как правило, эксплуатирующиеся в открытом море, и для случаев, когда стоечное судно для хранения нефтепродуктов постоянно базируется в защищенной акватории, выполнение этих требований в полном объеме может быть не всегда оправданным. Применение однобортной конструкции накопителя нефтепродуктов повышает его экономическую эффективность и в некоторой степени упрощает его эксплуатацию. Согласно Правилу 13F(5) Приложения I к [1] отступление от Правила 19 Приложения I к [1] возможно при условии обоснования эквивалентного уровня безопасности альтернативной конструкции, алгоритм выполнения которого изложен в резолюции MEPC.110(49) [3].

В 2021 году специалистами АО «ЦНИИМФ» была выполнена научно-исследовательская работа (НИР) по анализу возможности и расчетному обоснованию альтернативного проектного решения для железобетонного судна-накопителя нефтепродуктов (проект 04080 «Необетон», далее — ж/б накопитель или судно), спроектированного ООО «БалтСпецПроект». Ниже приведены основные положения и результаты НИР, по завершении которой альтернативное проектное решение было одобрено Регистром и Морской Администрацией РФ.

ОБЩЕЕ ОПИСАНИЕ НИР

На первом этапе были проанализированы общие сведения о судне и районе его эксплуатации. В работе рассматривается однопалубное железобетонное несамоходное стоечное судно с восемью грузовыми танками, предназначенными для круглогодичного хранения наливных грузов и их безопасной передачи/приема на любой тип наземного и морского транспорта. Назначенный район эксплуатации – причал ИФ-1, Морской порт «Большой порт Санкт-Петербург». Морской порт расположен в Невской губе Финского залива и устьевой части реки Нева. Большая Турухтанная гавань является закрытой акваторией.

Далее был выполнен расчет параметров вылива нефти и индекса предотвращения загрязнения в соответствии с требованиями [3], основанный на вероятностном подходе и статистических данных о повреждении танкеров в результате аварий.

Затем была разработана методика оценки рисков получения повреждений железобетонным накопителем с учетом особенностей эксплуатации судна на основе Руководства ИМО, содержащего методологию Формальной оценки безопасности (далее — ФОБ) [4].

На следующем этапе выполнялся расчет вероятности сравнительно несильных столкновений с учетом особенностей эксплуатации судна.

По итогам анализа была построена матрица рисков для оценки уровня безопасности использования судна с альтернативной конструкцией.

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ РАСЧЕТА ВЫЛИВА НЕФТИ В СООТВЕТСТВИИ С ТРЕБОВАНИЯМИ РЕЗОЛЮЦИИ MEPC.110(49)

Основной принцип Руководства заключается в сравнении показателей вылива нефти в случае столкновения или посадки на мель танкера альтернативной конструкции и показателей вылива нефти из танкеров с типовой конструкцией двойного корпуса, которые соответствуют правилу 13F(3) Приложения I к [1], на основании рассчитанного индекса предотвращения загрязнения.

Показатели предотвращения загрязнения нефтью конструкции танкера выражаются безразмерным индексом предотвращения загрязнения E, который является функцией трех параметров вылива нефти: «вероятность нулевого вылива», «средний вылив» и «экстремальный вылив». Параметры вылива нефти рассчитываются в отношении всех возможных случаев повреждения в пределах всего диапазона состояний повреждения.

Уровень защиты от загрязнения нефтью в случае столкновения или посадки на мель по сравнению с типовыми конструкциями двойного корпуса определяется путем расчета индекса предотвращения загрязнения E следующим образом:

$$E = k_1 \frac{P_O}{P_{OR}} + k_2 \frac{0{,}01 + O_{MR}}{0{,}01 + O_M} + k_3 \frac{0{,}025 + O_{ER}}{0{,}025 + O_E} \geqslant 1{,}0, \quad (1)$$

где k_1, k_2 и k_3 — весовые коэффициенты;
P_O — параметр вероятности нулевого вылива нефти для альтернативной конструкции;
O_M — параметр среднего вылива нефти для альтернативной конструкции;
O_E — параметр экстремального вылива нефти для альтернативной конструкции;
P_{OR}, O_{MR} и O_{ER} — соответствующие параметры для типовой конструкции двойного корпуса с тем же объемом груза нефти.

Модуль расчета параметров вылива нефти по резолюции MEPC.110(49) разработан как интегрированная часть программного комплекса "STABEDIT PROFESSIONAL". Перед выполнением расчетов по рассматриваемому ж/б накопителю расчетная методика, лежащая в основе программного модуля, успешно прошла верификацию на основе расчетов по тестовой модели баржи из резолюции MEPC.110(49). Процедура верификации показала полную сходимость результатов расчетов на программе с аналогичными результатами расчетов из упомянутой резолюции.

Интерфейс расчетного модуля, интегрированного в "STABEDIT PROFESSIONAL", представлен на рис. 1.

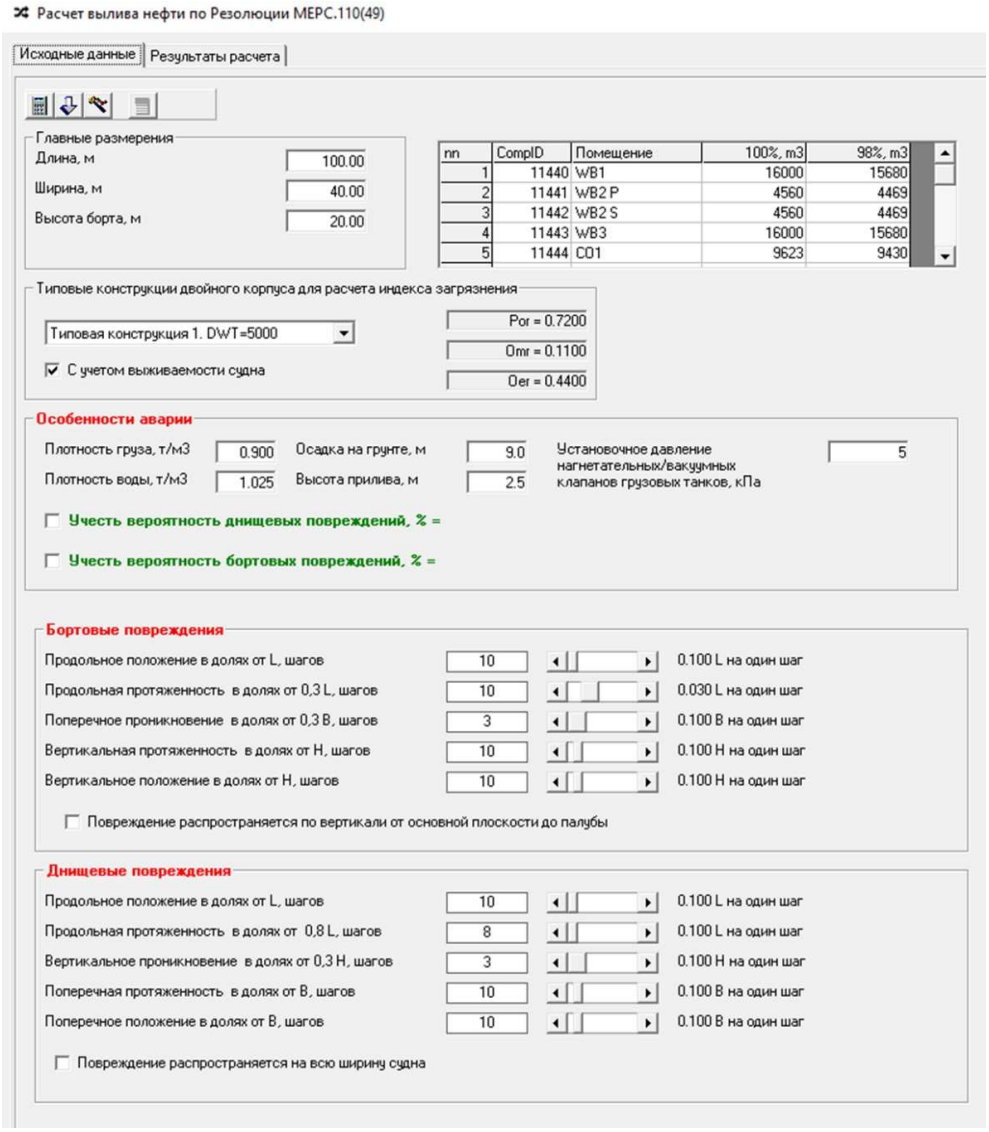


Рис. 1 Интерфейс программного модуля для расчетов по Резолюции ИМО MEPC.110(49)

Трехмерная расчетная модель корпуса судна проекта 04080 представлена на рис. 2 (изометрическая проекция). Расчетные модели грузовых танков №№ 1 — 4 судна представлены на рис. 3 (слева направо).

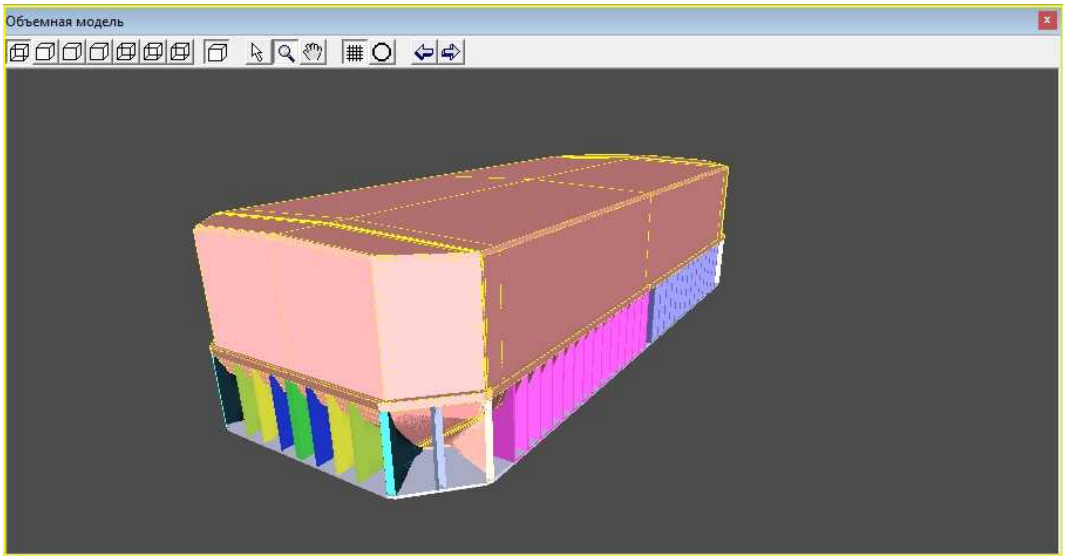


Рис. 2 Трехмерная расчетная модель корпуса судна проекта 04080

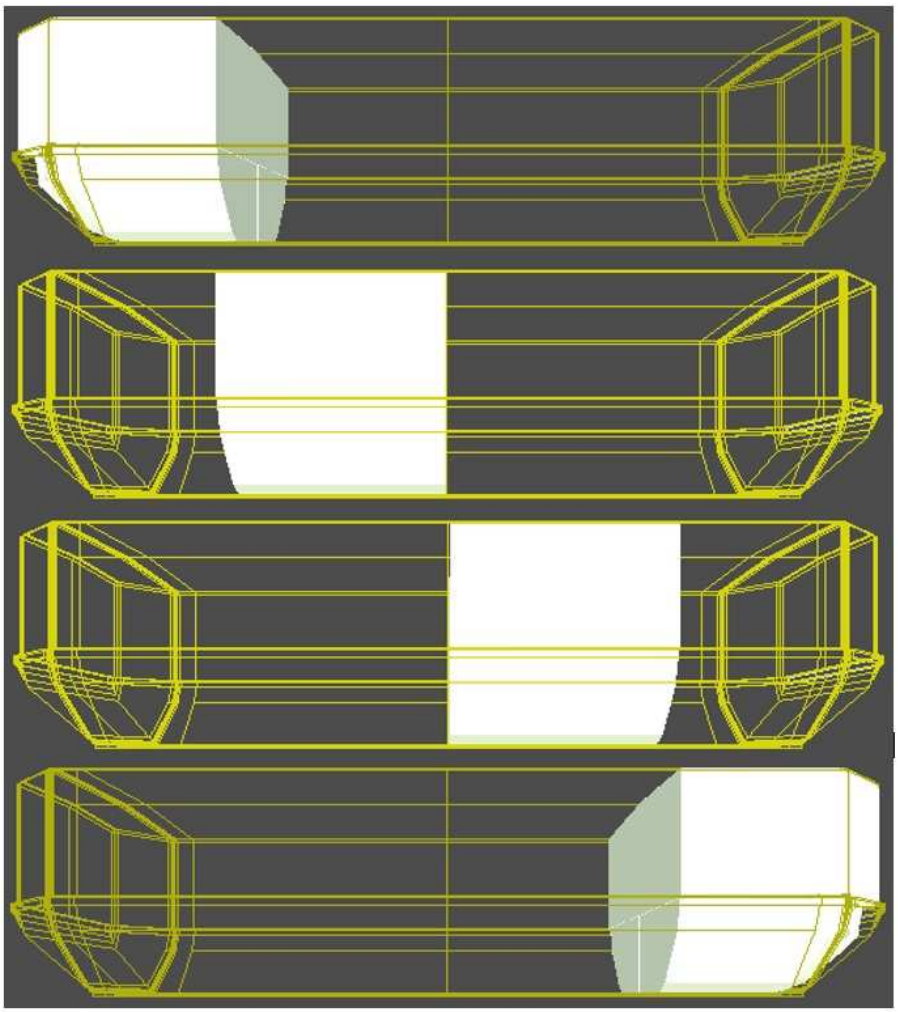


Рис. 3 Расчетная модель грузовых танков №№ 1 — 4 судна проекта 04080

По результатам расчетов получены вероятности и параметры вылива при бортовых и днищевых повреждениях, а также произведена оценка влияния вероятности бортовых и днищевых повреждений на индекс предотвращения загрязнения.

Принимая во внимание условия эксплуатации судна как стоечного с системой удержания, с подготовленной грунтовой подушкой на дне акватории в месте установки, защитными сваями со стороны моря, допустимо предположить вероятность бортовых и днищевых повреждений при эксплуатации судна незначительной. Для оценки влияния вероятности бортовых и днищевых повреждений на ключевой параметр расчетов по резолюции [3] — индекс предотвращения загрязнения E — были проведены тестовые расчеты при вероятности бортовых и днищевых повреждений от 100 % до 10 % с шагом 10 % в различных сочетаниях. На рис. 4 представлена диаграмма зависимости индекса предотвращения загрязнения E от вероятностей бортовых и днищевых повреждений. Цветом выделена область комбинаций вероятностей бортовых и днищевых повреждений, при которых $E \geqslant 1$.

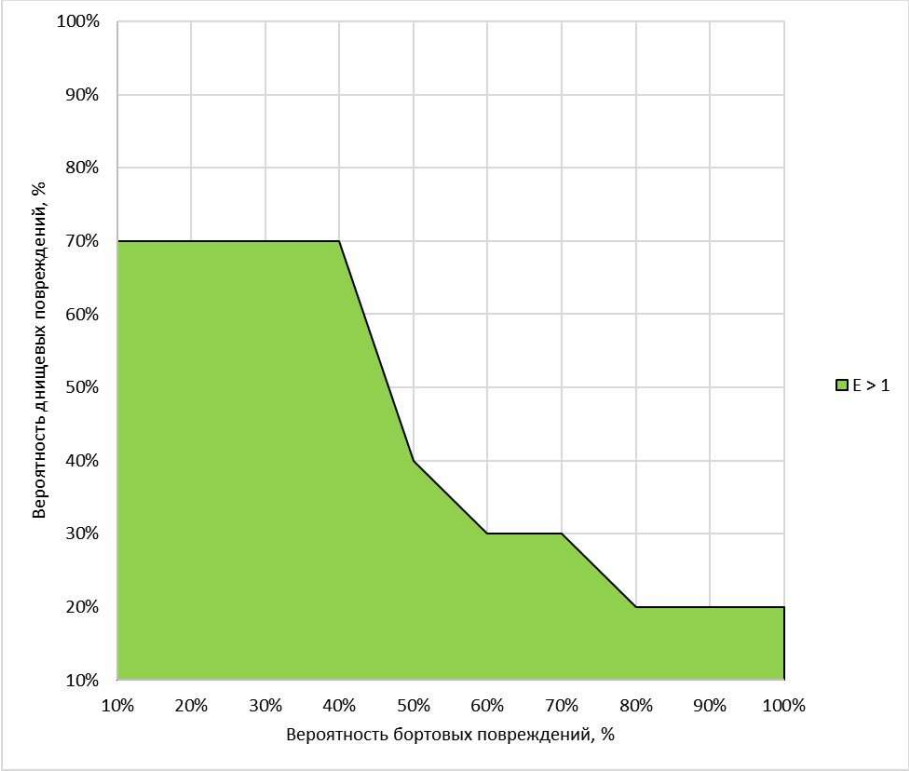


Рис. 4 Диаграмма зависимости индекса предотвращения загрязнения E от вероятностей бортовых и днищевых повреждений

В результате анализа выполненных расчетов по проектируемому ж/б накопителю проекта 04080 установлено следующее.

1. С учетом низкой вероятности возникновения бортовых и днищевых повреждений судна, благодаря принятым эксплуатационным мерам, полученный в результате расчетов индекс предотвращения загрязнения E удовлетворяет требованиям резолюции MEPC.110(49) [3] ($E \geqslant 1$).

2. Для исключения вероятности днищевых повреждений рекомендуется при грузовых операциях оставлять не менее 10 % груза в танках для обеспечения посадки судна с касанием днищем подготовленной грунтовой подушки.

ВЫПОЛНЕНИЕ РАСЧЕТОВ ВЕРОЯТНОСТИ СРАВНИТЕЛЬНО НЕСИЛЬНЫХ СТОЛКНОВЕНИЙ С УЧЕТОМ ОСОБЕННОСТЕЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ СУДНА

Данный расчет включал в себя вычисление вероятности столкновения ж/б накопителя с другим судном (на основании статистики судозаходов и факторов, препятствующих столкновению судов), а также вероятности отрыва ж/б накопителя от подготовленной песчаной подушки и расчет прочности днища при постановке на нее.

Для определения вероятности столкновения судов, заходящих в порт, со стоечным судном, за основу была принята статистика судозаходов от администрации порта «Большой порт Санкт-Петербург» за 2000 — 2020 гг. Судозаходы в порт с 2011 по 2020 гг. для грузовых судов, пассажирских судов, танкеров и рыболовных судов представлена на рис. 5 с указанием тренда.

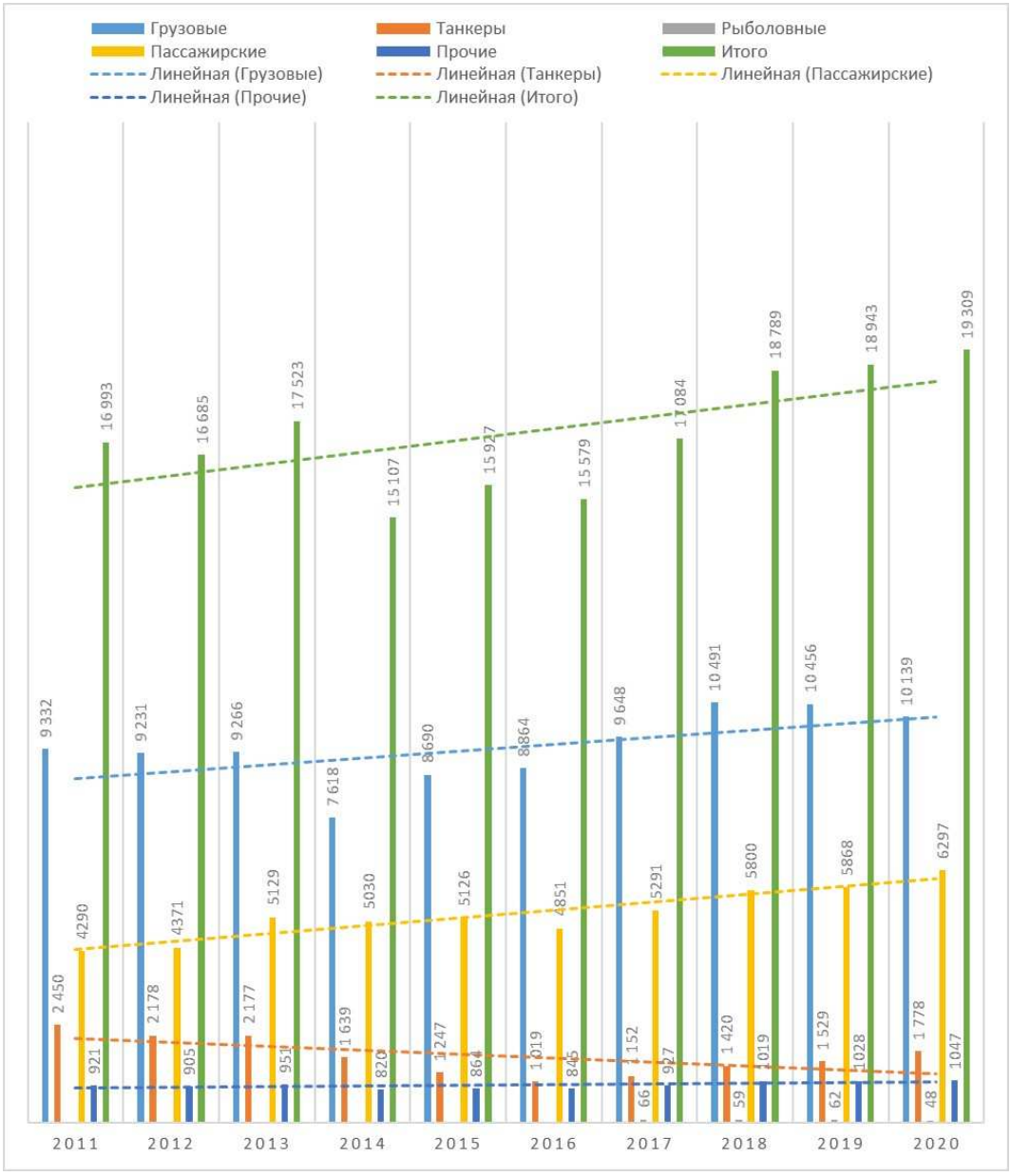


Рис. 5 Количество судозаходов в порту «Большой порт Санкт-Петербург», 2011 — 2020 гг

В качестве статистики аварийных случаев с судами в акватории порта принимается статистика аварийных случаев в восточной части Финского залива, предоставленная Северо-западным управлением государственного морского и речного надзора (СЗ УГМРН). Статистика за 2011 — 2020 гг. приведена на рис. 6.

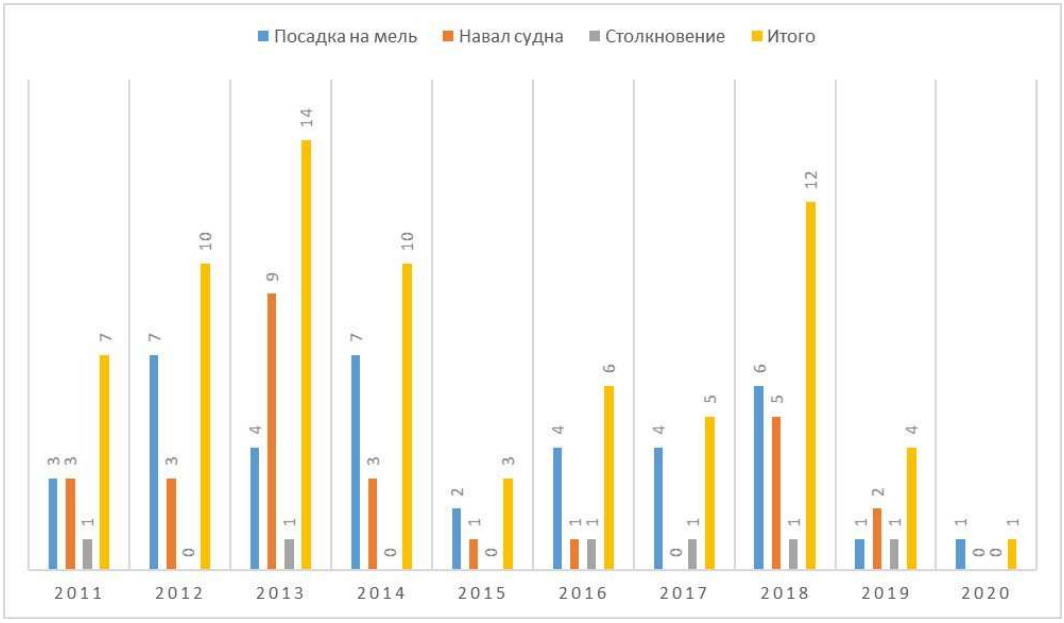


Рис. 6 Статистика аварий в восточной части Финского залива, 2011 — 2020 гг

По формуле (2) строятся и рассчитываются вероятности аварийных случаев:

$$P(i) = m/n, \quad (2)$$

где i — период времени (год);
m — количество аварийных случаев;
n — количество судов.

Таким образом, определяется математическое ожидание для всех видов аварийных ситуаций, фиксируемых СЗ УГМРН:

- посадка на мель = $2{,}33 \cdot 10^{-5}$;
- навал судна = $1{,}57 \cdot 10^{-5}$;
- столкновение = $0{,}34 \cdot 10^{-5}$;
- общая = $4{,}42 \cdot 10^{-5}$.

На основании имеющихся данных по судозаходам и статистики аварийных ситуаций, определяется вероятность наступления аварийных случаев в восточной части Финского залива в период с 2011 по 2020 гг., результаты которой представлены на рис. 7 с указанием тренда.

Поскольку для защиты стоечного судна от столкновения с другими судами предполагается установка свайного поля на акватории порта, необходимо произвести «отсеивание» судов по их размерам: осадка менее 7 м (определяется по карте глубин в районе причала ИФ-1) и ширина менее 8 м (на основании максимальной ширины между сваями защитного поля).

Для пропорционального «отсеивания» судов из общего количества судозаходов в порт, была проанализирована Регистровая книга РС 2019 года, откуда из общего количества судов определен процент судов с подходящими размерениями для определения доли судов, представляющих потенциальную угрозу столкновения в порту (см. табл. 1).

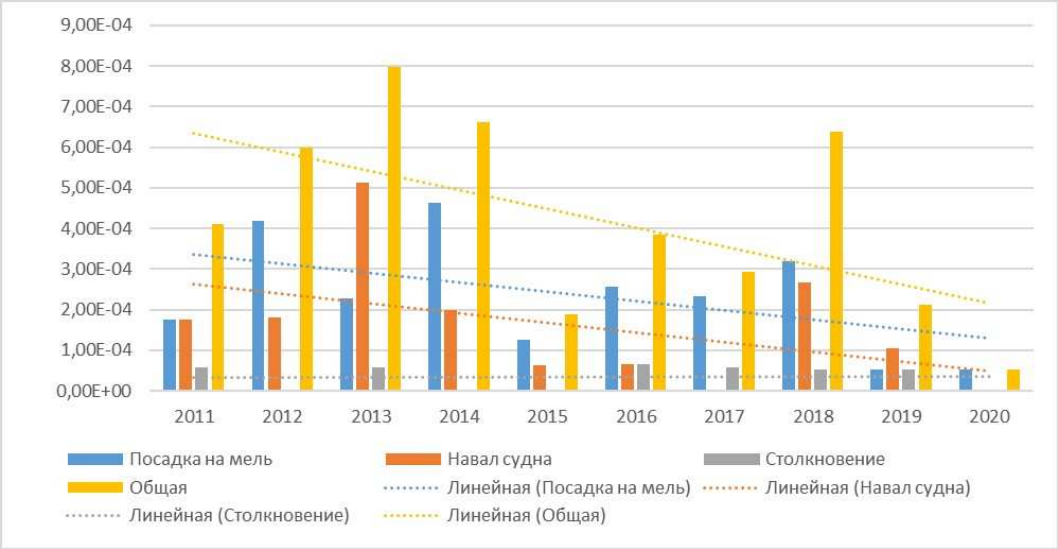


Рис. 7 Вероятность аварийных случаев в восточной части Финского залива

Таблица 1

Соотношение общего количество судов к судам с ограничениями

Тип	Судов с ограничениями по размерениям, шт.	Всего в Регистровой книге РС, шт.
Грузовые	66	885
Пассажирские	42	117
Танкеры	31	528
Рыболовные	170	889
Прочие	82	866
Итого	**391**	**3285**

Таким образом на основании статистических данных по аварийным ситуациям за 2011 — 2020 гг. и судозаходам, с учетом ограничений акватории в виде свайного поля и ограничений по глубине, определена итоговая вероятность навала и/или столкновения судна со стоечным ж/б накопителем. Итоговая вероятность приведена в табл. 2.

Таблица 2

Итоговая вероятность навала и/или столкновения с ж/б накопителем

Тип	Вероятность аварийных случаев		
	Навал судна	Столкновение	Общая*)
Грузовые	$1{,}17\cdot10^{-6}$	$0{,}26\cdot10^{-6}$	$1{,}43\cdot10^{-6}$
Пассажирские	$0{,}92\cdot10^{-6}$	$0{,}20\cdot10^{-6}$	$1{,}12\cdot10^{-6}$
Танкеры	$2{,}99\cdot10^{-6}$	$0{,}66\cdot10^{-6}$	$3{,}65\cdot10^{-6}$
Рыболовные	$0{,}56\cdot10^{-6}$	$0{,}12\cdot10^{-6}$	$0{,}69\cdot10^{-6}$
Прочие	$1{,}48\cdot10^{-6}$	$0{,}33\cdot10^{-6}$	$1{,}81\cdot10^{-6}$
Общая	$\mathbf{1{,}90\cdot10^{-6}}$	$\mathbf{0{,}42\cdot10^{-6}}$	$\mathbf{2{,}31\cdot10^{-6}}$
*) исключая посадки на мель			

Совместное применение полученных статистических оценок аварийных ситуаций и вероятностей достижения судном рассматриваемого объекта позволило определить итоговую вероятность столкновения и навала, которая соответственно равна $1{,}90\cdot10^{-6}$ и $0{,}42\cdot10^{-6}$. Общая вероятность наступления одной либо другой аварийной ситуации составляет $2{,}31\cdot10^{-6}$ или менее 1 %, что в соответствии с рис. 3 является безопасной зоной по индексу предотвращения загрязнения E.

ВЫПОЛНЕНИЕ РАСЧЕТОВ ВЕРОЯТНОСТИ ОТРЫВА Ж/Б НАКОПИТЕЛЯ ОТ ПОДГОТОВЛЕННОЙ ПЕСЧАНОЙ ПОДУШКИ

Поскольку ж/б накопитель штатно установлен на специально подготовленной песчаной подушке и не предполагает всплытия, то необходимо произвести оценку вероятности его отрыва от подушки с учетом различных сценариев (проведение грузовых операций и изменение уровня воды в акватории). При этом бункеровка судов осуществляется только через береговую систему трубопровода, так как проектом швартовка судов к ж/б накопителю исключена.

Для оценки вероятности отрыва ж/б накопителя от грунта учитывается множество факторов, таких как: уровень воды в акватории, осадки судна при разной загрузке, статистика наводнений в точке базирования и т.д.

Таким образом с учетом рассмотренных влияющих факторов вероятность отрыва ж/б накопителя от песчаной подушки составит $P_{отр} = 0{,}0261$, а итоговая вероятность повреждения днища ж/б накопителя составит $P_{общ} = 1{,}43 \cdot 10^{-4}$ или менее 1 %, что в соответствии с рис. 3 является безопасной зоной по индексу предотвращения загрязнения E.

ОЦЕНКА РИСКОВ С УЧЕТОМ ОСОБЕННОСТЕЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ СУДНА

После определения вероятности наступления аварийной ситуации и тяжести возможных последствий, строится матрица рисков согласно рекомендациям части XV «Оценка безопасности ПБУ/МСП» Правил классификации, постройки и оборудования плавучих буровых установок и морских стационарных платформ РС [5].

За расчетную вероятность наступления аварийного события принята полученная общая вероятность возможного контакта накопителя с грунтом или другим судном. Определение вероятности повреждений, а также предполагаемого объема вылива нефти выполнялись по методике резолюции ИМО.

В соответствии с этой методикой, уровень защиты от вылива нефти выражается «индексом предотвращения загрязнения» E, который зависит от трех параметров: вероятности «нулевого вылива», объема «среднего вылива» и объема «экстремального вылива». На рис. 8 приведена матрица рисков в варианте с их количественной оценкой. Для шкалы вероятностей применен логарифмический масштаб в диапазоне от 10^{-8} до 10^{-1}.

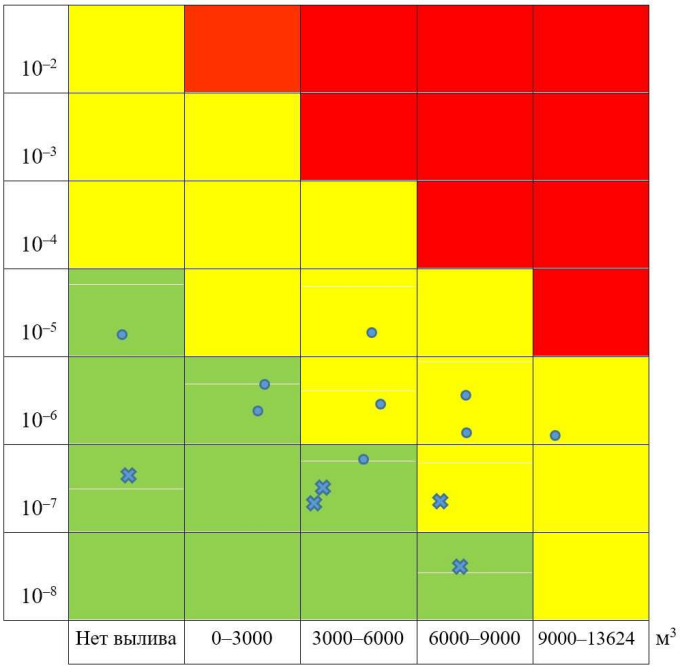


Рис. 8 Матрица рисков аварий и вылива нефтепродуктов из ж/б накопителя:
● — риски при предполагаемых повреждениях днища;
✖ — риски при предполагаемых повреждениях борта

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате НИР было установлено, что с учетом низкой вероятности возникновения бортовых и днищевых повреждений судна, благодаря принятым эксплуатационным мерам, полученный в результате расчетов индекс предотвращения загрязнения E удовлетворяет требованиям резолюции MEPC.110(49) ($E>1$). Также были предложены некоторые меры по снижению риска возникновения повреждений судна и вылива нефтепродуктов.

Таким образом, можно считать стоечное железобетонное судно-накопитель альтернативного конструктивного решения проекта 04080, не имеющее двойных бортов и двойного дна, пригодным для безопасной эксплуатации на рассматриваемой акватории, что подтверждено одобрением Регистра и Морской Администрацией РФ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. MEPC.277(70). Amendments to the Annex of the International Convention for the Prevention of Pollution From Ships, 1973, as Modified by the Protocol of 1978 Relating thereto. — London: IMO, 28.10.2016.
2. MEPC.311(73) Guidelines for the application of MARPOL Annex I requirements to floating production, storage and offloading facilities (FPSOs) and floating storage units (FSUs). — London: IMO, 26.10.2018.
3. MEPC.110(49) Revised interim guidelines for the approval of alternative methods of design and construction of oil tankers under regulation 13F(5) of Annex I of MARPOL 73/78. — London: IMO, 18.07.2003.
4. MSC/Circ1023 — MEPC/Circ.392. Guidelines for formal safety assessment (FSA) for use in the IMO rule-making process. — London: IMO, 05.04.2002.
5. Правила классификации, постройки и оборудования плавучих буровых установок и морских стационарных платформ, СПб, Российский морской регистр судоходства, 2018.

REFERENCES

1. MEPC.277(70). Amendments to the Annex of the International Convention for the Prevention of Pollution From Ships, 1973, as Modified by the Protocol of 1978 Relating thereto. — London: IMO, 28.10.2016.
2. MEPC.311(73) Guidelines for the application of MARPOL Annex I requirements to floating production, storage and offloading facilities (FPSOs) and floating storage units (FSUs). — London: IMO, 26.10.2018.
3. MEPC.110(49) Revised interim guidelines for the approval of alternative methods of design and construction of oil tankers under regulation 13F(5) of Annex I of MARPOL 73/78 — London: IMO, 18.07.2003.
4. MSC/Circ.1023 — MEPC/Circ.392. Guidelines for formal safety assessment (FSA) for use in the IMO rule–making process. — London: IMO, 05.04.2002.
5. Rules for the Classification, Construction and Equipment of Mobile Offshore Drilling Units and Fixed Offshore Platforms, St. Petersburg, Russian Maritime Register of Shipping, 2018. (In Russian)



МАТЕРИАЛЫ И СВАРКА

УДК 629.5:656.6

РАЗРАБОТКА ТРЕБОВАНИЙ К МАТЕРИАЛАМ И ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТРЕХСЛОЙНЫХ ПАНЕЛЕЙ, ЯВЛЯЮЩИХСЯ ЭЛЕМЕНТАМИ КОРПУСНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

А.А. Петров, канд. техн. наук, АО «ЦНИИМФ», Санкт-Петербург, e-mail: Petrov25@cniimf.ru

Одной из перспективных технологий ремонта корпусных конструкций является ремонт с помощью трехслойных панелей (сэндвич-панелей), который в 2018 году был впервые выполнен на судне с классом РС. Статья содержит основные результаты научно-исследовательской работы, направленной на внедрение данной технологии в нормативную базу РС. Обзор существующих типов трехслойных панелей показал, что наиболее востребованными и практичными, но не регламентированными Правилами РС, являются стальные трехслойные панели со сплошным гомогенным заполнителем (СТП). В результате анализа требований ряда классификационных обществ к сертификации материалов СТП и оценке прочности конструкций, отремонтированных с их применением, сформулированы предложения по корректировке действующих нормативных документов РС.

Ключевые слова: *трехслойные панели, сэндвич-панели, SPS, композитные материалы, судоремонт, Правила РС*

DEVELOPMENT OF REQUIREMENTS FOR MATERIALS AND MANUFACTURING TECHNOLOGY FOR THREE-LAYER PANELS USED AS ELEMENTS OF HULL STRUCTURES

A.A. Petrov, PhD, JSC CNIIMF, St. Petersburg, e-mail: Petrov25@cniimf.ru

One of the promising technologies for repairing hull structures is the application of three-layer panels (sandwich panels). This technology was first applied on a ship with RS class in 2018. The article contains the main results of research work aimed at introducing this technology into RS regulatory framework. A review of the existing types of three-layer panels has shown that steel three-layer panels with solid homogeneous aggregate (STP) are the most popular and practical, but not yet regulated by the RS Rules. Analysis of the requirements of a number of classification societies for the certification of STP materials and the assessment of the strength of structures repaired with their use has resulted in the proposals for adjusting the current RS normative documents.

Keywords: *three-layer panels, sandwich plate system, SPS, composite materials, ship repair, RS Rules*

ВВЕДЕНИЕ

В 2018 году на судоремонтном заводе Tallinn Shipyard BLRT Group Регистр впервые осуществил наблюдение за ремонтом корпусных конструкций научно-исследовательского судна с помощью стальных трехслойных панелей [1]. Этот метод ремонта зарекомендовал себя как быстрый и эффективный способ продления срока службы корпусных конструкций[1], и для его дальнейшего внедрения в деятельность Регистра в 2021 году было инициировано выполнение научно-исследовательской работы (НИР) на тему «Разработка предложений по дополнению части Правил классификации и постройки морских судов требованиями к материалам и технологии изготовления трехслойных панелей, являющихся элементами корпусных конструкций». По итогам тендерной процедуры исполнителем НИР было определено АО «ЦНИИМФ», работа выполнялась в период с марта по октябрь 2021 года. Ниже приведены основные результаты НИР.

1. АНАЛИЗ ТИПОВ ТРЕХСЛОЙНЫХ ПАНЕЛЕЙ. ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСЛОВИЙ И ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ТРЕХСЛОЙНЫХ ПАНЕЛЕЙ В КОНСТРУКЦИЯХ МОРСКИХ СУДОВ

Трехслойная панель представляет собой составную конструкцию, состоящую из двух несущих слоев, заполнителя, расположенного между несущими слоями, и элементов каркаса (окантовок, опалубок, законцовок, накладок, книц) (см. рис. 1).

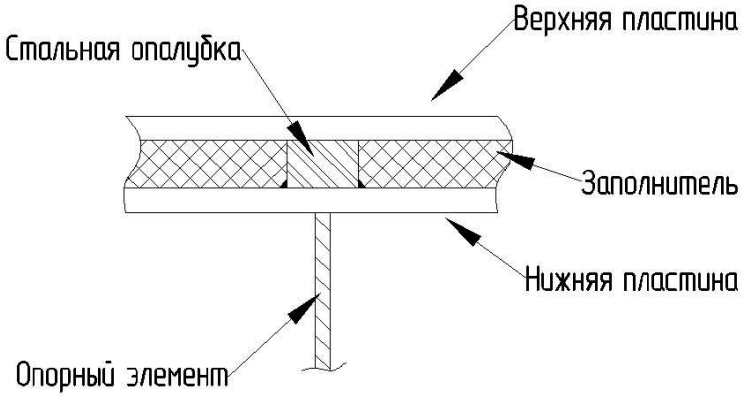


Рис. 1 Вариант компоновки трехслойной панели с заполнителем

В общем случае трехслойные панели классифицируются по материалу, из которого изготовлены несущие и промежуточный слои:

- полностью металлическая трехслойная панель (ПМТП);
- композитная трехслойная панель (КТП);
- металлическая трехслойная панель (МТП) с гомогенным неметаллическим заполнителем.

В табл. 1 приведены иллюстрации различных типов трехслойных панелей [3], однако стоит отметить, что этот перечень не является исчерпывающим. Например, для ПМТП способ соединения верхнего и нижнего листа ПМТП не поддается унификации и нельзя исключать появления в будущем новых конструктивных решений.

Техническим заданием на выполнение НИР была предусмотрена разработка требований к характеристикам и испытаниям материалов трехслойных панелей, ввиду чего в работе не рассматривались ПМТП и КТП по следующим причинам:

- ПМТП включают в себя только металлические материалы. Требования к испытаниям материалов и изготовлению конструкций из металлических материалов в полной мере изложены в существующих НД РС;
- КТП с полимерной матрицей достаточно полно описаны в части XVI «Конструкция и прочность судов из полимерных композитных материалов» Правил классификации и постройки морских судов [4].

[1]Подробное описание технологии ремонта с помощью СТП и анализ преимуществ данного метода приведены в [1, 2].

Таблица 1

Типы трехслойных панелей [3]

<table>
<tr><th>Тип панели</th><th>Материал несущего слоя</th><th colspan="3">Материал / структура заполнителя</th></tr>
<tr><td rowspan="4">ПМТП</td><td rowspan="3">Сталь</td><td colspan="2">Однонаправленные металлические ребра</td><td>Разнонаправленные металлические ребра</td></tr>
<tr><td> Гофровая структура</td><td rowspan="3">Ферменно-стоечная структура </td></tr>
<tr><td> Стеночная структура</td></tr>
<tr><td> Структура со стеночным Z-образным профилем</td></tr>
<tr><td>Алюминий</td><td> Гофровая структура</td><td colspan="2">Сотовая ячеистая структура </td></tr>
<tr><td>КТП</td><td>Композитный материал (например, стекловолокно)</td><td> Полиуретановая пена</td><td> Композитный заполнитель сотовой структуры</td><td> Твердый полиуретан с композитными гофрами</td></tr>
<tr><td>МТП</td><td>Сталь / алюминий</td><td> Неметаллические ребра жесткости</td><td> Сплошной полимерный заполнитель (с армированием)</td><td> Сплошной полимерный заполнитель (без армирования)</td></tr>
</table>

Несмотря на то, что нормативные документы некоторых иных классификационных обществ (ИКО) предусматривают возможность применения трехслойных панелей при постройке новых судов [5 — 7], достоверных сведений о таких проектах, реализованных на практике, нет. Кроме того, при ряде преимуществ данной технологии в судоремонте, ее экономическая эффективность при постройке новых судов не доказана, и в ближайшей перспективе ожидать повышения спроса на нее в этой области нет оснований. Поэтому в НИР и при формировании предложений по корректировке НД РС данная технология рассматривалась как метод полного ремонта на судах, попадающих под действие части II «Корпус» Правил классификации и постройки морских судов [4]; суда и морские сооружения, для которых в НД РС есть отдельные правила (газовозы, химовозы, высокоскоростные суда и т.д.) были исключены из области применения новых требований.

Применительно к МТП на данном этапе рассматривались только панели со стальными несущим листами, поскольку алюминиевые конструкции используются преимущественно на высокоскоростных судах, для которых применение трехслойных панелей не предусмотрено (см. выше). Далее по тексту и в предложениях по корректировке НД РС использован термин «Стальная трехслойная панель со сплошным гомогенным заполнителем» (СТП).

2. АНАЛИЗ ТРЕБОВАНИЙ ИКО К СЕРТИФИКАЦИИ МАТЕРИАЛОВ СТП

В результате анализа действующих НД ИКО — членов МАКО было установлено, что требования к СТП приведены только в НД Lloyd's Register (LR) [5], China Classification Society (CCS) [6] и Det Norske Veritas (DNV) [7][1], при этом требования LR и CSS практически идентичны. Документы других ИКО — членов МАКО либо не содержат упоминаний о трехслойных панелях, либо разрешают их использование в очень узком сегменте (например, НД American Bureau of Shipping (ABS) [8] включают требования по постройке яхт из трехслойного композитного материала с заполнителем).

Во всех рассмотренных НД при сертификации стальных листов СТП предписывается руководствоваться положениями основных правил постройки. В требованиях по испытаниям и сертификации материалов заполнителя СТП есть несущественные различия, однако в целом, они достаточно хорошо коррелируют между собой (см. табл. 2).

Таблица 2

Требования к эластомеру в отвержденном состоянии

№ п/п	Характеристика	Стандарт	Критерий	
	ИКО→	LR, DNV, CCS	LR и CCS	DNV
1	Плотность	ISO 845	$\geqslant$1000 кг/м^3 при КТ[1)]	$>$1000 кг/м^3
2	Твердость	DIN 53505; для CCS: или GB/T 2411	Шор: $D \geqslant 65$ при КТ[2)]	65 при 20 °C
3	Модуль сдвига	DIN EN ISO 6721-2 3) для CCS: или ASTM test E1356	$\geqslant 312-2{,}4T$ (°C)	$\geqslant 312-2{,}4T$ (°C) или $\geqslant$120 Н/мм^2 при 80 °C
4	Прочность на растяжение	ISO 527 или ASTM D412	$\geqslant$20 Н/мм^2 при КТ; $\geqslant$5 Н/мм^2 при 80 °C	$>$5 Н/мм^2 при 80 °C
5	Удлинение (при разрыве)	ISO 527 или ASTM D412	$\geqslant$10 % при $-$20 °C; $\geqslant$20 % при КТ	$\geqslant$10% при – 20°C; $\geqslant$20% при 20°C
6	Адгезионная прочность к стальной подложке (прочность при сдвиге)	ASTM D429-81	$\geqslant$2,7 Н/мм^2 (абразив типа S) /shot/ $\geqslant$4 Н/мм^2 (абразив типа G) /grit/	$\geqslant$3,7 Н/мм^2 (абразив типа S) $\geqslant$6,2 Н/мм^2 (абразив типа G)
7	Модуль упругости при растяжении	Только для DNV: ISO 527 или ASTM D412	—	$\geqslant$200 Н/мм^2 при 80 °C
8	Прочность на срез при изгибе	Только для DNV: ASTM C393	—	Более допустимой нагрузки, определенной по Правилам DNV
9	Прочность при сжатии	Только для DNV: ISO 604 ASTM; D575	—	$\geqslant$5 Н/мм^2 при 80 °C
10	Модуль упругости при сжатии	Только для DNV: ISO 604 ASTM; D575	—	$\geqslant$200 Н/мм^2 при 80 °C
11	Испытание на ударную прочность при растяжении (–80 °C ~ +80 °C)	Только для CCS; LR, DNV (–)	Критерий не указан; LR (–)	—
12	Устойчивость материала к воздействию соленой воды и химических веществ[4)]	Только для CCS; LR, DNV (–)	Критерий не указан; LR (–)	—

[1)]Согласно CCR КТ = 23 $\pm$ 5 °C, в LR не приведена.

[2)]Твердость по Шору; определяется по шкале D.

[3)]Для LR и CCR испытания с помощью торсионного маятника в диапазоне от –20 °C до 80 °C; для DNV-GL допустимо проводить только при 80 °C.

[4)]В отличие от других испытаний, проводимых в присутствии инспектора, в этом случае достаточно представить в CCS отчет об испытаниях.

[1]В 2021 году классификационное общество Det Norske Veritas – Germanischer Lloyd (DNV-GL) было переименовано в Det Norske Veriats (DNV), однако ряд НД общества, в том числе [7] в актуальной версии содержат старое название. В списке источников приведено название НД в соответствии с информацией официального Интернет-ресурса общества.

В результате выполненного анализа определено, что по контролю качества компонентов полиуретана требования ИКО, в целом, идентичны, а для отвержденного эластомера необходимыми и достаточными являются испытания для проверки следующих свойств по критериям международных стандартов:

- плотность;
- твердость;
- модуль сдвига;
- прочность на растяжение;
- удлинение при разрыве образца;
- адгезионная прочность к стальной подложке.

3. АНАЛИЗ ТРЕБОВАНИЙ К ПРОЧНОСТНЫМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ СТП

Ремонт изношенного настила с образованием СТП предназначен для восстановления прочности, преимущественно палуб и платформ, у которых средняя остаточная толщина листовых элементов S_1 меньше допускаемого значения $[S_1]$, определяемого в соответствии с Приложением 2 к Правилам классификационных освидетельствований судов в эксплуатации [9].

В связи с низким модулем упругости заполнителя его участием в изгибе панели обычно пренебрегают, то есть считается, что слой заполнителя воспринимает и передает исключительно поперечную нагрузку, предотвращая сближение несущих слоев при изгибе. Схема распределения напряжений в СТП показана на рис. 2.

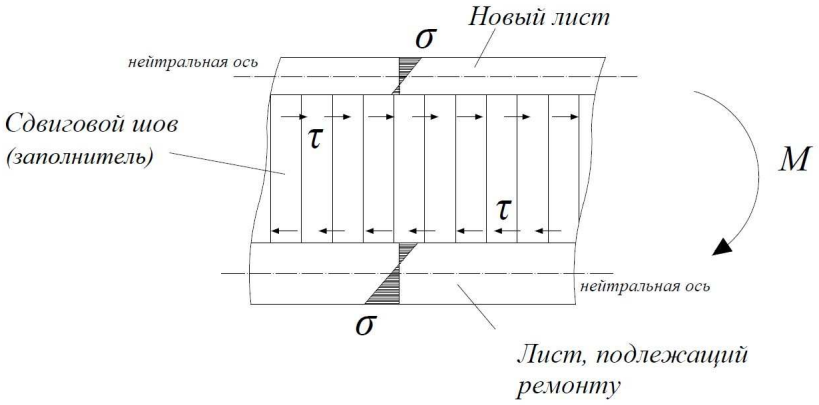


Рис. 2 Распределение напряжений в составной пластине при изгибе

В рассмотренных НД ИКО имеются требования к толщине слоя заполнителя или к толщинам слоя заполнителя и верхней пластины. Проверка прочности СТП основана на определении нормальных и/или касательных напряжений в различных слоях панели при ее изгибе под действием распределенной нагрузки.

Правила LR [5] и CSS [6] предписывают при определении необходимой толщины заполнителя вычислять коэффициент прочности R при действии некоторой эквивалентной нагрузки P_{eq}. Толщина слоя заполнителя является достаточной, если $R \leqslant 1$.

В Правилах DNV [7] рассматривается трехмерная модель СТП. Метод основан на сравнении нормальных напряжений, действующих в различных слоях составной пластины t_1 и t_2, с их допускаемыми значениями, а также на сравнении касательных напряжений в сдвиговом шве t_c с допускаемыми напряжениями заполнителя. Во всех случаях должно выполняться условие $\sigma < [\sigma]$ и $\tau < [\tau]$. Иначе толщины верхней пластины t1 и слоя заполнителя tc должны быть увеличены. Допускаемые значения напряжений зависят от материала заполнителя.

В статье [1] приводится краткое описание способа проверки прочности трехслойной панели, основанного на монографии А.Р. Ржаницина «Составные стержни и пластинки» [10], который был использован при обосновании ремонта с помощью СТП первого судна с классом РС. Однако для его применения требуется большой массив исходных данных, поэтому в описываемой НИР дополнительно была рассмотрена методика оценки прочности трехслойных панелей, приведенная в справочнике «Расчет трехслойных конструкций» под

общей редакцией проф. В.Н. Кобелева [11], которая, как показал анализ, по своему подходу аналогична требованиям DNV.

Учитывая то, что размеры стальных листов СТП определяются в соответствии с частью II «Корпус» Правил классификации и постройки морских судов [4], проверка прочности СТП по нормальным напряжениям представляется избыточной, поэтому в предложенных дополнениях к НД РС предусмотрена только оценка касательных напряжений, возникающих в сдвиговом шве по условию

$$\tau_3 < [\tau]. \quad (1)$$

Допускаемое касательное напряжение $[\tau]$ определяется в долях от предела прочности на сдвиг τ_f и в большинстве источников составляет $0{,}4 \div 0{,}6\tau_f$. В выполненной в 2018 году НИР [12], рассмотренной ГУР с положительным заключением, было обосновано значение

$$[\tau] = 0{,}55\tau f, \quad (2)$$

которое предложено использовать и в настоящей работе.

В рамках НИР был выполнен сравнительный анализ описанных выше методик в части определения касательных напряжений, возникающих в сдвиговом шве СТП. Применительно к НД LR и CSS вычислялся индекс прочности R. Для примера было выбрано судно, на котором ранее был осуществлен ремонт с помощью СТП, основные исходные данные для расчета приведены в табл. 3, результаты расчета — на рис. 3.

Таблица 3

Исходные данные для расчета касательных напряжений

Параметр	На момент установки СТП	При минимальных допускаемых остаточных толщинах	На момент установки СТП	При минимальных допускаемых остаточных толщинах
№ расчетного случая	1	2	3	4
Конструкция	Настил палубы надстройки		Настил второго дна	
Расстояние между балками набора a, мм	750			
Поперечная нагрузка q, МПа	$5{,}69 \cdot 10^{-3}$		$81{,}15 \cdot 10^{-3}$	
Толщина верхнего листа t_1, мм	3,89	3,00	9,09	3,00
Толщина нижнего листа t_2, мм	4,80	3,00	5,30	3,00
Толщина слоя заполнителя t_3, мм	15,00			
Модуль упругости стальных листов E, МПа	$2{,}06 \cdot 10^5$			
Модуль упругости заполнителя E_3, МПа	686,00			
Модуль сдвига стальных листов G, МПа	$7{,}92 \cdot 10^4$			
Модуль сдвига заполнителя G_3, МПа	264,00			
Предел текучести стали R_{eH}, МПа	235,00			
Предел прочности на сдвиг полиуретана τ_f, МПа	4,00			

Во всех расчетных случаях условие (1) выполняется, а для НД LR и CSS индекс прочности $R < 1$. Как видно из рис. 3, все методики дают очень близкие результаты, однако отличаются по трудоемкости вычислений, поэтому в предлагаемых требованиях РС принята самая удобная для выполнения практических расчетов формула из [11]:

$$\tau_3 = \pm \frac{qa}{2(h_2 - h_1)}, \quad (3)$$

где $h_1 = 0{,}5t_1(1 + t_3/t_1)$, мм;
$h_2 = 0{,}5t_2(1 + t_3/t_2)$, мм;
t_1, t_2, t_3, q, a — см. табл. 3.

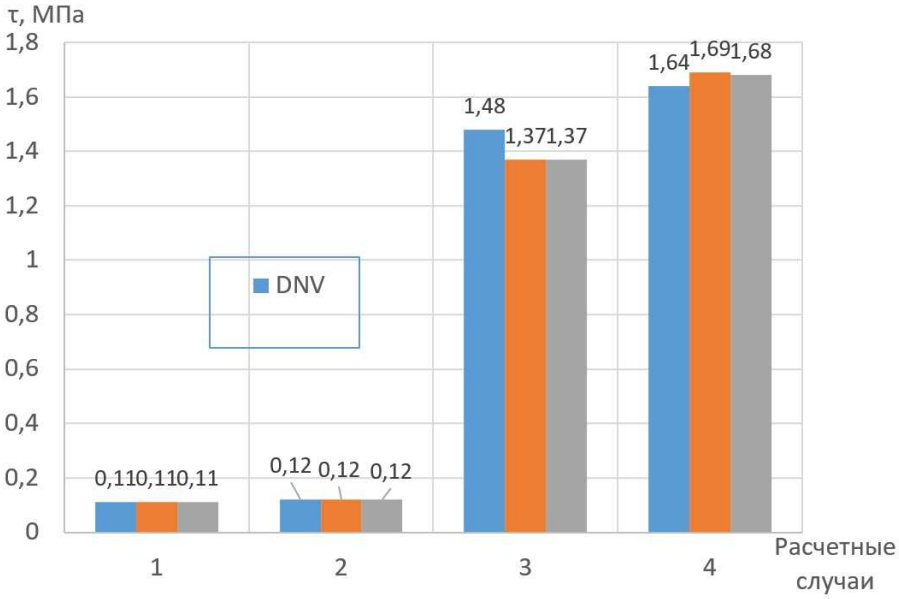


Рис. 3 Сравнение величин касательных напряжений, вычисленных различными методами

Помимо методики определения размеров элементов СТП и проверки прочности, в результате НИР сформулированы требования по технологии изготовления и оценке технического состояния СТП в процессе эксплуатации, в общем описанные в [1, 2] и на данном этапе гармонизированные с действующими НД РС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате НИР были сформулированы предложения по изменению и дополнению ряда действующих НД РС, которые для наглядности обобщены в виде схемы, представленной на рис. 4. Стоит ожидать, что внедрение технологии ремонта корпусных конструкций с помощью СТП в нормативную базу РС позволит расширить возможности продления срока службы многих эксплуатирующихся судов, а также способствовать развитию новых технологий судоремонта.



Рис. 4 Схема изменений и дополнений действующих НД РС

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Петров А.А. Применение трехслойных панелей при ремонте судов с классом РС / А.А. Петров, М.Д. Емельянов, Е.В. Баскакова // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — СПб: 2018. — № 52-53. — с. 73 — 80.
2. Петров А.А. Продление срока службы корпусных конструкций с помощью трехслойных панелей / А.А. Петров // Сборник научных трудов Центрального научно-исследовательского института морского флота. — СПб: 2019. — Вып. 1. — с. 74 — 80.
3. Best Practice Guide for Sandwich Structures in Marine Applications / ed. NewRail, University of Newcastle upon Tyne. SAND.CORe.
4. Правила классификации и постройки морских судов, в 17 ч. — СПб. Российский морской регистр судоходства, 2021.
5. Rules for the Application of Sandwich Panel Construction to Ship Structure. Lloyd's Register. — 2020.
6. Guidelines for the application of steel sandwich panel construction to structure. China Classification Society. — 2007.
7. Steel sandwich panel construction. Det Norske Veritas — Germanischer Lloyd. — 2016.
8. Guide for building and classing yachts. American Bureau of Shipping. — 2020.
9. Приложения к Правилам классификационных освидетельствований судов в эксплуатации. — СПб: Российский морской регистр судоходства, 2021.
10. Ржаницин А.Р. Составные стержни и пластинки. / А.Р. Ржаницин. — М.: Стройиздат, 1986. — 316 с.
11. Кобелев В.Н. Расчет трехслойных конструкций. Справочник / В.Н. Кобелев, Л.М. Коварский, С.И. Тимофеев. Под общей ред. д-ра техн. наук проф. В.Н. Кобелева. — М.: Машиностроение, 1984. — 304 с.
12. Оценка прочности судовых конструкций, отремонтированных с применением трехслойных панелей: отчет о НИР / АО «ЦНИИМФ», рук. темы Петров А.А. Инв. № 8643 (НТБ АО «ЦНИИМФ»). — СПб, АО «ЦНИИМФ», 2018. — 22 с.

REFERENCES

1. Petrov A. A., Emelyanov M.D., Baskakova E.V. *Primeneniye trekhsloynykh paneley pri remonte sudov s klassom RS* [Application of the Sandwich Plate System for repair of ships with RS class] Research bulletin by Russian maritime register of shipping, 2018, Nos. 52 — 53, pp. 73 — 80.
2. Petrov A. A. *Extending the service life of hull structures with three-layer panels. Sbornik nauchnyh trudov Tsentralnogo nauchno-issledovatelskogo instituta morskogo flota* [Collection of scientific papers of the Central Marine Research & Design Institute], 2019, vol. 1, pp. 74 — 80.
3. Best Practice Guide for Sandwich Structures in Marine Applications / Ed. NewRail, University of Newcastle upon Tyne. SAND.CORe.
4. Rules for the Classification and Construction of Sea-Going Ships, in 17 Parts. Russian Maritime Register of Shipping, 2021. (In Russian)
5. Rules for the Application of Sandwich Panel Construction to Ship Structure. Lloyd's Register, 2020.
6. Guidelines for the application of steel sandwich panel construction to structure. China Classification Society, 2007.
7. Steel sandwich panel construction. Det Norske Veritas — Germanischer Lloyd, 2016.
8. Guide for building and classing yachts. American Bureau of Shipping, 2020.
9. Annexes to the Rules for the Classification Surveys of Ships in Service, Russian Maritime Register of Shipping, 2021. (In Russian)
10. Rzhanicin A.R. *Sostavnye sterzhni i plastinki* [Composite rods and plates]. Moscow, Strojizdat, 1986, 316 p.
11. Kobelev V.N., Kovarskiy L.M., Timofeev S.I. *Raschet trehslojnyh konstruktsy. Spravochnik* [Calculation of three-layer structures. Handbook]. Moscow, Mashinostroenie, 1984, 304 p.
12. *Otsenka prochnosti sudovykh konstruktsiy, otremontirovannykh s primeneniem trekhslojnykh paneley: otchet o NIR* [Research work on strength assessment of ship structures repaired using three-layer panels] / JSC "CNIIMF", topic leader A.A. Petrov Inv. No. 8643 (STB JSC "CNIIMF"). St. Petersburg, JSC "CNIIMF", 2018, 22 p.



МЕХАНИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ДВИЖИТЕЛИ

УДК 621.25

ГИДРОМЕХАНИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ГРУЗОБАЛЛАСТНЫХ ОПЕРАЦИЙ ТАНКЕРОВ

Н.М. Подволоцкий, д-р техн. наук, Государственный университет морского и речного флота им. адм. С.О. Макарова, Санкт-Петербург, e-mail: kaf_tckvu@gumrf.ru

Рассмотрена гидромеханическая модель грузобалластных операций танкера, включая процесс зачистки емкостей в соответствии с требованиями Международной конвенции о контроле судовых балластных вод и осадков и управлении ими 2004 года. Модель учитывает: посадку судна, остойчивость, прочность корпуса, физические свойства перекачиваемого груза и балласта; форму и размеры емкостей, а также днищевого набора, включая расположение и форму протоков; топологию и характеристики систем: длины, диаметры трубопроводов, параметры местных сопротивлений; характеристики насосного оборудования: подача, напор, допустимая высота всасывания, способ регулирования подачи; условия эксплуатации: технология выполнения грузобалластных операций, количество одновременно действующих насосов и режимы их работы, температуру перекачиваемого груза, способ зачистки емкостей.

Ключевые слова: *танкер, гидромеханическая модель, грузо-балластные операции, параметры емкостей, грузовая система, балластная система, грузовые насосы, балластные насосы, режимы работы насосов, физические свойства груза, схема перемещения груза и балласта*

HYDROMECHANICAL MODEL OF CARGO-BALLAST OPERATIONS FOR TANKERS

N.M. Podvolotsky, DSc, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, St. Petersburg, e-mail: kaf_tckvu@gumrf.ru

The article considers hydromechanical model of cargo-ballast operations of a tanker is considered, including the process of stripping tanks in accordance with the requirements of Ballast Water Management Convention of 2004. The model takes into account ship trim, stability, strength of the hull, physical properties of the pumped cargo and ballast; the shape and dimensions of the tanks, as well as the bottom set, including the location and shape of the ducts; topology and characteristics of pipelines, parameters of local resistances; characteristics of pumping equipment, capacity, pressure, permissible suction height, method of regulating the capacity; operating conditions, the scheme of cargo-ballast operations, the number of simultaneously operating pumps and their conditions of operation, the temperature of the pumped cargo and the method of stripping of containers.

Keywords: *tanker, hydromechanical model, cargo-ballast operations, tank parameters, cargo system, ballast system, cargo pumps, ballast pumps, pump operating modes, physical properties of cargo, cargo and ballast movement scheme*

В настоящее время наблюдается интенсивное развитие мирового танкерного флота для перевозки углеводородов. Оно характеризуется: увеличением суммарного водоизмещения судов, непрерывной специализацией и ростом дедвейта для повышения экономичности эксплуатации, а также усложнением конструкции для обеспечения требований международных конвенций, касающихся безопасности и экологии.

Проектирование современных танкеров и их последующая эксплуатация выдвигает задачи:

- моделирования времени и эффективности ведения грузобалластных операций с учетом совместной работы грузовых, балластных и других обеспечивающих систем;
- моделирования безопасного ведения грузобалластных операций с учетом обеспечения остойчивости, прочности корпуса, требований экологии;
- моделирования перетекания балласта через днищевой набор с целью совершенствования его конструкции для полного осушения емкостей после балластировки и минимизации биологического загрязнения водных акваторий, в соответствии с требованиями Международной конвенции о контроле судовых балластных вод и осадков и управлении ими 2004 года.

Однако теоретическое обоснование упомянутых выше вопросов в технической литературе находится в начальной стадии. Поэтому актуальной является разработка гидромеханической модели грузобалластных операций танкеров, которая позволила бы решать поставленные задачи.

Ниже, на основе наиболее распространенных типов танкеров, продуктовозов и нефтевозов, предложен вариант гидромеханической модели грузобалластных операций. Характерной особенностью грузобалластных операций является параллельно-последовательная работа насосов в составе трубопроводных систем, а танкер, ведущий грузобалластные операции, меняет во времени свои пространственные координаты.

В общем виде параллельно-последовательная работа насосов в составе грузовой системы может быть представлена следующим образом, см. рис. 1, 2. Несколько грузовых насосов m при разных условиях на всасывании одновременно подают нефтепродукт из судовых емкостей в береговые емкости по $n_б$ трубопроводам через $n_ш$ шлангов(стендеров), причем $m \neq n_б \neq n_ш$. Теоретическое описание последовательно-параллельной работы центробежных насосов такой системы удобно условно разделить на три части: первая — подача груза по судовым трубопроводам до раздаточной колонки танкера, вторая — подача по шлангам или стендерам, третья — по береговым трубопроводам.

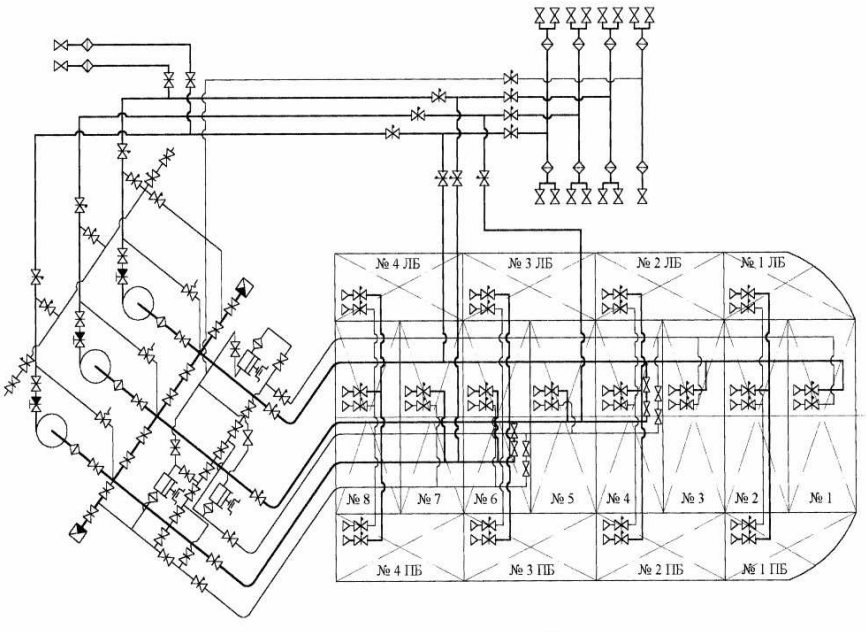


Рис. 1 Принципиальная схема линейных грузовой и зачистной систем

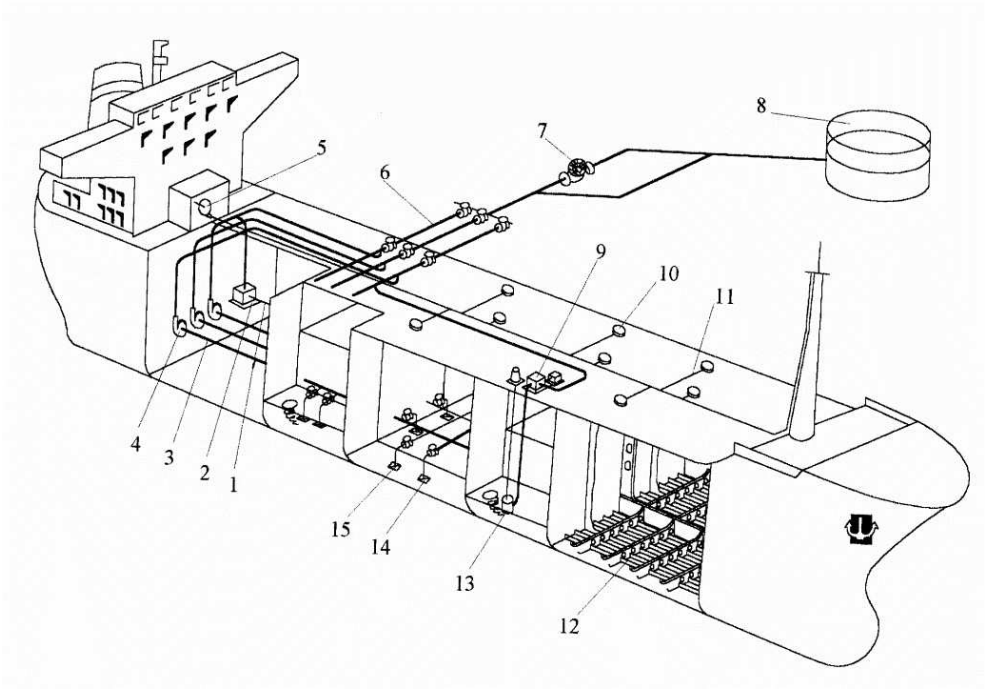


Рис. 2 Схема разгрузки танкера:
1, *2* — зачистные трубопровод и насос; *3*, *4* — грузовые трубопровод и насос; *5* — нагнетатель системы инертных газов; *6* — шланг; *7*, *8* — береговые насос и емкость; *9* — погружной грузовой насос; *10* — горловина; *11* — трубопровод системы газоотвода; *12* — днищевой набор; *13* — погружной бустерный насос; *14*, *15* — приемники грузовой и зачистной систем

Для описания процесса течения жидкости в системах танкера использовано уравнение Бернулли. В основе вывода уравнений, описывающих параметры систем грузового комплекса танкеров, лежит равенство энергий развиваемого насосом и потребляемого системой.

Рассмотрим принципиальную схему грузовой системы танкера, состоящую из m параллельно работающих линейных трубопроводов. При этом каждый j-й линейный трубопровод содержит z_j последовательно включенных насосов. Составим уравнения, определяющие переменные во времени подачи действующих насосов, работающих на сеть при постоянной частоте вращения. Представленные ниже зависимости учитывают характеристики «напор-подача» насосов, изменение осадки, крена, дифферента при выполнении грузобалластных операций, конструктивные характеристики берегового трубопровода, нефтебазы и технологию грузобалластных операций, а также параметры совместной работы систем танкера во времени.

$$\begin{aligned}
&\sum_{i=1}^{z_1}(a_{01i}+a_{11i}Q_{C1}+a_{21i}Q_{C1}^2)=H_{CT1}+H_1+R_б(\sum_{j=1}^{m}Q_{Cj})^2+J_1;\\
&\sum_{i=1}^{z_1}(a_{02i}+a_{12i}Q_{C1}+a_{22i}Q_{C1}^2)=H_{CT2}+H_2+R_б(\sum_{j=1}^{m}Q_{Cj})^2+J_2; \qquad (1)\\
&\qquad\qquad \dots\ \dots\ \dots\ \dots\ \dots\\
&\sum_{i=1}^{z_1}(a_{0mi}+a_{1mi}Q_{Cm}+a_{2mi}Q_{Cm}^2)=H_{CTm}+H_m+R_б(\sum_{j=1}^{m}Q_{Cj})^2+J_m,
\end{aligned}$$

где m — количество параллельно соединенных систем;
z_j — количество последовательно включенных насосов в каждую систему;
a_{0ij}, a_{1ij}, a_{2ij} — постоянные размерные коэффициенты, полученные при аппроксимации паспортной кривой «напор-подача» насоса, м, с/м^2, с^2/м^5, соответственно;
j — учитывает принадлежность насоса к системе, обслуживающей j-ю группу танков;
i — учитывает номер насоса в j-й системе;
Q_{Cj} — переменная во времени подача j-й грузовой системы, м^3/с;
H_{CTj} — статическая составляющая потерь напора для j-й системы, м;
H_j — динамическая составляющая потерь напора j-й системы, м;
$R_б$ — обобщенное гидравлическое сопротивление берегового трубопровода, с^2/м^5;
J_j — инерционный член, м.

Статическая составляющая потерь напора для j-й системы, м:

$$H_{CTj} = (P_0 - P_{ij})/\rho g + H_0 - T_0 - \varphi_j + (V_{ij}^2 - V_p^2)/2g + H_p, \quad (2)$$

где P_p, H_p — давление над свободной поверхностью и уровень жидкости в береговом резервуаре, Па и м соответственно;
H_0 — геометрическая отметка береговой емкости по отношению к уровню моря, м;
V_{ij}, V_p — скорости движения жидкости относительно стенок в судовой и береговой емкостях соответственно;
i — порядковый номер разгружаемой емкости;
P_{ij} — давление в разгружаемой i-й емкости j-й группы, Па;
ρ — плотность, кг/м^3;
g — ускорение свободного падения, м/с^2;
$\varphi_i = H_{ij} \pm \delta_{ij}\psi \pm \Delta_{ij}\theta$ — уровень жидкости в грузовой емкости с поправками на крен и дифферент, м;
H_{ij} — уровень жидкости в разгружаемой i–й емкости j–й группы, м;
ψ — дифферент, м;
$\delta_{ij} = (l_{ij} - l_{ijc})/L$ — приращение дифферента, характеризующее изменение уровня жидкости в разгружаемом танке;
l_{ij}, l_{ijc} — расстояние вдоль судна, на котором производится учет дифферента, м;
L — длина судна между перпендикулярами, м;
θ — крен, м;
$\Delta_{ij} = (y_{ij} - y_{ijc})/B$ — приращение крена, характеризующее изменение уровня жидкости в разгружаемой емкости;
y_{ij}, y_{ijc} — расстояние по ширине судна, на котором производится учет крена, м;
B — ширина судна, м;
T_0 — начальное значение осадки танкера, м;
$\Delta T = T_0 - T$ — изменение осадки, м.

Текущее значение осадки на основании аппроксимации соответствующей кривой элементов теоретического чертежа, м

$$T = k_1 + k_2 D + k_3 D_2, \quad (3)$$

где k_1, k_2, k_3 — постоянные размерные коэффициенты, полученные при аппроксимации кривой элементов теоретического чертежа «осадка — водоизмещение», м, м/т, м/т^2, соответственно.

Текущее водоизмещение, т

$$D = D_0 - \rho g \sum_{j=1}^{m} \int_{t_0}^{t} Q_{Cj}\, dt, \quad (4)$$

где D_0 — начальное водоизмещение, т;
t — время, с.

Производительность j-й системы, м^3/с

$$Q_{Cj} = \sum_{i=1}^{n_j} Q_{ij};$$
$$Q_{ij} = F_{ij} \frac{dH_{ij}}{dt}, \quad (5)$$

где n_j — число емкостей, обслуживаемых одним грузовым насосом;
F_{ij} — площадь свободной поверхности жидкости в емкости при посадке на ровный киль, м^2.

Давление над свободной поверхностью жидкости в грузовом танке в общем случае для j-й группы, Па:

$$P_{ij} = P_n + (P_C + P_n) \frac{\Delta H_{ij0} + \frac{1}{F_{ij}} \int_{t_0}^{t} Q_{\text{г}ij}(t)dt}{\Delta H_{ij0} + \frac{1}{F_{ij}} \int_{t_0}^{t} Q_{ij}(t)dt}, \quad (6)$$

где P_n — давление насыщенных паров перекачиваемого груза, Па;
P_0 — начальное давление в емкости, Па;
ΔH_{ij0} — начальный недолив жидкости в грузовом танке, м;
$Q_{\text{г}ij}$ — пропускная способность системы газоотвода, м^3/с;
ΔP_{ij} — поправка, учитывающая поступление воздуха в емкость, либо протечку через неплотности, Па.

В частных случаях возможны следующие варианты давления в грузовом танке, Па:

- при открытом способе разгрузки $P_{ij} = P_a$;
- при работе системы газоотвода $P_0 = P_a$;
- при работе системы инертных газов:

$$P_0 = P_a + \Delta P^{\text{o}}_{\text{иг}},\ Q_{\text{г}ij} = Q_{\text{иг}},$$

где P_a — атмосферное давление, Па;
$\Delta P_{\text{иго}}$ — начальное давление, создаваемое системой инертных газов, Па;
$Q_{\text{г}ij}$ — производительность системы инертных газов, определяемая как частный случай из (1).

Переменная по высоте площадь свободной поверхности жидкости в танке, м^2:

$$F_{ij} = V_{ij} / H_{ij}, \tag{7}$$

где V_{ij} — объем жидкости, соответствующий ее переменному уровню в емкости (по данным калибровочных таблиц грузовых танков), м^3.

На примере наиболее распространенного вида береговых резервуаров, цилиндрического наземного вертикального, рассмотрим изменение статической составляющей потерь напора.

Текущий уровень жидкости в береговом резервуаре, м:

$$H_P = \frac{1}{F_P} \sum_{j=1}^{m} \int_{t_0}^{t} Q_{Cj} dt, \tag{8}$$

где F_p — площадь свободной поверхности жидкости в береговом резервуаре, м^2.

Для других типов резервуаров при известных конструктивных параметрах текущий уровень жидкости в них определяется по элементарным математическим зависимостям с использованием уравнений материального баланса. Расчет несколько усложняется лишь из-за переменного сечения резервуара по высоте.

Цилиндрические резервуары обычно работают при низких избыточных давлениях до 200 мм вод. ст., поэтому полное текущее значение давления близко к атмосферному. В других случаях, например, при работе системы газоотвода, необходимо учитывать изменение давления над свободной поверхностью жидкости в береговом резервуаре.

Динамическая составляющая потерь напора в j-й системе, м:

$$H_j = \sum_{s=1}^{m_j} \sum_{s=1}^{n_{js}} Q_{ijs}^2 R_{ijs} + \sum_{s=1}^{m_j} Q_{js}^2 R_{js}, \tag{9}$$

где s — порядковый номер узла j-й системы;
m_j — число узлов j-й системы;
n_{js} — число емкостей, разгружаемых через s-й узел;
R_{ijs}, R_{ijs} — обобщенное гидравлическое сопротивление приемного трубопровода из емкостей и между s и $s+1$ узлами соответственно, с^2/м^5.

Скорость разгрузки емкости, присоединенной к s узлу j-й системы, м^3/с

$$Q_{ijs} = F_{ijs} (dH_{ijs}/dt). \tag{10}$$

Расход между узлами, м^3/с

$$Q_{js} = \sum_{s=1}^{n_s} Q_{ijs} + Q_{j(s-1)}. \tag{11}$$

Для первого узла $s = 1$, $Q_{jo} = 0$.

Интенсивность движения жидкости во всасывающем трубопроводе систем оказывает существенное влияние на скорость зачистки из-за воронкообразования и кавитации. Поэтому его необходимо рассмотреть подробнее.

В общем случае имеем всасывающий трубопровод линейной грузовой системы, через который откачивается жидкость из n разгружаемых емкостей.

Напор в узловых точках приемного трубопровода из танка, м

$$h_{ijs} = h_{kjs} = P_{ijs}/\rho g + J_j - h_{cij} - R_{ijs}Q_{ijs}^2 + \frac{1}{g}\left(\int_h^{H_{ijs}} \frac{d^2H_{ijs}}{dt^2} dH_{ijs} + \frac{F_{ijs}}{\omega_{ijs}} \int_h^{l_{ijs}} \frac{d^2H_{ijs}}{dt^2} dl_{ijs}\right), \quad (12)$$

где h_{cij} — высота расположения системы над днищем емкости, м;
k — порядковый номер узла;
ω_{ijs} — площадь сечения приемного из танка трубопровода, м^2;
l_{ijs} — длина приемного из танка трубопровода, м.

Из условия равенства напоров в узлах

$$h_{ijs} = h_{js} = h_{js}.$$

В узловых точках напоры связаны соотношением

$$h_{ijs} = h_{ij(s-1)} - R_{ijs}Q_{ijs}^2 + \frac{1}{g}\sum_{s=1}^{m_j}\sum_{i=1}^{n_{js}} \frac{F_{ijs}}{\omega_{js}} \int_0^{l_{js}} \frac{d^2H}{dt^2}\, dl_{js}, \quad (13)$$

где ω_{js} — площадь сечения трубопровода между узлами, м^2;
l_{js} — длина трубопровода между узлами, м.

Последовательный набор полученных уравнений (12 — 13) в соответствии с топологией грузовой системы позволяет описать течение жидкости во всасывающем трубопроводе линейных схем.

Уравнения (12 — 13) пригодны и также для приемного трубопровода кольцевых грузовых систем полукольца правого или левого борта, что является типовым случаем для морской практики.

Движение жидкости в приемном трубопроводе грузовой системы с перепускными переборочными клинкетами имеет особенности.

В общем случае перетекание в любую i-ю емкость, имеющую координаты m, n, осуществляется из четырех смежных (носовой, кормовой, правого и левого борта). Скорость изменения уровня жидкости в i-й емкости, в которой установлен приемник грузовой системы, м/с

$$\frac{dH_{m,n}}{dt} = \frac{1}{F_{m,n}}(Q + Q_{m+1,n} + Q_{m-1,n} + Q_{m,n-1}), \quad (14)$$

где $Q_{m+1,n}$, $Q_{m-1,n}$, $Q_{m,n+1}$, $Q_{m,n-1}$ — скорость перетекания в емкость из смежных носовой, кормовой, левого и правого борта соответственно.

Положительный расход соответствует поступлению жидкости в i-ю емкость.

Скорость перетекания из носовой емкости, м^3/с

$$Q_{m+1,n} = S\frac{1}{\sqrt{\varsigma}}\sqrt{\psi|\Phi_{m+1,n};\ \Phi_{m,n}|}\ sign\,(\psi(\Phi_{m+1,n};\ \Phi_{m,n}));$$

$$\psi(\Phi_{m+1};\ \Phi_{m,n}) = 2g\left[P_{m+1,n}/(\rho g) + \Phi_{m+1,n} - \Phi_{m,n} + \alpha_{m+1,n}\ (\Phi_{m+1,n}/dt)^2 - \alpha_{m,n}(\Phi_{m,n}/dt)^2 + \right. \quad (15)$$

$$\left. + \frac{1}{g}\int_h^{H0(m+1,n)} \frac{d^2H_{m+1,n}}{dt^2} dH_{m+1,n} + \frac{1}{g}\int_h^{H0(m+1,n)} \frac{d^2H_{m+1,n}}{dt^2} dH_{m,n}\right],$$

где $1/\sqrt{\varsigma}$ — коэффициент расхода;
α — коэффициент кинетической энергии жидкости;
H_0 — начальное значение уровня жидкости, м;
h_k — высота комингса клинкета, м.

Суммарная действующая площадь сечения перепускных клинкетов с учетом их частичного затопления, м^2

$$S_k = \sum_1^k B(H)H_k + \delta_n\overline{\psi} + \Delta_n\overline{\theta}, \quad (16)$$

где $B(H)$ — переменная по высоте ширина перепускного клинкета, м;
k — количество клинкетов;
H_k — высота клинкета, м.

По аналогии находим отдельные производительности перетекания из кормовой и бортовых емкостей. Для емкости, в которой приемник грузовой системы не установлен, $Q_{ij} = 0$.

Таким образом, перетекание жидкого груза из n танков может быть записано системой, состоящей из n уравнений, первое из которых соответствует (14). Все последующие имеют $Q_{ij}=0$ и отличны друг от друга лишь индексами разгружаемых емкостей, начальными данными.

В частном случае, например, при отсутствии бортовых танков, $Q_{m,n+1}=Q_{m,n-1}=0$ система уравнений упрощается.

Зависимости, описывающие движение жидкости через перепускные переборочные клинкеты, справедливы также и для процесса перетекания жидкости через сложный днищевой набор танкера. Переход совершается при следующих условиях.

Площадь сечения трубопровода должна быть заменена на суммарную пропускную площадь нефтепротоков в днищевом наборе. Суммарный коэффициент гидравлических потерь должен учитывать сопротивление перетекания через набор. В пределах интегрирования высоту расположения приемника следует заменить на высоту расположения нижней кромки нефтепротока над днищем танкера. Необходимо также дополнить формулы членом, учитывающим перетекание через частично затопленные нефтепротоки, так как при этом уменьшается действующая площадь перетока.

Инерционный член, учитывающий потери, вызванные нестационарностью в j-й системе, выраженный в метрах, равен

$$J=\frac{1}{g}\left[\int_h^{H_{ijs}}\frac{d^2H_{ijs}}{dt^2}dH_{ijs}+\frac{F_{ijs}}{\omega_{ijs}}\int_0^{l_{ijs}}\frac{d^2H_{ijs}}{dt^2}dl_{ijs}+\sum_{s=1}^{m_j}\sum_{i}^{n_{js}}\frac{F_{ijs}}{\omega_{js}}\left(\int_0^{l_{js}}\frac{d^2H_{ijs}}{dt^2}dl+\int_0^{l_б}\frac{d^2H_{ijs}}{dt^2}dl_б\right)+\int_h^{H_p}\frac{d^2H_p}{dt^2}dH_p\right], \quad (17)$$

где l_b — длина берегового трубопровода, м.

Первое слагаемое формулы учитывает нестационарность движения жидкости в судовой емкости, второе — в приемном из емкости трубопроводе, третье — между узловыми точками расходов жидкости, четвертое в береговом трубопроводе, пятое в береговом резервуаре.

В нормальных эксплуатационных условиях крен и дифферент малы, поэтому для их определения используются формулы начальной остойчивости. Приложенные к танкеру усилия при погрузке-разгрузке носят статический характер.

Ниже приведены формулы, определяющие крен и дифферент для разгрузки.

Дифферент танкера, м:

$$\psi=\frac{1}{100m}(M_{0\text{диф}}+\Delta M_{\text{диф}}), \quad (18)$$

где $M_{0\text{диф}}$ — начальный дифферентующий момент, тм.

Изменение дифферентующего момента, тм

$$\Delta M_{\text{диф}}=\rho g\sum_{j=1}^{m}\sum_{i=1}^{n}F_{ij}(x_{ij}-H_{ij})(x_{ij}-x_j), \quad (19)$$

где H_{ij0} — начальный уровень жидкости в разгружаемой емкости, м;
x_i, x_j — абсцисса центра тяжести снятого груза и площади действующей ватерлинии, м.

Момент, дифферентующий на 1 см, с учетом влияния свободных поверхностей жидкого груза в танках

$$m=\frac{DH_m}{L}.$$

Продольная метацентрическая высота с учетом влияния свободных поверхностей жидкого груза в емкостях на новом шаге решения, м:

$$H_{M1}=H_M-\frac{\rho g\sum_{j=1}^{m}\sum_{i=1}^{n_j}F_{ij}(H_{ij0}-H_{ij})}{D}\left[T-\Delta T/2-H_M-\frac{\sum_{j=1}^{m}\sum_{i=1}^{n_j}F_{ij}(H_{ij0}-H_{ij})0{,}5(H_{ij0}-H_{ij})}{\sum_{j=1}^{m}\sum_{i=1}^{n_j}F_{ij}(H_{ij0}-H_{ij})}\right]-\frac{\rho g\sum_{j=1}^{m}\sum_{i=1}^{n_j}i_{yij}}{D}, \quad (20)$$

где H_M — продольная метацентрическая высота на предыдущем шаге решения, м;
i_y — момент инерции площади свободной поверхности жидкости в емкости относительно центральной оси ординат.

Крен, м

$$\bar{\theta} = Btg\theta = B\frac{M_{кр}}{Dh_m}. \quad (21)$$

Кренящий момент, тм

$$M_{кр} = M_{0кр} + \Delta M_{кр}, \quad (22)$$

где $M_{0кр}$ — начальный кренящий момент, тм.

Изменение кренящего момента

$$M_{кр} = \rho g \sum_{j=1}^{m} \sum_{i=1}^{n_j} F_{ij}(H_{j0} - H_j) y_{ij}, \quad (23)$$

где y_{ij} — ордината центра тяжести снятого груза, м.

Поперечная метацентрическая высота с учетом влияния свободной поверхности жидкости в емкостях на новом шаге решения:

$$h_{m1} = h_m - \frac{\rho g \sum_{j=1}^{m} \sum_{i=1}^{n_j} F_{ij}(H_{ij0} - H_{ij})}{D}\left[T - \Delta T/2 - h_m - \frac{\sum_{j=1}^{m} \sum_{i=1}^{n_j} F_{ij}(H_{ij0} - H_{ij}) 0{,}5(H_{ij0} - H_{ij})}{\sum_{j=1}^{m} \sum_{i=1}^{n_j} F_{ij}(H_{ij0} - H_{ij})}\right] - \frac{\rho g \sum_{j=1}^{m} \sum_{i=1}^{n_j} i_{xij}}{D}, \quad (24)$$

где h_m — поперечная метацентрическая высота на предыдущем шаге решения, м;
i_x — момент инерции свободной поверхности жидкости в танке относительно центральной оси абсцисс, м^4.

В систему, описывающую процесс разгрузки, входит также уравнение материального баланса

$$\sum_{j=1}^{m} \sum_{i=1}^{n_j} F_{ij}(H_{ij0} - H_{ij}) = \sum_{j=1}^{m} \int_{t_0}^{t} Q_{cj} dt. \quad (25)$$

Число неизвестных функций при решении рассматриваемой задачи равно числу одновременно разгружаемых танков.

ВЫВОДЫ

Представленная гидромеханическая модель грузобалластных операций была апробирована при проектировании систем грузового комплекса ЦКБ Балтсудопроект для танкеров дедвейтом 68 тыс. т, ЦКБ Изумруд для танкеров дедвейтом 28 тыс. т, ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова при проведении научно-исследовательских работ в 1980-х годах.

Предложенная гидромеханическая модель грузобалластных операций может быть использована для решения различных вопросов при проектировании и эксплуатации танкеров, выполнении научно-исследовательских работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Международной конвенции о контроле судовых балластных вод и осадков и управлении ими 2004 года, ИМО.
2. Патрашев А.Н., Кивако Л.А., Гожий С.И. Прикладная гидромеханика. — М.: Военное издательство министерства обороны СССР, 1970. — 686 с.
3. Повх И.Л. Техническая гидромеханика. — Л.: Машиностроение, Ленинградское отделение, 1976. — 504 с.
4. Певзнер Б.М. Насосы судовых установок и систем. – Л.: Судостроение, 1971. — 384 с.
5. Подволоцкий Н.М. Вакуумная разгрузка танкеров. Л.: Судостроение, 1975, 192 с.
6. Подволоцкий Н.М. Элементы теории грузобалластных операций танкеров. — В кн.: Эксплуатация, ремонт и проектирование специальных систем танкеров: Тези. докл. науч.-техн. конф., Владивосток, 1978. — с. 53 — 60.
7. Подволоцкий Н.М. Регулирование подачи насосов объемного типа. Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства, № 58/59, 2020, с. 80 — 88.

REFERENCES

1. Ballast Water Management Convention, 2004, IMO.
2. Patrashev A.N., Kivako L.A., Gozhiy S.I. *Prikladnaya gidromekhanika* [Applied hydromechanics]. — M.: Military publishing house of the Ministry of Defense of the USSR, 1970. — 686 p.
3. Povkh I.L. *Tekhnicheskaya gidromekhanika* [Technical hydromechanics]. — L.: Mechanical engineering, Leningrad branch, 1976. — 504 p.
4. Pevzner B.M. *Nasosy sudovykh ustanovok i sistem* [Pumps of ship installations and systems]. — L.: Shipbuilding, 1971. — 384 p.
5. Podvolotskiy N.M. *Vakuumnaya razgruzka tankerov* [Vacuum unloading of tankers]. L.: Shipbuilding, 1975, 192 p.
6. Podvolotskiy N.M. *Elementy teorii gruzoballastnykh operatsiy tankerov* [Elements of the theory of cargo-ballast operations of tankers]. — In the book: Operation, repair and design of special tanker systems: Abstracts. Report scientific and Technical Conf., Vladivostok, 1978. — p. 53 — 60.
7. Podvolotsky N.M. *Regulirovanie podachi nasosov obyemnogo tipa* [Capacity regulation of volume pumps]. Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping, Nos. 58/59, 2020, p. 80 — 88.

УДК 629.5.062; 621.77.01

СРАВНЕНИЕ ТРЕБОВАНИЙ РАЗЛИЧНЫХ НОРМАТИВНЫХ ДОКУМЕНТОВ К ПАРАМЕТРАМ ГИБКИ ТРУБ СУДОВЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

В.К. Шурпяк, канд. техн. наук, ФАУ «Российский морской регистр судоходства», Санкт-Петербург, e-mail: shurpyak.vk@rs-class.org

В статье проведен сравнительный анализ требований классификационных обществ, отраслевых стандартов и стандартов зарубежных верфей к технологическим параметрам, характеризующим изменение формы трубы в месте гиба. Сравнение требований отраслевых стандартов по выполнению гибки со значениями прибавки на утонение в результате гибки в требованиях по расчетам на прочность показывает существенное расхождение в требованиях нормативных документов. На основе анализа сделан вывод о необходимости гармонизации требований по допускаемым значениям утонения стенок труб и разработки требований Регистра к допускаемым значениям овальности и величине гофр после гибки труб.

Ключевые слова: *судовые трубопроводы, технология гибки труб, расчеты трубопроводов на прочность*

COMPARISON OF VARIOUS STANDARDS REQUIREMENTS FOR PIPE BENDING PARAMETERS FOR SHIP PIPELINES

V.K. Shurpyak, PhD, FAI "Russian Maritime Register of Shipping", St. Petersburg, e-mail: shurpyak.vk@rs-class.org

The article provides comparative analysis of the requirements of classification societies, industry standards and standards of foreign shipyards for permissible technological parameters characterizing the change in the shape of the pipe at bending. Comparison of the requirements of industry standards for bending with the values of allowance for thinning as a result of bending in strength calculations shows a significant discrepancy in the requirements of regulatory documents. Based on the analysis, it has been concluded that it is necessary to harmonize the requirements for the allowable values of pipe wall thinning and develop the Register requirements for the allowable values of ovality and the size of corrugations after pipe bending.

Keywords: *ship pipelines, pipe bending technology, strength calculations of pipelines*

Существенная доля аварий на морских судах по-прежнему связана с отказами судовых трубопроводных систем. При этом большая часть отказов трубопроводов не приводит непосредственно к аварии, но часто является инициирующим событием, приводящим к аварийной ситуации. В наибольшей степени это относится разливам топлива в машинных помещениях, приводящим к пожарам и к затоплениям машинных помещений в результате разрушения труб забортной воды системы охлаждения. При этом большая часть отказов в трубопроводах связана с протеканием деградационных процессов в трубах, результаты которых проявляются через много лет после начала эксплуатации судна, то есть такие отказы не могут быть зафиксированы во время швартовных или ходовых испытаний судна. Так как деградационные процессы в трубопроводах протекают с различной скоростью, которая зависит от различных параметров трубопроводов, для надежной эксплуатации систем необходимо заранее выявлять «слабые места» трубопроводов в которых деградация протекает особенно быстро. К таким опасным участкам труб следует отнести концентраторы напряжений и местные утонения, связанные с пластическими деформациями труб.

Результатом пластического деформирования труб при изготовлении становится изменение формы трубы, что приводит к интенсификации износа в результате местной турбулизации потока, и уменьшению толщины стенки что приводит к уменьшению местного запаса на коррозию в месте наиболее интенсивного коррозионно-эрозионного износа. Кроме этого, в результате гибки без последующей термообработки изменяются механические свойства материала, который становится менее стойким к воздействию вибрации.

Не смотря на все более широкое применение готовых фасонных элементов, на отечественных верфях гибка труб остается основной операцией технологического процесса изготовления криволинейных деталей судовых трубопроводов. В результате гибки сечение трубы приобретает овальность, и наружная стенка гиба утоняется (см. рис. 1), а на внутренней части погиба могут образовываться складки (волнистость) (см. рис. 2), которые обычно называют гофрами. Все перечисленные изменения формы сечения трубы отрицательно сказываются на прочности и продолжительности ее дальнейшей безотказной работы, но так как исключить возможность их появления в реальном производстве невозможно, возникает необходимость контролировать и нормировать указанные параметры.

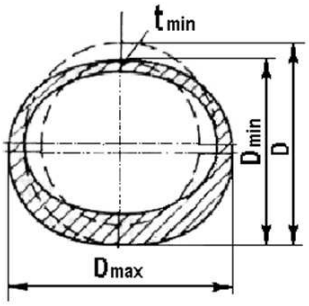


Рис. 1 Овальность сечения E и утонение стенки трубы T после гибки трубы

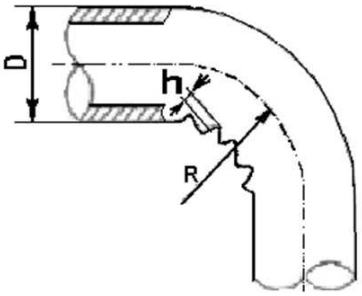


Рис. 2 Возникновение складок (волнистости) после гибки трубы

Исходя из важности указанных параметров и их влияния на прочность трубопроводов, проведен анализ требований классификационных обществ, отраслевых стандартов и стандартов предприятия различных зарубежных верфей, выполняющих заказы для российских судовладельцев. В различных стандартах и кодексах обозначения используемых в расчетах величин различаются, для возможности сравнения автор был вынужден приводить их к общему виду и одинаковым единицам измерения, ориентируясь на физический смысл, поэтому внешний вид некоторых формул может отличаться от оригинала.

Для количественной оценки и контроля качества в отрасли введены различными стандартами и широко используются критерии относительной овальности, утонения стенки и величины складок (гофр), которые приводятся ниже в формулах (1), (2) и (3) соответственно.

$$E = \frac{D_{max} - D_{min}}{D} \cdot 100\ \%, \qquad (1)$$

где D — наружный диаметр трубы до гибки;
D_{max} и D_{min} — наибольший и наименьший наружный диаметр трубы в месте гиба (см. рис. 1).

$$T = \frac{t - t_{min}}{t} \cdot 100\ \%, \qquad (2)$$

где t — толщина стенки трубы до гибки;
t_{min} — минимальная толщина стенки трубы в месте гиба (см. рис. 1).

$$H = \frac{h}{D} \cdot 100\ \%, \qquad (3)$$

где D — наружный диаметр трубы до гибки;
h — высота гофр в месте гиба трубы (см. рис. 2).

1. СРАВНЕНИЕ ТРЕБОВАНИЙ ПРАВИЛ РС И ИКО

Правила Российского морского регистра судоходства (далее — РС) [1], как и других классификационных обществ (далее — ИКО), повторяют требования унифицированного требования (УТ) МАКО Р1 [2]. В этих требованиях в расчете минимальной толщины стенки трубы предусмотрена прибавка b, компенсирующая утонение стенки трубы при гибке:

$$t = \frac{t_0 + b + c}{1 - a/1000}, \qquad (4)$$

где a — минусовой допуск на толщину стенки трубы;
c — прибавка на коррозию;
b — прибавка на утонение стенки при гибке.

$$b = \frac{1}{2{,}5} \frac{D}{R} t_0, \qquad (5)$$

где R — средний радиус гиба трубы;
D — наружный диаметр трубы до гибки;
t_0 — толщина стенки прямой трубы, определенная по расчету на прочность без прибавки на коррозию по формуле (2).

$$t_0 = \frac{2\sigma\varphi + p}{pD}, \quad (6)$$

где p — расчетное давление;
σ — допускаемые напряжения материала трубы;
φ — коэффициент прочности.

Кроме того, в УТ МАКО Р1 есть ограничение среднего радиуса гиба трубы R, который не должен быть менее 3 диаметров трубы. В целом требования МАКО по расчетам трубопроводов на прочность повторяют требования Кодексов ИМО для газовозов и химовозов [3, 4]. Отметим, что во всех этих документах МАКО и в Кодексах ИМО по газовозам, химовозам и судам, использующим газ в качестве топлива, прибавка на утонение высчитывается исходя из минимальной толщины стенки трубы, определенной по расчетному давлению без учета прибавки на коррозию.

Если в формулу (5) подставить значения параметров гибки, то получаются следующие значения: при $R/D = 4$ прибавка будет составлять 10 % от толщины стенки, а при минимальном допустимом УТ Р1 радиусе $R/D = 3$ прибавка будет равна 13 % причем без учета прибавки на коррозию.

Правила DNV [5] не составляют исключения из требований других членов МАКО, но помимо этих требований в правилах DNV для трубопроводов I и II классов рекомендуется овальность не более 7 % и для трубопроводов этих классов не допускается появление гофр на внутренней части гиба.

Требования к расчету трубопроводов Правил ABS [6] повторяют требования МАКО UR Р1, но помимо этого предусмотрен альтернативный вариант. В качестве альтернативы допускается гибка в соответствии с признанным стандартом (в качестве примера предлагается кодекс ASME B31.1 [7]).

Согласно кодексу ASME [7], в расчетах на прочность трубопроводов для учета утонения стенки в месте гиба требуется увеличение толщины стенки на $6 \div 25$ % по отношению к требуемой толщины стенки прямой трубы. При этом используется толщина стенки с прибавкой на коррозию, в отличие от требований МАКО, где прибавка на коррозию при определении прибавки на утонение не учитывается. Значение рекомендованной минимальной толщины до гибки согласно ASME B31.1–2001 показаны на графике на рис. 3.

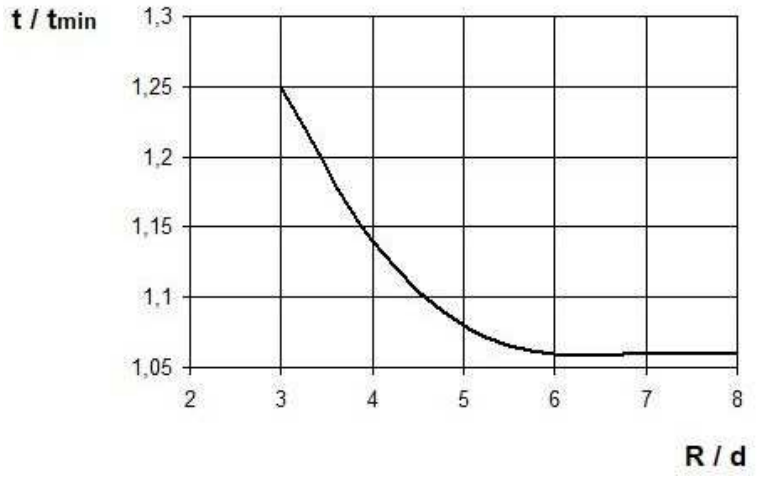


Рис. 3 Отношение рекомендованной толщины стенки трубы t до гибки к минимальной толщине стенки прямой трубы, вычисленной в соответствии с требованиями по прочности с учетом прибавки на коррозию согласно требованиям ASME B31.1–2001 [7] в зависимости от отношения среднего радиуса гиба R к диаметру трубы d

В разд. 9 части IV «Техническое наблюдение за изготовлением изделий» Правил по техническому наблюдению за постройкой судов и изготовлению материалов и изделий для судов РС [8], посвященном изготовлению труб для паровых котлов (требования УТ МАКО Р1 на них не распространяются) присутствуют требования по максимальному допустимому утонению стенки и овальности труб. Согласно положениям указанных Правил [8] относительная овальность E не должна превышать 11 % при отношении радиуса погиба к диаметру трубы $R/D \leqslant 3{,}5$ и 8 % при $R/D > 3{,}5$, относительное утонение стенки T не должно превышать 18 %.

2. ТРЕБОВАНИЯ ОТРАСЛЕВЫХ СТАНДАРТОВ И СТАНДАРТОВ ЗАРУБЕЖНЫХ ВЕРФЕЙ

Российские верфи используют требования российского отраслевого стандарта ОСТ 5.95057-90 [9], согласно которому утонение стенки трубы показано в табл. 1.

Таблица 1

Радиус гиба R	Утонение T, %, при горячей гибке ТВЧ	Утонение T, %, при холодной гибке
$R=3D$	28 %	23 %
$R=2{,}5D$	30 %	25 %
$R=2D$	33 %	28 %
$R=1{,}5D$	35 %	34 %

В табл. 1 нормы утонения суммарно учитывают допускаемое утонение стенки трубы при гибке и минусовой прокатный допуск (в формуле (4) он фигурирует как a), обычно принимаемый как 10 % от номинальной толщины стенки. Так как в расчетах на прочность труб прокатный допуск учитывается отдельно, то при сопоставлении требований ОСТ и МАКО следует от значений, указанных в табл. 1, вычесть указанные 10 % и после этого для допускаемого МАКО значения радиуса гиба $R=3D$ значения утонения согласно ОСТ и формуле (6) из УТ МАКО Р1 совпадают (13 %).

Относительная овальность при холодной гибке допускается не более 10 % для труб наружным диаметром менее 38 мм и не более 8 % для труб большего диаметра вне зависимости от радиуса гиба трубы. Для горячей гибки и гибки с использованием ТВЧ допускается не более 8 % для труб наружным диаметром менее 159 мм и не более 10 % для труб большего диаметра.

ОСТ 5.95057-90 допускает наличие гофр на вогнутой стороне гиба величиной до 3 % ($H\leqslant 3$ %). Для воздушных и газоотводных труб допускаются гофры величиной до 5 % ($H\leqslant 5$ %). Для труб под внешним давлением гофры не допускаются.

В документах различных зарубежных верфей, которые в настоящее время выполняют заказы для российских судовладельцев, ограничения по форме при гибке труб близки между собой, но существенно отличаются от требований ОСТ 5.95057-90.

По стандартам корейской верфи Hyundai Heavy Industries (HHI) допускается относительная овальность стальных труб при радиусе гиба более трех диаметров трубы после гибки должна быть $E\leqslant 7$ % для трубопроводов I и II класса, а для трубопроводов III класса $E\leqslant 10$ %. Для труб из меди и медных сплавов овальность допускается не более 10 % для трубопроводов всех классов. Отдельно оговорено, что для грузовых трубопроводов газовозов допускаемая относительная овальность $E\leqslant 10$ %, как для труб 3 класса.

Допустимое утонение стенки трубы на верфи HHI различается для различных материалов. Для стальных труб с радиусом гиба от 3 до 4 диаметров $3D<R\leqslant 4D$ утонение стенки T допускается не более 20 % ($T\leqslant 20$ %), а при радиусе гиба $4D<\mathrm{R}\leqslant 5D$ утонение стенки должно быть не более 15 %. Для медных сплавов требования по утонению стенки такие же, как и для стальных труб (20 % и 15 % в зависимости от радиуса гиба), а для медных труб утонение допускается несколько больше: для $3D<R\leqslant 4D$ утонение должно быть $T\leqslant 25$ %, а для $4D<R\leqslant 5D$ утонение должно быть $T\leqslant 20$ %.

На вогнутой стороне гиба допускаются гофры величиной до 1 % ($H\leqslant 1$ %) для любых радиусов гиба, материалов, класса трубопроводов и способов гибки.

В стандарте HHI нет различий в требованиях для горячей и холодной гибки труб.

По стандартам корейской верфи DSME допускается относительная овальность труб $E\leqslant 7$ % для трубопроводов 1 и 2 класса и $E\leqslant 10$ % для трубопроводов 3 класса. Утонение стенки допускается не более 25 % ($T\leqslant 25$ %) для всех классов труб независимо от способа гибки. DSME допускает на вогнутой стороне гиба гофры величиной до 1 %, но не более 2 мм ($h\leqslant 2$ мм; $H\leqslant 1$ %).

Согласно стандартам корейской верфи Samsung Heavy Industrial (SHI) при радиусе гиба менее трех диаметров трубы допускается относительная овальность не более 10 % $E\leqslant 10$ %. При этом утонение стенки допускается в диапазоне от 5 до 25 % в зависимости от радиуса гиба R и способа гибки как это показано в табл. 2.

SHI допускает наличие гофр на внутренней поверхности гиба высотой h не более 2 мм вне зависимости от диаметра трубы и радиуса гиба (то есть относительная величина гофр в процентах не регламентируется).

Все перечисленные требования различных нормативных документов для удобства анализа приводятся в общей табл. 3.

Таблица 2

Радиус гиба R	Утонение T, %, при горячей гибке	Утонение T, %, при холодной гибке
$R \leqslant 2D$ $2D < R \leqslant 3D$ $R > 3D$	$T \leqslant 15$ % $T \leqslant 10$ % $T \leqslant 5$ %	$T \leqslant 25$ % $T \leqslant 20$ % $T \leqslant 15$ %

Таблица 3

Сравнение требований различных нормативных документов

Нормативный документ, общие ограничения		Овальность E	Утонение стенки	Высота гофр H
УТ МАКО Р1 Радиус гиба R не менее 3 диаметров трубы		Нет требований	$b = \frac{1}{2,5}\frac{D}{R}t_0$ до 13 % от толщины стенки	Нет требований
DNV GL Радиус гиба R не менее 3 диаметров трубы		$E < 7$ % для класса I и II	$b = \frac{1}{2,5}\frac{D}{R}t_0$ до 13 % от толщины стенки	$H = 0$ % для класса I и II
Правила Регистра [8] для труб судовых котлов*		$E < 11$ % для $R/d \leqslant 3,5$ $E < 8$ % для $R/d > 3,5$	до 18 %	Нет требований
ASME B31.1 (альтернатива в Правилах ABS)		Нет требований	Прибавка 6 ÷ 25 % в зависимости от радиуса гиба	Нет требований
ОСТ 5.95057-90	Холодная гибка	10 % для $D \leqslant 38$ мм 8 % для $D > 38$ мм	13 ÷ 24 % в зависимости от радиуса гиба**	$H < 3$ % Для наружного давления $H = 0$ %
	Горячая гибка и ТВЧ	8 % для $D < 159$ мм 10 % для $D > 159$ мм	18 ÷ 25 % в зависимости от радиуса гиба**	
Samsung Heavy Industrial (SHI)	Холодная гибка	$E \leqslant 10$ % для $R/d < 3$	15 ÷ 25 % в зависимости от радиуса гиба	$h \leqslant 2$ мм H — нет требований
	Горячая гибка		5 ÷ 15 % в зависимости от радиуса гиба	
HHI		$E < 7$ % для трубопроводов класса I и II	20 % для $3D \leqslant R \leqslant 4D$ 15 % для $4D \leqslant R \leqslant 5D$	$H < 1$%
DSME		E < 7 % для класса I и II E < 10 % для класса III	25 % для $2D \leqslant R \leqslant 3D$	$H < 1$ % и для классов I и II $h \leqslant 2$ мм

* — для судовых трубопроводов применяются требования УТ МАКО Р1.
** — с учетом вычета минусового допуска a, принятого как 10 %.

Все рассмотренные документы можно разделить на две группы:

1. технологические нормативные документы, регламентирующие качество гиба, а именно утонение стенки и изменение формы трубы;

2. расчетные нормативные документы, регламентирующие прочность труб в районе гиба и прибавку на утонение труб при гибке.

Первая группа документов регламентирует утонение стенки как технологический параметр, планирование и контроль которого характеризует качество. При этом в документах второй группы требования направлены на компенсацию дополнительных напряжений, возникающих в результате утонения стенки и изменения формы. Таким образом сравнение требований нормативных документов из двух разных групп будет не корректным без учета различного влияния технологических параметров на величину напряжений.

Все рассмотренные промышленные стандарты по гибке труб, как отечественные, так и зарубежные, приводят требования по максимальному утонению стенки в процентах от общей толщины стенки трубы. В отличие от них унифицированные требования МАКО и Кодексов ИМО вычисляют прибавку для компенсации при гибке исходя из минимальной толщины стенки без учета прибавки на коррозию. Это приводит к тому, что в районе наружной поверхности гиба прибавка на коррозию после операции гибки становится существенно меньше, чем на прямых участках труб. Из этого следует, что в местах гиба развитие местной коррозии приводит к быстрому появлению сквозных язв и существенному сокращению ресурса трубопровода.

Из произведенного анализа можно сделать несколько выводов.

1. В отличие от большинства классификационных обществ, все рассмотренные промышленные стандарты регламентируют величину овальности и наличие гофр. Требования зарубежных верфей к допустимой величине гофр существенно жестче требований ОСТ 5.95057-90: 1 % против 3 %. Требования к овальности близки и находятся в пределах 7÷10 %. При этом зарубежные верфи, в отличие от ОСТ 5.95057 90, следуют рекомендациям DNV-GL и разделяют требования для труб класса I и II (7 %) и класса III (10 %).

2. Требование о том, что утонение стенки трубы в результате гиба должно быть не более прибавки на изгиб, рассчитанной по формуле (5) на практике не всегда выполнимо и требовать его выполнения на практике технического наблюдения не имеет смысла. Это связано с тем, что расчет утонения ведется исходя их минимальной допустимой толщины стенки, в то время как реальное утонение стенки при гибе зависит от реальной выбранной трубы, толщина которой значительно (часто в несколько раз) больше и, соответственно, величина утонения больше.

3. Известно, что появляющаяся в процессе гиба овальность связана с уменьшением толщины стенки трубы, и чем больше овальность, тем меньше будет утонение. Поэтому поскольку оба этих параметра влияют на величину напряжений, их следует учитывать совместно. Изменение напряжений в месте гиба зависит не только от толщины стенки, но и от отклонений трубы от цилиндрической формы, влияние таких факторов как овальность и радиус гиба на прочность требует отдельной оценки и выработки специальных корректирующих коэффициентов.

4. Разработка научно обоснованных норм допустимых деформаций при гибке труб и связь их с расчетами на прочность есть актуальная задача нормирования судовых трубопроводов, влияющая на их надежность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила классификации и постройки морских судов. Часть VIII. Системы и трубопроводы. Российский морской регистр судоходства, 2020.
2. International Association of Classification Societies. IACS UR P1. Rules for pipes Rev.5 Nov 2001. — Electronic Edition of IACS Resolutions, 2021.
3. International Code for Construction and Equipment of Ships Carrying Liquefied Gases in Bulk (IGC Code).
4. International Code for the Construction and Equipment of Ships carrying Dangerous Chemicals in Bulk (IBC Code).
5. DNV·GL Rules for Classification. Ships Part 4 Ch. 6 Piping systems, Edition July 2020.
6. ABS Rules for Building and Classing Steel Vessels. Part 4, Ch. 6, Sec.2, 2015.
7. ASME B31.1 Code for Power Piping.
8. Правила технического наблюдения за постройкой судов и изготовлением материалов и изделий для судов. Часть VI. Техническое наблюдение за изготовлением изделий. Российский морской регистр судоходства, 2020.
9. ОСТ 5.95057-90 Системы судовые и системы судовых энергетических установок. Типовой технологический процесс изготовления и монтажа трубопроводов. — Л., 1990, 207 с.

REFERENCES

1. Rules for the Classification and Construction of Sea-Going Ships. Part VIII. Systems and Piping, Russian Maritime Register of Shipping, 2020. (In Russian)
2. International Association of Classification Societies. IACS UR P1. Rules for pipes Rev.5 Nov 2001. — Electronic Edition of IACS Resolutions, 2021.
3. International Code for Construction and Equipment of Ships Carrying Liquefied Gases in Bulk (IGC Code).
4. International Code for the Construction and Equipment of Ships carrying Dangerous Chemicals in Bulk (IBC Code).
5. DNV·GL Rules for Classification. Ships Part 4 Ch. 6 Piping systems, Edition July 2020.
6. ABS Rules for Building and Classing Steel Vessels. Part 4, Ch. 6, Sec.2, 2015.
7. ASME B31.1 Code for Power Piping.
8. Rules for Technical Supervision during Construction of Ships and Manufacture of Materials and Products for Ships. Part VI. Technical supervision during the manufacture of products. Russian Maritime Register of Shipping, 2020. (In Russian)
9. OST 5.95057-90 Ship systems and systems of ship power plants. Typical technological process for the manufacture and installation of pipelines. — L., 1990, 207 p. (In Russian)



УДК 331.542

АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ ПОДХОДОВ К ОЦЕНКЕ КВАЛИФИКАЦИИ НА ПРИМЕРЕ СПЕЦИАЛИСТОВ, ВЫПОЛНЯЮЩИХ ВОДОЛАЗНЫЕ СПУСКИ И ПОДВОДНЫЕ РАБОТЫ

И.Ф. Зенкова, канд. техн. наук, ФГБУ ВНИИПО МЧС России, Балашиха, e-mail: irina_sergeyz@mail.ru

В статье проведен анализ состояния современного механизма обеспечения оценки квалификации. На примере специалистов, выполняющих водолазные спуски и подводные работы, исследована область их профессиональной деятельности. Сформулированы задачи, решаемые специалистами, занятыми выполнением подводных (водолазных) работ. Приведен обзор положений действующего профессионального стандарта «Водолаз», а также этапов актуализации указанного стандарта: обоснование целесообразности, порядок рассмотрения, конечный результат. Определен совет по профессиональным квалификациям, за которым закреплены разработка и актуализация профессионального стандарта «Водолаз». Подготовлен вывод о наличии возможности обеспечения запроса трудового рынка на работников требуемого профиля путем использования положений действующих нормативных правовых актов Российской Федерации и нормативных документов, регламентирующих формирование системы независимой оценки квалификации.

Ключевые слова: *независимая оценка квалификации, водолазные спуски, подводные работы, профессиональный стандарт, актуализация*

ANALYSIS OF MODERN APPROACHES TO QUALIFICATION ASSESSMENT AS DEMONSTRATED WITH SPECIALISTS PERFORMING DIVING AND UNDERWATER WORKS

I.F. Zenkova, PhD, FGBU VNIIP EMERCOM of Russia, Balashikha, e-mail: irina_sergeyz@mail.ru

The article analyzes modern mechanism for ensuring qualification assessment in its current state. The field of professional activity of specialists performing diving and underwater work has been investigated. The tasks they solve have been formulated. An overview of the professional standard "Diver" has been given. The update of the standard has also been reviewed and a professional qualifications council that develops and updates the professional standard "Diver" has been established. Positive conclusion on the provision of a request for the labor market has been drawn and the documents regulating the formation of an independent qualification assessment system have been considered sufficient.

Keywords: *independent qualification assessment, diving, underwater works, professional standard, updating*

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность исследования определяется необходимостью определения современного состояния нормативной правовой и методической базы, регламентирующей организацию и осуществление переработки требований к квалификации специалистов различных областей деятельности, а также ее достаточности, с учетом расширяющейся сферы применения профессиональных знаний и навыков указанных специалистов.

Цель проведенного исследования заключается в изучении на примере специалистов, выполняющих водолазные спуски и подводные работы, современных подходов к оценке квалификации работников, а также проведении анализа степени проработки указанной проблемы. Исследование проводилось с учетом результатов общего анализа потребности в разработке и актуализации профессиональных стандартов (используя в данных целях метод экспертного опроса) [1], а также анализа регламентирующей нормативной правовой базы.

В настоящее время, при реализации положений действующего законодательства, определяющего порядок проведения независимой оценки квалификации специалистов различного профиля [2], для оценки возможности выполнения соответствующими специалистами водолазных работ различной степени сложности используется профессиональный стандарт «Водолаз» (далее — ПС «Водолаз») [3], действующая редакция которого разработана на основе утвержденного макета [1] и включает в себя ряд возможных наименований должностей, в рамках которых осуществляется выполнение водолазных спусков и подводных работ различного назначения.

ОБЛАСТИ ПРОФЕССИОНАЛЬНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ СПЕЦИАЛИСТОВ, ВЫПОЛНЯЮЩИХ ВОДОЛАЗНЫЕ СПУСКИ И ПОДВОДНЫЕ РАБОТЫ

Водолазные работы являются важной составляющей частью широкого спектра различных видов деятельности. В области обеспечения национальной безопасности водолазные работы активно используются при реализации Стратегии развития морской деятельности Российской Федерации [4], являясь одним из инструментов исследования и освоения глубин Мирового океана, а также континентального шельфа. Кроме того, технологии водолазного дела активно применяются в своей деятельности федеральными органами исполнительной власти (МЧС России, Минобороны России, МВД России, Минтранс России, Минприроды России и др.), организациями РАН, хозяйствующими субъектами с различными формами собственности.

Специалисты, осуществляющие водолазные спуски и подводные работы, принимают участие в решении различных государственных, а также иных задач:

- обеспечение выполнения задач в области обороны, деятельности Военно-морского флота, охраны государственной границы Российской Федерации, охраны прибрежных государственных объектов и антитеррористической деятельности;
- ведение на море и акваториях водных бассейнов поиска и аварийно-спасательных водолазных работ в ходе ликвидации чрезвычайных ситуаций, связанных со спасением людей, терпящими бедствие кораблями и судами (иными затонувшими объектами);
- совершенствование и развития научного комплекса, обеспечивающего проведение исследования морской среды и ее ресурсов;
- проведение мониторинга биологических ресурсов и организации производства и добычи морепродуктов;
- разведка и разработка месторождений полезных ископаемых морей и океанов;
- прокладка и обслуживание подводных линий связи, электроэнергии и продуктопроводов;
- строительство и обслуживания гидротехнических сооружений;
- подъем затонувших объектов;
- организация безопасности туристической и любительской подводной деятельности.

АНАЛИЗ ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО СТАНДАРТА И ОСНОВНЫХ СФЕР ЕГО ПРИМЕНЕНИЯ

Разнообразие направлений выполняемых работ указывает на необходимость обеспечения требуемого уровня квалификации специалистов, осуществляющих водолазные спуски и подводные работы, наличие у них требуемых профессиональных знаний и навыков — для достижения качественного результата. Соответственно, профессиональный стандарт должен содержать условия подтверждения уровня квалификации оцениваемого специалиста с учетом современных требований, предъявляемых в затрагиваемых областях профессиональной деятельности, так как объективная оценка указанного уровня невозможна без использования объективных и достаточных критериев.

Все вышеизложенное обуславливает применение при анализе ПС «Водолаз» (инструмента, применяемого для оценки квалификации специалистов, занятых выполнением подводных, водолазных работ) системного подхода, что позволит определить:

- области, а также основные цели и задачи профессиональной деятельности, к которой отнесен ПС «Водолаз»;
- основные сферы применения ПС «Водолаз» (с учетом профессиональных квалификаций водолазов [5]);
- целесообразность (нецелесообразность) принятия решения о переработке ПС «Водолаз» с формированием, в случае принятия положительного решения, соответствующей рабочей группы [11].

Следует отметить, что решение о целесообразности актуализации профессионального стандарта принимается по результатам мониторинга практики его применения, а также на основании замечаний, поступивших в совет по профессиональным квалификациям от представителей профессионального сообщества, Минтруда России, других заинтересованных организаций.

Анализ показал, что ПС «Водолаз» — многофункциональный межотраслевой нормативный документ, описывающий области профессиональной деятельности, содержание трудовых функций и необходимых для их выполнения компетенций по различным квалификационным уровням, а также ряд других параметров, характеризующих специфику данного труда. Областью профессиональной деятельности, к которой отнесен ПС «Водолаз», является производство подводных работ, включая водолазные, цель которых — выполнение водолазных спусков и подводных работ различного назначения с применением водолазного снаряжения и средств обеспечения водолазных спусков и подводных работ.

Действующая редакция данного стандарта соответствует положениям законодательства [6], определившим развитие инструментария оценки профессионального уровня работников с учетом формирования системы непрерывного получения профессиональных знаний и навыков работающими гражданами как реализацию одной из основных стратегических задач государства. В целях выполнения задачи Национальной системой квалификации (далее — НСК) предусмотрено совокупное применение правовых положений и организационных структур, обеспечивающее взаимодействие образовательных и трудовых сфер, а также создание благоприятных условий для роста профессионализма применительно к запросам национального и международного уровней.

Дальнейшие исследования позволили определить следующие основные сферы применения ПС «Водолаз»:

- использование стандарта возможно в области управления персоналом (при разработке внутренних стандартов, разработке системы мотивации и стимулирования работников, формировании должностных инструкций, тарификация должностей. подборе и аттестация персонала, планирование карьерного роста);
- стандарт может быть применен при установлении и поддержании единых требований к содержанию и качеству профессиональной деятельности, согласовании наименований должностей, оценки квалификаций [2], формировании государственных образовательных стандартов, а также программ профессионального образования и обучения.

ПОРЯДОК РАЗРАБОТКИ И АКТУАЛИЗАЦИИ ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО СТАНДАРТА

Необходимо пояснить, что разработка и актуализация профессиональных стандартов, содержащих определенные квалификационные характеристики, применение которых служит работодателю основанием определения требуемой (с учетом особенностей выполняемых трудовых функций) квалификации работников, закреплена [7] за соответствующими отраслевыми советами по профессиональным квалификациям. Советы по профессиональной квалификации являются основными участниками НСК, структурными единицами, обеспечивающими своевременную разработку новых профессиональных стандартов, а также актуализацию действующих.

Протоколом Национального совета при Президенте Российской Федерации по профессиональным квалификациям [8] профильные квалификации «водолаз-спасатель» (4 уровень квалификации), «водолаз» (4 уровень квалификации), «специалист по организации водолазно-спасательных и других специальных работ высокой сложности» (6 уровень квалификации) закреплены за Советом по профессиональным квалификациям в области обеспечения безопасности в чрезвычайных ситуациях (далее — СПК ЧС), созданным на базе Общероссийской общественной организации «Всероссийское добровольное пожарное общество» [9], чьи функции, права, обязанности и порядок работы установлены соответствующим положением [10].

Анализ результатов проведенных СПК ЧС исследований методом экспертного опроса в условиях межотраслевого применения показал необходимость актуализированной редакции ПС «Водолаз».

Работа по внесению изменений выполнялась в 2019 — 2021 годах СПК ЧС совместно с представителями работодателей ключевых отраслей, а также ведущих образовательных организаций высшего и среднего профессионального образования (далее — рабочая группа СПК ЧС), в соответствии с установленным правилам [1], и включала следующие этапы:

1. анализ квалификационных требований и разработка концепции профессионального стандарта;
2. анализ действующего профессионального стандарта;
3. разработка проекта актуализированного профессионального стандарта;
4. обсуждение проекта актуализированного профессионального стандарта, сбор отзывов, доработка проекта с учетом поступивших замечаний.

При актуализации ПС «Водолаз» рабочей группе СПК ЧС также требовалось учесть особенности специфики указанной деятельности (например, руководство водолазными спусками на различных глубинах), в связи с тем, что работы, выполняемые водолазами в рамках профессиональной деятельности подразделяются на аварийные, подводно-технические, работы на морских нефтегазовых промыслах, судовые (корабельные) и судоремонтные, судоподъемные, аварийно-спасательные, научные, обследование и очистка дна акваторий, промысловые, спасательные, специальные.

Подготовленный проект актуализированной редакции ПС «Водолаз» прошел обсуждение с заинтересованными организациями в следующем порядке:

1. размещение проекта на сайтах СПК ЧС, Минтруда России, в социальной сети экспертов СПК ЧС;
2. проведение круглых столов;
3. размещение информации о разработанном проекте стандарта и его публичном обсуждении на сайтах Минтруда России;
4. обсуждение проекта профессионального стандарта в информационной системе «Я — эксперт», с привлечением широкого круга экспертов СПК ЧС.

В настоящее время, рабочей группой СПК ЧС проведено более пятнадцати круглых столов в формате видеоконференций. Замечания и предложения, высказанные в ходе публичного обсуждения, нашли свое отражение в редакции проекта профессионального стандарта.

Выбранный формат обсуждения позволил провести всестороннее рассмотрение проекта актуализированного ПС «Водолаз» с последующим размещением его первичной редакции на открытой площадке regulation.gov.ru. Редакция успешно прошла независимую антикоррупционную экспертизу и готовится к передаче на утверждение.

ВЫВОДЫ

Проведенные на примере специалистов, выполняющих водолазные спуски и подводные работы, исследования современных подходов при оценке квалификации показали наличие достаточного нормативного правового и методического инструментария, позволяющего обеспечить запрос трудового рынка на работников требуемого профиля. Кроме того, применение профессиональных стандартов, совершенствование которых неразрывно связано с современными научными и практическими требованиями, предоставляет возможность гибкого управления профессиональными компетенциями.

Одновременно, использование принятого порядка переработки действующих профессиональных стандартов показывает его эффективность и соответствует целям совершенствования непрерывной системы образования, что позволяет выстраивать поступательное и гибкое развитие Национальной системы квалификации, обеспечивая ее жизнеспособность и востребованность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баргоякова И.И. Определение потребности в разработке и актуализации профессиональных стандартов с использованием социологических методов исследования. Социально-трудовые исследования, Москва, 2020, № 2 (39), с. 99 — 112.
2. Доронина Ю.Ю., Доронина М.И. Профессиональные стандарты и независимая оценка квалификации работника: новое в трудовом законодательстве. Вестник института мировых цивилизаций, Москва, 2017, № 14, с. 61 — 64.
3. Об утверждении профессионального стандарта «Водолаз» [приказ Министерства труда и социальной защиты Российской Федерации № 765н от 31.10.2017]. Режим доступа: https://docs.cntd.ru/document/555732317 (дата обращения: 19.04.2022).
4. Исмаилов А.И., Попов А.Н., Пучнин В.В. Проблемы и стратегические приоритеты развития морской деятельности Российской Федерации на период до 2030 года. Морской вестник, Санкт-Петербург, 2018, № 3 (67), с. 116 — 120.
5. Логунов К.В. Профессиональные квалификации водолазов: виды, уровни, классы. Гидротехническое строительство № 4, Москва, 2015, с. 24 — 34.
6. О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года [Указ Президента Российской Федерации № 204 от 07.05.2018]. Режим доступа: http://www.kremlin.ru/acts/bank/43027 (дата обращения: 22.04.2022).
7. Об утверждении Примерного положения о совете по профессиональным квалификациям и Порядка наделения совета по профессиональным квалификациям полномочиями по организации проведения независимой оценки квалификации по определенному виду профессиональной деятельности и прекращения этих полномочий [приказ Минтруда России № 758н от 19.12.2016]. Режим доступа: https://base.garant.ru/71580458 (дата обращения: 20.04.2022).
8. Протокол заседания Национального совета при Президенте Российской Федерации по профессиональным квалификациям № 33 от 29.12.2018. Режим доступа: https://nspkrf.ru/documents/materialy-natsionalnogo-soveta/2018-1/29-12-18-33.html (дата обращения: 22.04.2022).
9. Протокол заседания Национального совета при Президенте Российской Федерации по профессиональным квалификациям № 24 от 08.12.2017. Режим доступа: https://spkchs.ru/upload/a16/Protokol-zasedaniya-NSPK-ot-08.pdf (дата обращения: 22.04.2022).
10. Положение Совета по профессиональным квалификациям в области обеспечения безопасности в чрезвычайных ситуациях [Приложение 1 к протоколу № 6 заседания Совета по профессиональным квалификациям в области обеспечения безопасности в чрезвычайных ситуациях от 20.12.2018.]: Режим доступа: https://spkchs.ru/upload/a16/Polozhenie-o-Sovete-ot-20.pdf (дата обращения: 20.04.2022).
11. О создании рабочих групп по разработке и актуализации профессиональных стандартов [Решение Центра экспертизы и актуализации профессиональных стандартов от 28 января 2020 г. № 0120-01ПС]: Режим доступа: https://spkchs.ru/upload/a43/Reshenie-CEAPS-№-0120-01PS.pdf (дата обращения: 22.04.2022).

REFERENCES

1. Bargoyakova I.I. *Opredelenie potrebnosti v razrabotke i aktualizatsii professional'nykh standartov s ispolzovaniem sotsiologicheskikh metodov issledovaniya* [Determining the need for the development and updating of professional standards using sociological research methods]. Social and labor research, Moscow, 2020, No. 2 (39), p. 99 — 112.
2. Doronina Yu.Y., Doronina M.I. *Professionalnye standarty i nezavisimaya otsenka kvalifikatsii rabotnika: novoe v trudovom zakonodatelstve* [Professional standards and independent assessment of an employee's qualifications: news in labor legislation]. Bulletin of the Institute of World Civilizations, Moscow, 2017, No. 14, p. 61 — 64.
3. On approval of the professional standard "Diver" [Order of the Ministry of Labor and Social Protection of the Russian Federation No. 765n dated 31.10.2017]. Webpage: https://docs.cntd.ru/document/555732317 (accessed on: 19.04.2022). (In Russian).
4. Ismailov A.I., Popov A.N., Puchnin V.V. *Problemy i strategicheskie prioritety razvitiya morskoy deyatelnosti Rossiyskoy Federatsii na period do 2030 goda* [Problems and strategic priorities for the development of marine activities of the Russian Federation for the period until 2030]. Morskoy Vestnik, St. Petersburg, 2018, No. 3 (67), p. 116 — 120.
5. Logunov K.V. *Professionalnye kvalifikatsii vodolazov: vidy, urovni, klassy* [Professional qualifications of divers: types, levels, classes]. Hydrotechnical construction, Moscow, 2015, No. 4, p. 24 — 34.
6. On national goals and strategic objectives of the development of the Russian Federation for the period up to 2024 [Decree of the President of the Russian Federation No. 204 dated 07.05.2018]. Webpage: http://www.kremlin.ru/acts/bank/43027 (accessed on: 22.04.2022). (In Russian).

7. On approval of the Model Regulation on the Council for Professional Qualifications and the Procedure for granting the Council for Professional Qualifications the authority to organize an independent assessment of qualifications for a certain type of professional activity and the termination of these powers [Order of the Ministry of Labor of Russia No. 758n dated 19.12.2016]. Webpage: https://base.garant.ru/71580458 (accessed on: 20.04.2022). (In Russian).
8. Minutes of the meeting of the National Council under the President of the Russian Federation on professional qualifications No. 33 dated 29.12.2018. Webpage: https://nspkrf.ru/documents/materialy-natsionalnogo-soveta/2018-1/29-12-18-33.html (accessed on: 22.04.2022). (In Russian).
9. Minutes of the meeting of the National Council under the President of the Russian Federation on professional qualifications No. 24 dated 08.12.2017. Webpage: https://spkchs.ru/upload/a16/Protokol-zasedaniya-NSPK-ot-08.pdf (accessed on 22.04.2022). (In Russian).
10. Regulations of the Emergency Safety Professional Qualifications Board [Annex 1 to Protocol No. 6 of the Emergency Safety Professional Qualifications Board dated 20.12.2018]: Webpage: https://spkchs.ru/upload/a16/Polozhenie-o-Sovete-ot-20.pdf (accessed on: 20.04.2022). (In Russian).
11. On the creation of working groups for the development and updating of professional standards [Decision of the Center for Expertise and Updating of Professional Standards No. 0120-01PS dated 28.01.2020]: Webpage: https://spkchs.ru/upload/a43/Reshenie-CEAPS-No. 0120-01PS.pdf (accessed on: 22.04.2022). (In Russian).

ПРАВИЛА ПРЕДОСТАВЛЕНИЯ СТАТЕЙ

1. СОДЕРЖАНИЕ И ОФОРМЛЕНИЕ СТАТЕЙ

1.1 Материал статьи должен являться оригинальным, не опубликованным ранее в других печатных изданиях, соответствовать профилю журнала. Он должен содержать информацию, подтверждающую актуальность и практическую значимость исследования, а также информацию о внедрении его результатов.

1.2 Авторы несут личную ответственность за то, что текст статьи не содержит материалов:

- рекламного характера;
- содержащих государственную тайну;
- публикация которых приведет к нарушению действующего законодательства РФ в сфере защиты информации и интеллектуальной собственности.

1.3 В тексте статьи может быть указан источник финансирования выполненных исследований.

1.4 К материалу должна быть приложена рецензия (отзыв) за подписью рецензента, имеющего ученую степень и опыт работы по данному научному направлению. Формат рецензии доступен на интернет-сайте журнала (https://rs-class.org/ru/register/about/scientific/ntsb.php). Статьи для аспирантов должны быть подписаны их научным руководителем.

1.5 Материалы для публикации в журнале предоставляются авторами на безвозмездной основе.

1.6 Общие требования к оформлению материалов.

1.6.1 Объем материалов в электронном виде должен составлять не более 20000 печатных знаков. В этот объем включаются таблицы, схемы, диаграммы и т. д., а также изображения в виде иллюстраций.

1.6.2 Статья должна содержать следующую информацию:

- заглавие на русском и английском языках, точно отражающее содержание статьи (не более 120 печатных знаков);
- фамилию, имя, отчество авторов приводятся полностью. Количество указанных авторов статьи не должно превышать 4 чел;
- сведения об авторах: по каждому из авторов должны быть приложены на русском и английском языках подробные сведения — ученые степень и звание, должность, место работы (принятое в уставе организации официальное название), город, телефон и адрес электронной почты автора;
- индекс УДК;
- аннотацию, в которой четко определены основные цели, задачи, содержание и результаты проведенного исследования, возможности его практического применения. Приводится на русском и английском языках. Объем от 100 до 250 слов;
- ключевые слова: 8 — 10 слов/словосочетаний, наиболее полно отражающих тему статьи. Недопустимо использование слов общего характера (например, — проблема, решение). Предоставляются на русском и английском языках (Key words). Ключевые слова по возможности не должны повторять термины заглавия и аннотации, а должны использовать термины из текста статьи и термины, определяющие предметную область, а также включать другие важные понятия, позволяющие облегчить и расширить возможности нахождения статьи средствами информационно-поисковой системы;
- основной текст статьи: общие принципы построения статьи могут варьироваться в зависимости от тематики и особенностей проведенного исследования. Рекомендуется выделять в тексте статьи постановку задачи, описание методов решения, анализ результатов и выводы. Если имеется перевод статьи на английский язык, желательно его представить;
- список литературы.

2. ТРЕБОВАНИЯ К ПРЕДОСТАВЛЕНИЮ СПИСКА ЛИТЕРАТУРЫ

2.1 Список литературы обязательно оформляется в двух вариантах: на кириллице и на латинице. Список литературы на кириллице приводится в конце статьи, оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ 7.1-2003. Библиографические ссылки оформляются в соответствии с ГОСТ Р 7.0.5-2008.

2.2 Кириллические названия в списке литературы транслитерируются на латиницу. Для автоматизации процесса транслитерации можно воспользоваться программным обеспечением, которое доступно по адресу www.translit.ru (в раскрывающемся списке «Варианты» выбрать вариант BGN).

2.3 Основные стандарты для предоставления ссылок в латинице на статьи из журналов.

2.3.1 Для русскоязычных статей рекомендуются следующие схемы библиографической ссылки:

.1 полное описание статьи:

- авторы (транслитерация);
- заглавие статьи (транслитерация);
- [перевод заглавия статьи на английский язык в квадратных скобках];
- название русскоязычного источника (транслитерация);
- [перевод названия источника на английский язык];
- выходные данные с обозначениями на английском языке, либо только цифровые;

.2 описание статьи только с переводом заглавия статьи на английский язык:

- авторы (транслитерация);
- перевод заглавия статьи на английский язык;
- название русскоязычного источника (транслитерация и курсив);
- [перевод названия источника на английский язык];
- выходные данные с обозначениями на английском языке, либо только цифровые;
- указание на языке статьи (In Russ.) после описания статьи.

Предлагаемая схема:

Author A.A., Author B.B., Author C.C., Author D.D. Title of article. Title of Journal, 2005, vol. 10, no. 2, pp. 49 — 53.

П р и м е р :

Byzov A.L., Utina I.A. The centrifugal effects on amacrine cells in the retina of frog. Neirofiziologia [Neurophysiology]. 1971; (3): 293 — 300. (In Russ.)

2.3.2 Число авторов не ограничивается тремя, а указывается, по возможности, все или в разумных пределах.

2.3.3 Заглавие статьи не берется в кавычки.

2.3.4 Год ставится за заглавием журнала.

2.3.5 Название источника выделяется курсивом. Применение курсива для названия источника очень важно, т. к. исполнение одним шрифтом заглавия статей и источника в русскоязычных ссылках часто приводит к ошибочному их представлению в системах цитирования.

2.4 Основные стандарты для предоставления ссылок в латинице на другие виды изданий.

2.4.1 Рекомендуется следующая схема описания монографии (книги, сборника):

- автор(ы) монографии;
- название монографии (транслитерация и курсив);
- [перевод названия монографии в квадратных скобках];
- выходные данные: место издания на английском языке — Moscow, St. Petersburg; издательство на английском языке, если это организация (Moscow St. Univ. Publ.), и транслитерация, если издательство имеет собственное название с указанием на английском, что это издательство: GEOTAR-Media Publ., Nauka Publ.;
- количество страниц в издании.

П р и м е р : Nigmatulin R.I. *Dinamika mnogofaznykh sred* [Dynamics of multiphase media]. Moscow, Nauka Publ., 1987. Pt. 1, 464 p.

2.5 Примеры описаний литературных источников в латинице.

2.5.1 Описание статьи из электронного журнала:

Kontorovich A.E., Korzhubaev A.G., Eder L.V. [Forecast of global energy supply: Techniques, quantitative assessments, and practical conclusions]. Mineral'nye resursy Rossii. Ekonomika i upravlenie, 2006, no. 5. (In Russ.) Available at: http://www.vipstd.ru/gim/content/view/90/278/). (accessed 22.05.2012).

2.5.2 Описание статьи из продолжающегося издания (сборника трудов):

Astakhov M.V., Tagantsev T.V. [Experimental study of the strength of joints "steelcomposite"]. Trudy MGTU "Matematicheskoe modelirovanie slozhnykh tekhnicheskikh system" [Proc. of the Bauman MSTU "Mathematical Modeling of Complex Technical Systems"], 2006, no. 593, pp. 125 — 130. (In Russian).

2.5.3 Описание материалов конференций:

Usmanov T.S., Gusmanov A.A., Mullagalin I.Z., Muhametshina R.Ju., Chervyakova A.N., Sveshnikov A.V. [Features of the design of field development with the use of hydraulic fracturing]. Trudy 6 Mezhdunarodnogo Simpoziuma "Novye resursosberegayushchie tekhnologii nedropol'zovaniya i povysheniya neftegazootdachi" [Proc. 6th Int. Symp. "New energy saving subsoil technologies and the increasing of the oil and gas impact"]. Moscow, 2007, pp. 267 — 272. (In Russian).

Нежелательно включать только переводное название конференции, так как оно при попытке найти эти материалы идентифицируется с большим трудом.

2.5.4 Описание переводной книги:

Timoshenko S.P., Young D.H., Weaver W. Vibration problems in engineering. 4th ed. New York, Wiley, 1974. 521 p. (Russ. ed.: Timoshenko S.P., Iang D.Kh., Uiver U. Kolebaniia v inzhenernom dele. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1985. 472 p.).

2.5.5 Описание Интернет-ресурса:

Kondrat'ev V.B. Global'naya farmatsevticheskaya promyshlennost' [The global pharmaceutical industry]. Available at: http://perspektivy.info/rus/ekob/globalnaja_farmacevticheskaja_promyshlennost_2011-07-18.html. (accessed 23.06.2013).

2.5.6 Описание диссертации или автореферата диссертации:

Semenov V.I. Matematicheskoe modelirovanie plazmy v sisteme kompaktnyi tor. Diss. dokt. fiz.-mat. nauk [Mathematical modeling of the plasma in the compact torus. Dr. phys. And math. sci. diss.]. Moscow, 2003. 272 p.

2.5.7 Описание ГОСТ:

GOST 8.586.5-2005. Metodika vypolneniia izmerenii. Izmerenie raskhoda i kolichestva zhidkostei i gazov s pomoshch'iu standartnykh suzhaiushchikh ustroistv [State Standard 8.586.5 – 2005. Method of measurement. Measurement of flow rate and volume of liquids and gases by means of orifice devices]. Moscow, Standartinform Publ., 2007. 10 p.

3. ТРЕБОВАНИЯ К АННОТАЦИЯМ

3.1 Основные цели и задачи аннотации.

Аннотация является кратким резюме большой по объему работы, имеющей научный характер. Аннотация может публиковаться самостоятельно, в отрыве от основного текста и, следовательно, должна быть понятной без обращения к самой публикации.

По аннотации к статье читателю должна быть понятна суть исследования.

По аннотации читатель должен определить, стоит ли обращаться к полному тексту статьи для получения более подробной, интересующей его информации.

Аннотации к статьям доступны на сайте журнала https://rs-class.org/ru/register/about/scientific/ntsb.php.

Аннотация на русском языке является основой для подготовки авторского резюме на английском языке, но не должна переводиться дословно (калькой), при этом должны соблюдаться основные правила и стилистика английского языка. Использование автоматизированных программ для перевода категорически запрещено. При обнаружении низкого качества перевода аннотации статья будет отклонена.

3.2 Структура, содержание и объем аннотации.

Аннотация должна излагать существенные факты работы, не должна преувеличивать или содержать материал, который отсутствует в основной части публикации.

Приветствуется структура аннотации, повторяющая структуру статьи и включающая введение, цели и задачи, методы, результаты/обсуждение, заключение/выводы.

Аннотация включает:

• цель работы в сжатой форме. Предыстория (история вопроса) может быть приведена только в том случае, если она связана контекстом с целью;

• краткое изложение основных фактов работы, при этом необходимо:

следовать хронологии статьи и использовать ее заголовки в качестве руководства;

не включать несущественные детали;

обеспечивать, чтобы текст был связным — с использованием слов «следовательно», «более того», «например», «в результате» и т.д. («consequently», «moreover», «for example», «the benefits of this study», «as a result» etc.);

использовать активный, а не пассивный залог, т.е. «The study tested», но не «It was tested in this study»;

• выводы, сопровождаемые рекомендациями, оценками, предложениями, гипотезами, описанными в статье.

Следует избегать лишних вводных фраз (например, «автор статьи рассматривает…»). Исторические справки, если они не составляют основное содержание документа, описание ранее опубликованных работ и общеизвестные положения в аннотации не приводятся.

В тексте аннотации следует употреблять синтаксические конструкции, свойственные языку научных и технических документов, избегать сложных грамматических конструкций.

Текст аннотации должен быть лаконичен и четок, свободен от второстепенной информации, лишних вводных слов, общих и незначащих формулировок.

Сокращенные и условные обозначения, кроме общеупотребительных, применяют в исключительных случаях или дают их расшифровку и определения при первом употреблении в авторском резюме.

В аннотации не делаются ссылки на номер публикации в списке литературы к статье.

Объем текста аннотации определяется содержанием публикации (объемом сведений, их научной ценностью и/или практическим значением), должен быть от 100 до 250 слов.

4. ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ ТЕКСТА

4.1 Редактор — MS Word.

4.2 Шрифт: Times New Roman, размер шрифта — 14, цвет — черный, начертание — обычное. Интервал между строками — 1,5; абзацный отступ — 1,25; ориентация – книжная; поля — 2 см со всех сторон. Текст должен быть выровнен по ширине. Красные строки обязательны.

4.3 Разделы статьи (кроме «Введение» и «Выводы») нумеруются арабскими цифрами. Допускается не нумеровать разделы (заголовки), служащие лишь для акцентирования тем в небольшом тексте.

4.4 Нумерация пунктов и в списках — арабскими цифрами.

4.5 Ссылки на источник в списке литературы нумеруются арабскими цифрами и приводятся в тексте в квадратных скобках.

4.6 Подстрочные примечания (вынесенные из основного текста в конец полосы) связываются с текстом сносками в виде арабских цифр и нумеруются в пределах каждой отдельной полосы (страницы). Цифры набираются на верхнюю линию шрифта.

4.7 Кавычки оформляются символами «...» для наименований, набранных кириллицей, и символами "..." для наименований, набранных латиницей.

5. ОФОРМЛЕНИЕ ФОРМУЛ, ТАБЛИЦ И ИЛЛЮСТРАЦИЙ

5.1 Формулы должны быть набраны в в редакторе формул MS Word или символьным шрифтом. Вставки формул в виде картинок любого формата не допускаются. Размер кегля для формул — 12. Формулы, если их больше одной и если на них есть ссылки, нумеруются арабскими цифрами в круглых скобках по правому краю полосы.

5.2 Таблицы, если их больше одной, должны быть пронумерованы. Таблицы должны иметь заголовок, если только они не следуют сразу за текстом, однозначно определяющим их содержание. Номер таблицы и заголовок размещаются над таблицей. Таблицы должны быть выполнены в MS Excel или MS Word и встроены в текст статьи. Вставка таблиц в виде картинок любого формата не допускается. Размер кегля для таблиц — 11.

5.3 Иллюстрации (рисунки), если их больше одной (одного), должны быть пронумерованы и иметь подпись (если только содержание иллюстрации не понятно однозначно из предшествующего текста). Графические и фотоматериалы должны быть представлены в форматах JPEG, TIFF, быть качественными и иметь разрешение не менее 300 dpi.

5.4 Публикация фотографий/изображений в журнале «Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства» осуществляется в соответствии с требованиями статьи 1274 части четвертой Гражданского кодекса Российской Федерации от 18 декабря 2006 г. N 230-ФЗ. Свободное использование материалов в информационных и научных целях осуществляется с обязательным соблюдением следующих условий:

- указание автора или иного лица, являющегося правообладателем;
- указание источника заимствования;
- использование материалов в объеме, оправданном целью цитирования.

6. РЕЦЕНЗИРОВАНИЕ СТАТЕЙ

6.1 Текст статьи в электронном виде следует направлять непосредственно в адрес главного редактора журнала (boyko.ms@rs-class.org).

6.2 Статьи, направляемые в журнал «Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства», проходят двухуровневую процедуру рецензирования. На первом этапе рецензирования автор направляет в редакцию текст статьи с приложением внешней рецензии (отзыва) за подписью рецензента, имеющего ученую степень и опыт работы по данному направлению. На втором этапе текст статьи с отзывом направляется в отделы ГУР соответствующей специализации и независимым рецензентам. Также статья может быть представлена на соответствующей секции Научно-технического совета Регистра и передана ученым секретарем секции Главному редактору вместе с заключением о возможности опубликования. Компетентные рецензенты имеют все возможности свободно высказать мотивированные критические замечания относительно уровня и ясности изложения представленного материала, его соответствия профилю журнала, новизны и достоверности результатов. Решение о публикации статьи принимается главным редактором и редакционной коллегией журнала, с учетом всех имеющихся материалов и рецензий.

6.3 По результатам рецензирования статья может быть принята, отклонена или направлена автору на доработку.

6.4 Материалы, не утвержденные Редакционной коллегией к размещению в журнале, возвращаются автору с объяснением причины отказа в публикации.

6.5 Издание осуществляет рецензирование всех поступающих в редакцию материалов, соответствующих его тематике, с целью их экспертной оценки. Все рецензенты являются признанными специалистами по тематике рецензируемых материалов и имеют в течение последних 3 лет публикации по тематике рецензируемой статьи. Рецензии хранятся в издательстве и в редакции издания в течение 5 лет.

6.6 Редакция издания обязуется направлять копии рецензий в Министерство образования и науки Российской Федерации при поступлении в редакцию издания соответствующего запроса.

В оформлении издания использовались графические материалы из открытых источников сети интернет:

http://gibka-rezka-svarka.ru/
http://ns.abunda.ru/84637-ogromnye-vinty-bolshix-korablej-27-foto.html
http://www.cloveritservices.com/Home.aspx
www.fonstola.ru/
www.wallpapers.ru/
http://www.ye42oester.nl/
http://miraziz.uz/
http://www.radioscanner.ru/
http://xn–24-dlcyxgbyj.xn–80asehdb/?p=4257
http://www.russiapost.su/archives/12268
http://utimenews.org/ru/
http://kmtp.ru/
http://www.efg-berlin.de/
http://maritimeforum.net/
http://korabley.net/
http://demoweb.hermosoft.com/efos/

Фото для обложки журнала предоставлено Великановым Дмитрием Геннадьевичем, главным инженером-инспектором Петрозаводского участка Балтийского филиала РС

Российский морской регистр судоходства
Журнал
«Научно-технический сборник
Российского морского регистра судоходства»
вып. 66/67

Редакционная коллегия журнала

Редактор *А.В. Спиленко*
Компьютерная верстка *В.Ю. Пирогов*
Дизайн концепции *М.В. Батракова*

Подписано в печать 04.08.2022. Формат 60 × 84/8
Усл. печ. л.: 12,3. Уч.-изд.л.: 12,1. Тираж 200

Российский морской регистр судоходства
191186, Санкт-Петербург, Дворцовая набережная, 8
www.rs-class.org/ru/