



ISSN 2223-7097

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СБОРНИК

РОССИЙСКОГО МОРСКОГО РЕГИСТРА СУДОХОДСТВА

ПЛАВУЧИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПЛАТФОРМЫ
безопасность при работе в Арктической зоне 9

ОЦЕНКА РИСКА МОРСКИХ ОПЕРАЦИЙ
новые требования Регистра 17

ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ СУДНА
оценка влияния судовых систем 95



№ 48/49
Декабрь
2017

Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства, № 48/49, 2017

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

В.И. Евенко – председатель, заместитель генерального директора, ФАУ «Российский морской регистр судоходства»

М.С. Бойко – к.т.н., заместитель председателя, главный редактор журнала, начальник научно-исследовательского отдела, 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
М.А. Кутейников – д.т.н., начальник отдела конструкции корпуса и судовых устройств, ФАУ «Российский морской регистр судоходства»

В.А. Малышевский – д.т.н., проф., заместитель генерального директора, ФГУП «ЦНИИ конструкционных материалов «Прометей»

В.Н. Половинкин – д.т.н., проф., референт генерального директора, 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., заместитель генерального директора, ФГУП «Крыловский государственный научный центр»

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 Агентства «Роспечать». 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 ВИНТИ 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.

© Российский морской регистр судоходства, 2017

Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping, № 48/49, 2017

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

Vladimir Evenko – Deputy Director General, Chairman of Editorial board, RS

Maxim Boyko – Candidate of technical sciences, Deputy Chairman of Editorial board, Editor-in-Chief of Research Bulletin by RS, Head of the Research department, RS

Alexander Bolshev – Doctor of technical sciences, professor of St. Petersburg State Polytechnic University

Andrey Grigoriev – Candidate of technical sciences, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping
Mikhail Kuteynikov – Doctor of technical sciences, Head of the Hull department, RS

Victor Malyshevskiy – Doctor of technical sciences, professor, Chief Operating Officer of Central Research Institute of Structural materials “Prometey”

Valery Polovinkin – Doctor of technical sciences, professor, assistant of Chief Executive Officer, Krylov State Research Centre

Aleksander Rodionov – Doctor of technical sciences, professor of St. Petersburg State Marine Technical University

Kirill Rozhdestvenskiy – Doctor of technical sciences, professor of St. Petersburg State Marine Technical University

Anatoliy Sazonov – Doctor of technical sciences, professor of Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, corresponding member of Russian Academy of Science

Oleg Timofeev – Doctor of technical sciences, Deputy Director General for Shipbuilding and Marine Technologies, Krylov State Research Centre

Vladimir Tryaskin – Doctor of technical sciences, professor, St. Petersburg State Marine Technical University

Subscription index is 87730 in Rospechat Agency.

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.

© Russian Maritime Register of Shipping, 2017

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СБОРНИК

РОССИЙСКОГО МОРСКОГО РЕГИСТРА СУДОХОДСТВА

№ 48/49

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.

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.

**Санкт-Петербург
2017**

ОБРАЩЕНИЕ ГЕНЕРАЛЬНОГО ДИРЕКТОРА РС



УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ!

Представляем Вам новый выпуск журнала «Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства».

Традиционно в состав статей журнала включаются результаты выполненных по заказу Регистра научно-исследовательских работ. В новом номере в рубрике «Безопасность мореплавания и охрана окружающей среды» опубликована статья, посвященная разработке методов оценки рисков при проведении морских операций. Результаты данной научно-исследовательской работы внедрены в Правила разработки и проведения морских операций. Также в журнале представлены две статьи, подготовленные на основании научно-исследовательских работ, завершение которых запланировано в 2017 году. В разделе «Электрооборудование» представлена статья, посвященная разработке методики расчета токов короткого замыкания в судовых электроэнергетических системах с распределением электроэнергии на постоянном токе, предназначенной для внедрения в нормативные документы Регистра. В разделе «Материалы и сварка» представлена статья, посвященная применению композиционных материалов при ремонте судовых конструкций и разработке предложений по совершенствованию требований соответствующих нормативных документов Регистра.

Таким образом, для пользователей правил Регистра и читателей журнала создана возможность ознакомиться с более детальным научным обоснованием и основными преимуществами новых требований, рассмотреть научное обоснование с точки зрения достижений современной отраслевой науки.

Обратная связь с пользователями нормативных документов Регистра по наукоемким направлениям развития современной морской техники обеспечивается не только с помощью публикаций в журнале, но и проведением Регистром конференций и семинаров. В качестве примера следует отметить мероприятия, организованные в рамках выставки «НЕВА-2017»: семинар по применению композитных материалов в судостроении, а также ряд семинаров, проведенных на стенде Регистра и посвященных актуальным направлениям развития нормативных документов и услуг Регистра (практическое применение положений Полярного кодекса, новые дополнительные и словесные знаки характеристики в символе класса, комплексная оценка фактического технического состояния судна (САР), популяризация результатов научно-исследовательских работ).

Взаимодействие Регистра с научными организациями и пользователями нормативных документов также осуществляется в рамках заседаний секций Научно-технического совета, на которых рассматриваются все результаты научно-исследовательских работ и разрабатываются предложения по перспективным тематикам научных исследований. Специалисты, входящие в состав секций, привлекаются Регистром для обеспечения независимого рецензирования статей в журнале в соответствии с современными требованиями к качеству научных периодических изданий.

Одним из приоритетов развития журнала является обеспечение возможности ознакомления читателей с результатами прикладных научных исследований по широкому спектру направлений, связанных с проектированием и эксплуатацией морской техники, внедрению новых технологий и обеспечению безопасности человеческой жизни на море. Приглашаем заинтересованных авторов к публикации!

К.Г. Пальников
Генеральный директор
ФАУ «Российский морской регистр судоходства»

ОБРАЩЕНИЕ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ!

Представляя новый выпуск журнала «Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства», следует отметить ряд достигнутых в 2017 году результатов в области развития нашего научного журнала.

В 2017 году журнал включен в международную базу данных периодических изданий Ulrich's Periodicals Directory. База Ulrich's включает наиболее полные сведения о периодических изданиях всего мира, более 300 000 журналов по различным предметным рубрикам. Включение «Научно-технического сборника Российского морского регистра судоходства» в Ulrich's будет способствовать повышению информационной доступности журнала.

Следует отметить существующую тенденцию роста наукометрических показателей публикационной активности журнала. Пятилетний импакт-фактор по данным Российского индекса научного цитирования по сравнению с данными 2014 года вырос более чем в три раза. По данным рейтинга SCIENCE INDEX журнал занимает 28 (из 71) место по тематике «Транспорт» и 49 (из 106) по тематике «Машиностроение».

Для расширения читательской и авторской аудитории журнал был представлен на основных отраслевых мероприятиях с участием Регистра, а также распространяется в регионах деятельности филиалов Регистра – Астраханского, Архангельского и Дальневосточного – среди клиентов Регистра, проектных, научных и образовательных организаций. Для обеспечения оперативного взаимодействия авторов с редакцией журнала активно используется электронная форма подачи статей на официальном сайте Регистра. В 2017 году разработана и внедрена англоязычная версия данного раздела.

Независимое рецензирование поступающих статей осуществляется Редакционной коллегией журнала, в которую входят представители ГУМРФ им. адмирала С.О. Макарова, СПбГМТУ, СПбПУ, КГНЦ, ЦНИИ КМ «Прометей», доктора и кандидаты технических наук, а также специалисты Научно-технического совета Регистра. При рецензировании статей Редакционная коллегия следует требованиям Редакционной этики, доступным на официальном сайте Регистра и разработанным на основе оте-



чественных и международных требований к научным публикациям. Редколлегия журнала проводит регулярные заседания в Главном управлении Регистра.

Задачей Редакционной коллегии журнала является также разработка перспективных направлений развития издания. По результатам работы в 2017 году сформирован ряд направлений, среди которых следует отметить следующие: расширение состава Редакционной коллегии с последующим включением в состав зарубежных представителей; формирование тематических выпусков журнала; повышение наукометрических показателей публикационной активности и поддержание качественного независимого рецензирования статей.

Благодарю членов Редакционной коллегии, авторов статей и рецензентов за плодотворную и результативную работу в 2017 году и приглашаю к дальнейшему сотрудничеству!

М.С. Бойко
Главный редактор, к.т.н.



СОДЕРЖАНИЕ

Пальников К.Г. Обращение Генерального
директора РС 2

Бойко М.С. Обращение Главного редактора 3

ОБОЗРЕНИЕ 6

БЕЗОПАСНОСТЬ МОРЕПЛАВАНИЯ И ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

*Харченко Ю.А., Калашников П.К., Балагура С.В.,
Атаян Г.Э.* Безопасность плавучих технологических
платформ при работе в Арктической зоне с учетом
критерия «живучесть» 9

Вальдман Н.А., Жарких Н.В., Карев В.А. Оценка
риска морских операций. 17

ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ НА МОРСКОМ ТРАНСПОРТЕ

Сорокин П.С. Анализ хозяйственной активности
в акваториях с использованием данных систем
позиционирования морского транспорта
и космоснимков 32

Власов К.С., Аручиди Н.А. Анализ показателей
оперативного реагирования противопожарных
подразделений МЧС России на пожары объектов
морского и речного транспорта с использованием
методов теории графов. 37

ПРОЧНОСТЬ СУДОВ И ПЛАВУЧИХ СООРУЖЕНИЙ

Горетый О.А., Зимин С.С., Суков О.Э., Китаев М.В.
Расчеты прочности и обоснование способа ремонта
судна ограниченного района плавания с целью
обеспечения его безопасной эксплуатации 43

Алексахин Д.А., Бойко М.С., Кутейников М.А.
Применение метода «роя частиц»
для автоматизированного параметрического
проектирования поперечной танкерной рамы
согласно требованиям Общих правил МАКО 51

Памяти В.В. Козлякова – биографическая справка 58

МОРЕХОДНЫЕ КАЧЕСТВА СУДОВ

Чебан Е.Ю., Никущенко Д.В. Исследование влияния
некоторых особенностей формы корпусов
гליссирующих судов на их сопротивление
численными методами 59

K.G. Palnikov RS Director General Address

M.S. Boyko Editor-in-Chief Address

NEWSROOM

MARITIME SAFETY AND ENVIRONMENTAL PROTECTION

*Yu.A. Kharchenko, P.K. Kalashnikov, S.V. Balagura,
G.E. Atayan* FPSO safety during operation in the Arctic
zone considering endurance criterion

N.A. Valdman, N.V. Jarkikh, V.A. Karev Assessment
of marine operations risk

SEA TRANSPORT ECONOMICS AND MANAGEMENT

P.S. Sorokin Analysis of economic activity in water areas
using the data of sea transport tracking systems
and satellite images

K.S. Vlasov, N.A. Aruchidi Analysis of operational
response indicators of the RF EMERCOM fire depart-
ments on the fires occurring on the objects of marine
and river transport using graph theory method

STRENGTH OF SHIPS AND FLOATING FACILITIES

O.A. Goretyi, S.S. Zimin, O.E. Surov, M.V. Kitaev
Strength calculations and repair justification for a ship
of restricted navigation area to ensure its safe operation

D.A. Aleksashin, M.S. Boyko, M.A. Kuteynikov
Application of particle swarm optimization algorithm
for parametric design of oil tanker web frames according
to IACS Common Structural Rules

V.V. Kozlyakov: A memorial note

SEAWORTHINESS

E.Yu. Cheban, D.V. Nikuschenko Study of the effect
of a speed boat hull design on water resistance
by numerical methods

Борисов Р.В., Кутейников М.А., Лузянин А.А., Самойлов В.Р. Об определении нагрузки на судно от нерегулярного ветра при нормировании остойчивости судов 70

МАТЕРИАЛЫ И СВАРКА

Емельянов М.Д., Соминская Э.В. Применение композиционных материалов при ремонте корпусов морских судов 77

Киселева А.Е. Применение аддитивных технологий при решении конструкторских задач в судостроении. 84

МЕХАНИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ДВИЖИТЕЛИ

Кулешов И.И., Ходаковский В.М. Определение напряженно-деформированного состояния сопряжения «поршневое кольцо – поршневая канавка» головок поршней судовых малооборотных дизелей 89

Шурпяк В.К., Серов А.А. Оценка влияния основных судовых систем на показатели энергетической эффективности судна 95

ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ

Григорьев А.В., Васильев А.Ю., Малышев С.М. Особенности расчетов токов короткого замыкания в судовых электроэнергетических системах с распределением электроэнергии на постоянном токе 104

Варламкин А.А. Методы определения предела огнестойкости кабельных проходок при транзите кабельных линий и электропроводок в отсеках судов. 108

РАДИОНАВИГАЦИОННОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Кобец Н.М. Сглаживание траекторных данных криволинейного движения судна применительно к концепции удаленного навигационного контроля 112

КОНТЕЙНЕРНЫЕ ПЕРЕВОЗКИ

Диденко В.Ф., Щербяк А.Н., Зайцев А.Ю., Чикולהв А.Н. Оценка времени нагревания замороженной продукции в блоках при хранении в герметичном контейнере безмашинного холодообеспечения с использованием сухого льда 117

Правила предоставления статей 124

R.V. Borisov, M.A. Kuteynikov, A.A. Luzyanin, V.R. Samoylov About the determination of loading on a ship from the irregular wind during norming of ships stability

MATERIALS AND WELDING

M.D. Emelyanov, E.V. Sominskaya Application of composite materials in the repair of structures of sea-going ships

A.E. Kiseleva Application of additive technologies in solving shipbuilding design problems

MACHINERY INSTALLATIONS AND PROPULSION

I.I. Kuleshov, V.M. Khodakovskiy Determination of stress-strain state pairing "piston ring – piston groove" in piston crowns of marine low speed diesels

V.K. Shurpyak, A.A. Serov Evaluation of influence of main ship systems on the ship energy efficiency indices

ELECTRICAL EQUIPMENT

A.V. Grigoryev, A.Yu. Vasilyev, S.M. Malyshev Calculation features for short circuit currents in shipboard electric power systems with electrical power distribution on direct current

A.A. Varlamkin Methods for determining the fire resistance of cable penetrations in transit cable lines and electrical wiring in ship compartments

RADIO NAVIGATIONAL EQUIPMENT

N.M. Kobets Trajectory measurements smoothing for a ship curvilinear motion in regard to the navigation remote control concept

CONTAINER SHIPPING

V.F. Didenko, A.N. Scherbyak, A.Yu. Zaitsev, A.N. Chikulaev Evaluation of the heating time for frozen products in blocks during storage in a sealed container of machine-free cold supply using dry ice

ВНЕДРЕНИЕ НОВЫХ НАУЧНЫХ РАЗРАБОТОК В ПРАКТИКУ РЕГИСТРА

ИЗМЕНЕНИЯ В ПРАВИЛАХ РАЗРАБОТКИ И ПРОВЕДЕНИЯ МОРСКИХ ОПЕРАЦИЙ

Вступила в силу новая редакция Правил разработки и проведения морских операций. По результатам научно-исследовательской работы значительно переработана часть IV «Оценка безопасности», посвященная анализу рисков и разработке мероприятий по предупреждению возможных аварийных ситуаций и снижению их последствий при проведении морских операций.

В правилах идентифицированы типовые опасности и аварийные ситуации при проведении различных морских операций по обустройству морских нефтегазовых месторождений. Даны рекомендации по контролю и управлению рисками с подробным описанием методов аналитического, физического и статистического моделирования. Конкретизированы требования Регистра по качественной, количественной и экспертно-статистической оценке рисков проведения морских операций. Приведены матрица уровней риска и таблица их приемлемости.

В приложении содержатся примеры оценки риска морских операций, дополненные описанием мероприятий по снижению и устранению рисков. В качестве примеров выбраны: буксировка объекта на место установки; балластировка объекта, вывод из акватории завода, буксировка; буксировка опорного основания платформы.

Применение Правил разработки и проведения морских операций позволяет обеспечить соблюдение всех необходимых технических норм и стандартов безопасности при проектировании и выполнении морских операций по обустройству нефтегазовых месторождений на шельфе.

ВНЕДРЕНИЕ НОВОГО ЗНАКА GRS (GAS READY SHIP) В СИМВОЛ КЛАССА

Правила классификации и постройки морских судов дополнились требованиями к судам, подготовленным для переоборудования к использованию газового топлива на соответствие требований знака **GRS** (Gas Ready Ship).

Знак **GRS** может быть присвоен судам, отличным от газовозов, перевозящих сжиженный природный

газ с проработанными аспектами проектирования, необходимыми для подготовки судна для эксплуатации на газовом топливе. Целью проекта переоборудования судна, который должен быть разработан для присвоения судну знака **GRS**, должно быть уменьшение затрат при переоборудовании судна на газовое топливо, минимизация корпусных работ, максимальное сохранение существующих корпусных конструкций и существующего механического оборудования.

На момент присвоения дополнительного знака **GRS** судно должно использовать жидкое топливо с температурой вспышки более 60°C, при этом на судне должна быть выполнена подготовка к переоборудованию для использования газа в качестве топлива.

Минимальные требования к судам со знаком **GRS** в символе класса:

- проект переоборудования судна должен быть одобрен на соответствие судна после переоборудования требованиям Международного кодекса по безопасности для судов, использующих газы или иные виды топлива с низкой температурой вспышки (IGF Code) и Правил РС для судов со знаком **GFS** (Gas Fueled Ship). Проект должен включать одобрение технической документации емкости для хранения топлива;

- на судне должно быть предусмотрено место для установки емкости для хранения топлива. Если это закрытое помещение, то должен быть представлен проект систем, обеспечивающих взрывобезопасность (вентиляция, контроль загазованности и т.д.);

- емкости для хранения топлива должны быть учтены в расчетах остойчивости судна;

- должны быть выполнены необходимые расчеты подкреплений корпуса судна для установки емкостей для хранения топлива и оборудования для подготовки топлива;

- установленный на судне двигатель должен допускать конвертацию на газовое топливо. Двигатели, использующие газовое топливо, должны иметь типовое одобрение.

Помимо знака **GRS** предусматриваются дополнительные знаки, уточняющие готовность судна к переоборудованию для перехода на газовое топливо при условии выполнения дополнительных требований: **GRS-D**, **GRS-H**, **GRS-T**, **GRS-P**, **GRS-E**.

ВНЕДРЕНИЕ ТРЕБОВАНИЙ К РАСЧЕТНОМУ МОДЕЛИРОВАНИЮ ИСПЫТАНИЙ ВРАЩАЮЩИХСЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

По результатам выполненной научно-исследовательской работы внесены изменения в Правила технического наблюдения за постройкой судов и изготовление материалов и изделий для судов. В новом приложении к Правилам содержатся требования к расчетному моделированию механических испытаний вращающихся электрических машин (ВЭМ).

Рассмотрены следующие типы испытаний ВЭМ:

- на вибропрочность;
- на виброустойчивость;
- на ударопрочность;
- на удароустойчивость.

Приведено описание режимов испытаний и сочетания нагрузок, действующих на узлы и детали ВЭМ, приведены механические характеристики материалов деталей электрических машин, характеристики демпфирования.

Также учтены особенности расчетов при компьютерном моделировании механических испытаний ВЭМ. При выполнении расчетов должны использоваться программные комплексы, позволяющие путем компьютерного моделирования определять значения основных динамических характеристик ВЭМ с одновременным расчетом ускорений и перемещений произвольных точек любого элемента модели конструкции, коэффициентов динамичности нагрузок на

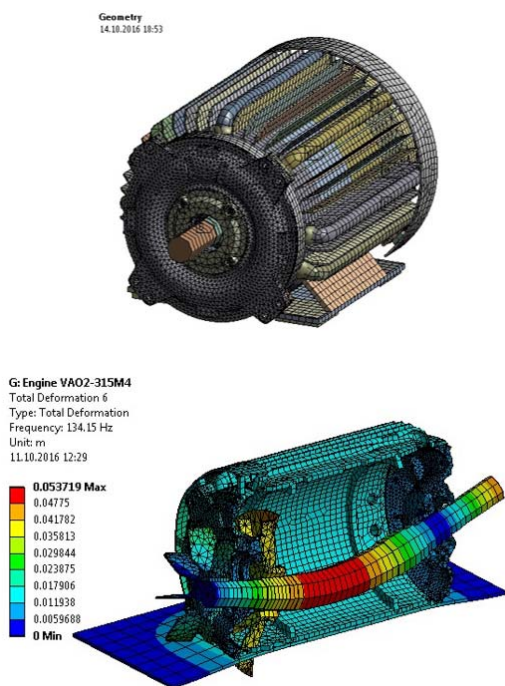


Рис. 1 Пример математической модели (МКЭ) ВЭМ

подшипники, коэффициентов безопасности (рис. 1). Описана методика расчета подшипников ВЭМ на вибропрочность и ударопрочность. Приведен перечень основных данных, необходимых для разработки и верификации компьютерной модели ВЭМ.

Новые требования позволят заменить расчетными данными натурные механические испытания крупногабаритных вращающихся электрических машин.

ВНЕДРЕНИЕ ТРЕБОВАНИЙ К СУДАМ, ЭКСПЛУАТАЦИЯ КОТОРЫХ ПРЕДУСМАТРИВАЕТ ПОСАДКУ НА ГРУНТ

Правила классификации и постройки морских судов дополнились новым разделом, содержащим требования к судам, которые эксплуатируются в режиме NAABSA (Not Always Afloat But Safely Around/не всегда на плаву, но безопасно на грунте) с частичным или полным обсушением корпуса в районах, приспособленных к посадке судов на грунт.

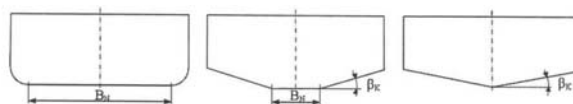


Рис. 2 Типовые формы поперечного сечения судов NAABSA: плоская, плоско-килеватая, килеватая

К основному символу класса судна может быть добавлен один из следующих знаков:

- **NAABSA1** – допускается частичное или полное обсушение подводной части корпуса на ровных однородно песчано-галечных или песчано-илистых грунтах при отсутствии поступательного движения в закрытых от волнения акваториях;

- **NAABSA2** – в дополнение к условиям, регламентируемым для знака **NAABSA1**, допускается наличие поступательного движения и ударного контакта носовой части днища с грунтом при ограниченных параметрах волнения и качки;

- **NAABSA3** – в дополнение к условиям, регламентируемым для знака **NAABSA2**, допускается обсушение в заданной точке на удалении от уреза воды в заякоренном состоянии в условиях качки, сопровождаемой ударными контактами с грунтом в любой точке днища.

В Правилах приведены требования к форме и конструкции корпуса судов **NAABSA** (рис. 2), описана методика определения расчетных нагрузок на конструктивные элементы, непосредственно воспринимающие действие грунта, и требуемых характеристик корпусных конструкций судна.

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ ГАРМОНИЗИРОВАННЫХ ОБЩИХ ПРАВИЛ МАКО

Гармонизированные Общие правила МАКО содержат требования к конструкции и прочности корпуса однокорпусных и двухкорпусных навалочных судов длиной равной и более 90 м и нефтеналивных двухкорпусных судов длиной равной и более 150 м. Правила вступили в силу в 2015 г. и полностью внедрены в нормативные документы Российского морского регистра судоходства.

В соответствии с Правилами требуемые размеры конструкций определяются на основании результатов двух типов расчета: «проектировочного» (prescriptive) и «проверочного» (design verification). При этом для выполнения «проверочного» расчета предусмотрено использование метода конечных элементов: линейный статический анализ конструкций по всей длине судна (трехотсечные модели средней части судна и носовой и кормовой оконечности). Российским морским регистром судоходства проводится разработка и внедрение программного обеспечения ATLAS для автоматизации рассмотрения проектов нефтеналивных и навалочных судов, подпадающих под действие Гармонизированных Общих правил МАКО.

Для выполнения «проверочных» расчетов разработан и внедрен в практику Регистра программный комплекс ATLAS 3D, который обеспечивает пре- и постпроцессинг процедуры расчета конструкций в соответствии с положениями Гармонизированных Общих правил МАКО (рис. 3).

Непосредственный расчет методом конечных элементов выполняются с помощью лицензионного программного комплекса MSC.Nastran.

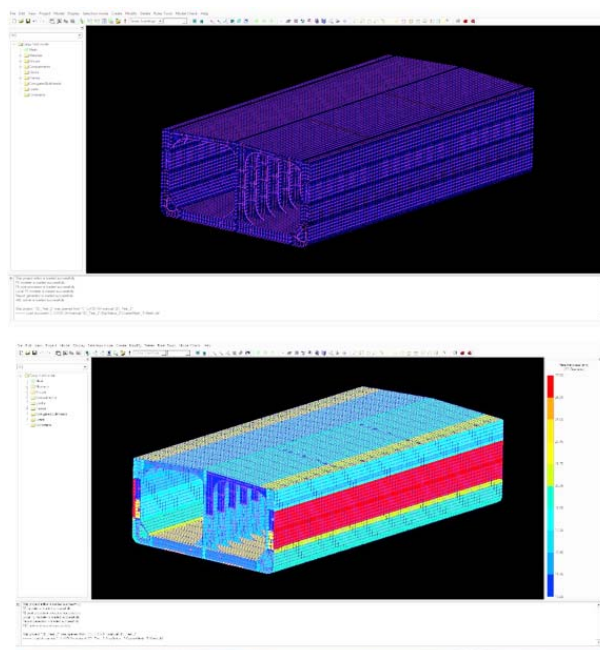


Рис. 3 Рабочие окна программного обеспечения ATLAS 3D

В связи с развитием требований Гармонизированных Общих правил, выходом в свет бюллетеней изменений и дополнений к Правилам, Регистр осуществляет постоянную разработку, тестирование и внедрение новых модулей программного обеспечения. Данная работа осуществляется как применительно к модулю ATLAS 3D, так и к модулю ATLAS 2D, внедренному в практику Регистра и предназначенному для выполнения «проектировочных» расчетов в соответствии с Правилами.



БЕЗОПАСНОСТЬ МОРЕПЛАВАНИЯ И ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

УДК 629.5.02+519.876

БЕЗОПАСНОСТЬ ПЛАВУЧИХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПЛАТФОРМ ПРИ РАБОТЕ В АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЕ С УЧЕТОМ КРИТЕРИЯ «ЖИВУЧЕСТЬ»

Ю.А. Харченко, д-р техн. наук, профессор, РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, Москва, e-mail: doc.2004.8@yandex.ru

П.К. Калашников, канд. техн. наук, доцент, РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, Москва, e-mail: kalashnikov_pk@bk.ru

С.В. Балагура, ФАУ «Российский морской регистр судоходства», Санкт-Петербург, тел. +7 (812) 380-19-54, e-mail: balagura.sv@rs-class.org

Г.Э. Атаян, ООО «Газпром Газобезопасность», Москва, e-mail: gregory.age@gmail.com

Плавающие технологические платформы (ПТП), работающие на Арктическом шельфе, должны обеспечивать максимально безопасные условия для работы персонала и возможность оперативного проведения аварийно-спасательных работ в случаях возникновения нештатных или аварийных ситуаций. В связи с экстремальными природно-климатическими условиями Арктики проектировщики морских платформ вынуждены закладывать в них способность компенсировать экстремальные нагрузки, возникающие в аварийных ситуациях и значительно превышающие проектные, и при этом продолжать находиться в работоспособном состоянии. Эта способность определяется понятием «живучесть». В статье рассмотрены все составляющие комплексного понятия «живучесть» и сформулированы принципы обеспечения живучести для плавучих нефтегазодобывающих комплексов судового типа (ПНК СТ), как одного из типов ПТП. Подробно рассмотрено устройство ПНК СТ, проанализированы существующие методы обеспечения безопасности на борту, рассмотрены меры предотвращения и предупреждения аварийных ситуаций, приведены примеры методов и технологий, используемых различными компаниями в северных морях. В результате проведенного анализа даны рекомендации по повышению живучести ПНК СТ, выделены основные аспекты, на которые стоит обратить внимание при проектировании плавучих нефтегазовых комплексов судового типа.

Ключевые слова: морская добыча, плавучая технологическая платформа, арктический шельф, безопасность, живучесть, аварии

FPSO SAFETY DURING OPERATION IN THE ARCTIC ZONE CONSIDERING ENDURANCE CRITERION

Yu.A. Kharchenko, DSc, professor, Gubkin Russian State University of Oil and Gas, Moscow, e-mail: doc.2004.8@yandex.ru

P.K. Kalashnikov, PhD, associate professor, Gubkin Russian State University of Oil and Gas, Moscow, e-mail: kalashnikov_pk@bk.ru

S.V. Balagura, FAI "Russian Maritime Register of Shipping", St. Petersburg, tel. +7 (812) 380-19-54, e-mail: balagura.sv@rs-class.org

G.E. Atayan, LLC "Gazprom Gazobezопасnost", Moscow, e-mail: gregory.age@gmail.com

Floating production/processing oil and gas facilities operating on the Arctic Ocean coastal shelf must ensure the safest possible working conditions for staff and the provide the possibility of conducting rescue operations in case of abnormal or emergency situations. Due to the extreme climatic conditions of the Arctic, floating facilities have to be provided with the ability to compensate for the extreme loads (considerably in excess of the design) occurring in emergency situations and to retain operability. This ability is defined as "endurance criterion". The article considers all the components of the complex concept of "endurance criterion", defines principles to ensure the survivability of marine floating oil and gas production/processing systems (such as a FPSO). The article describes in detail the design of such floating facilities, analyzing the existing methods of surviving on board, considers the emergency situations prevention methods, presenting examples of methods and techniques used by various companies in the Northern seas and, eventually, providing recommendations to improve the survivability of the floating production/processing oil and gas facilities, the main aspects that should be taken into account when designing FPSOs for Arctic operation.

Keywords: offshore production, FPSO, Arctic Ocean coastal shelf, safety, endurance criterion, accidents

Начало активного освоения углеводородных ресурсов шельфов замерзающих морей выявило ряд новых рисков, связанных с экстремальными природно-климатическими условиями в этих районах мирового океана, практическим отсутствием инфраструктуры и средств для проведения круглогодичных ремонтных и аварийно-спасательных работ, а также дополнительными угрозами от воздействия ледовых образований. В настоящее время в мировой практике освоения морских нефтегазовых месторождений широко применяются плавучие буровые и технологические платформы различных конструкций. Технологические операции, которые выполняются с их помощью, относятся к категории «взрывопожароопасных» и риски, связанные с эксплуатацией этих объектов на акваториях замерзающих морей необходимо классифицировать как критические. В связи с этим, требования к безопасности плавучих буровых и технологических платформ, которые необходимы для обустройства месторождений на акваториях замерзающих морей, должны быть ужесточены.

В настоящее время при эксплуатации буровых и технологических платформ в районах умеренного климата подразумевается, что для снижения тяжести последствий при возникновении аварийной ситуации возвращение объекта в рабочее состояние должно проводиться в разумно короткие сроки с помощью персонала, технических средств и судов обеспечения, которые имеются в распоряжении оператора. При этом эвакуация персонала платформы должна проводиться незамедлительно.

Между тем, как отмечено выше, особенности эксплуатации арктических и субарктических шельфовых месторождений накладывают существенные ограничения на эффективность проведения аварийно-спасательных и ремонтно-восстановительных работ, что приводит к снижению общего уровня безопасности объекта [1].

В связи с этим актуальной проблемой для объектов обустройства морского арктического месторождения становится оценка их способности компенсировать экстремальные воздействия, существ-

венно превосходящие проектные значения, и при этом продолжать выполнять свои производственные функции.

Такая способность объекта противостоять неблагоприятным воздействующим факторам различной природы, параметры которых значительно превосходят нормальные проектные значения, а при каких-либо повреждениях сохранять и восстанавливать в определенной степени свои функциональные способности, в технике получила название «живучесть» [2].

Понятие «живучесть» широко применяется для судов и определяется как их способность противостоять боевым и аварийным повреждениям, сохраняя и поддерживая при этом свои мореходные качества, обеспечивая безопасность экипажа и пассажиров, сохранность груза. Основными поражающими факторами выступают такие внешние воздействия, как: боевые повреждения, навигационные повреждения (посадка на мель или касание грунта или подводных препятствий, выброс судна на берег; столкновение с другим подвижным или неподвижным судном или с любым плавающим объектом, навал судна на причал, на другое ошвартованное судно, на средство навигационного оборудования и т.п.), ветровые и волновые воздействия и т.д.

Для нефтегазовых платформ различного назначения (буровые, добычные, технологические) понятие «живучести» может быть расширено, так как возникает ряд новых поражающих факторов, связанных со спецификой их деятельности: нефтяные и газовые фонтаны при бурении и эксплуатации скважин, взрывы и пожары в технологических комплексах при обработке добываемых углеводородов. Необходимость позиционирования платформ в одной точке в процессе выполнения технологических операций на акваториях замерзающих морей добавляет к поражающим факторам возможные воздействия ледовых образований различной природы.

Рассмотрим данное свойство применительно к плавучей технологической платформе (ПТП), как к наиболее технически сложному и уязвимому объекту морского добычного комплекса. Необходимо

отметить, к настоящему времени разработано несколько оригинальных конструкций платформ (TLP, SPAR, FPU, FPSO и др.), которые отличаются не только выполняемыми функциями, но и взаимной компоновкой основных жизнеобеспечивающих и технологических модулей, а, следовательно, и их взаимным влиянием. Как раз через понятие «живучесть» можно провести сравнение различных типов нефтегазовых платформ, и таким образом выделить наиболее предпочтительные для конкретного района мирового океана, включая его арктическую и субарктическую зоны.

Если составными элементами живучести судна является непотопляемость, взрыво- и пожаробезопасность, живучесть технических средств и защищенность экипажа, то состав элементов «живучести» ПТП и их свойств предлагается несколько расширить.

Обозначим три основных элемента «живучести» ПТП: сопротивляемость, адаптивность и восстанавливаемость (рис. 1).



Рис. 1 Декомпозиция свойств живучести ПТП

СОПРОТИВЛЯЕМОСТЬ ПТП

Сопротивляемость характеризует возможность ПТП не получать конструктивные повреждения в период противостояния неблагоприятным воздействиям различной природы, параметры которых превышают нормальные значения. Сопротивляемость ПТП определяется остойчивостью, устойчивостью и защищенностью ПТП.

Остойчивость – способность ПТП, выведенной из положения равновесия под действием внешних сил, вновь возвращаться в первоначальное положение после прекращения действия этих сил.

Устойчивость – свойство ПТП, характеризующее ее способность сохранять работоспо-

собное состояние во время действия на нее определенного внешнего воздействующего фактора (ВВФ) в пределах заданных значений.

Защищенность – свойство ПТП, характеризующее ее способность снижать параметры ВВФ, действующих на элементы и системы ПТП.

АДАПТИВНОСТЬ ПТП

Адаптивность характеризует способность ПТП при каких-либо повреждениях элементов и систем ПТП сохранять определенные функциональные возможности. Адаптивность определяется непотопляемостью, автономностью и реконфигурируемостью.

Непотопляемость – способность ПТП оставаться на плаву и не опрокидываться при повреждении ее корпуса и затоплении одного или нескольких отсеков.

Автомомность – свойство ПТП, характеризующее ее способность, для хотя бы частичного сохранения своих функциональных возможностей, отключения (отторжения) поврежденного элемента системы.

Реконфигурируемость – свойство ПТП, характеризующее ее способность обеспечивать реализацию определенных функциональных возможностей за счет структурных изменений систем ПТП.

ВОССТАНАВЛИВАЕМОСТЬ ПТП

Восстанавливаемость характеризует способность ПТП за счет расходования специальных ресурсов устранять в возможной степени повреждения элементов систем для временного восстановления, хотя бы частично, необходимых функций или для снижения параметров внешних воздействующих факторов на ПТП. Восстанавливаемость определяется самовосстанавливаемостью и аварийной восстанавливаемостью.

Самовосстанавливаемость – свойство ПТП, характеризующее способность ее элементов восстанавливать функциональные возможности после прекращения воздействия ВВФ без использования каких-либо посторонних по отношению к элементу дополнительных ресурсов.

Аварийная восстанавливаемость – свойство ПТП, характеризующее ее способность за счет специально выделенных ресурсов восстанавливать функциональные возможности своих элементов.

Проектирование ПТП должно осуществляться с учетом возможных в период эксплуатации

неблагоприятных внешних воздействий, включая экстремальные, природного и техногенного происхождения.

Параметры внешних воздействий служат исходными данными для принятия проектных решений при создании ПТП.

В соответствии с [3] явления, процессы или среда, внешние по отношению к изделию или его составным частям, которые вызывают или могут вызвать ограничение или потерю работоспособного состояния изделия в процессе эксплуатации, характеризуются ВВФ.

Следует отметить, что разделение живучести на указанные элементы справедливо для всех свойств, ее обеспечивающих, включая взрывопожарозащищенность, аварийную прочность и др. Это дает возможность формировать конструктивные решения применительно к перечисленным свойствам, обеспечивая их рациональное сочетание на основе рассмотрения живучести ПТП в целом.

Разделение живучести на элементы позволяет быть уверенным в том, что в процессе проектирования будут рассмотрены все ее обеспечивающие средства.

Для использования комплексного понятия живучести применительно к плавучим технологическим платформам различного типа необходимо сформулировать принципы обеспечения живучести ПТП, которые могут быть сведены к следующим основополагающим позициям:

- целью обеспечения живучести ПТП является сохранение минимально-допустимого уровня функциональных возможностей ПТП, обеспечивающих безопасность персонала и экипажа;
- в качестве исходных данных для оценки живучести ПТП должен рассматриваться полный перечень возможных неблагоприятных событий и внешних воздействующих факторов;
- анализ живучести ПТП должен базироваться на анализе выполняемых системами и комплексами ПТП функционально-самостоятельных операций и их функционально-логических схем;
- при рассмотрении вопросов оценки живучести ПТП необходимо различать три вида: расчетная оценка живучести ПТП (на этапе разработки проекта, в том числе с использованием аппарата имитационного моделирования), экспертная оценка живучести ПТП (на этапах проектирования, строительства и эксплуатации) и оперативная оценка живучести ПТП в процессе эксплуатации, в том числе при авариях ПТП.

Одним из наиболее распространенных типов ПТП являются плавучие нефтегазодобывающие комплексы судового типа – ПНК СТ (по международной классификации – FPSO) [4]. ПНК СТ обладают наиболее адаптирующейся конструкцией,

обеспечивающей возможность ее конверсии и переоборудования под требования конкретного заказчика. По данным Wood Group Mustang, более 70 % активного флота ПНК СТ были перестроены из крупнотоннажных нефтеналивных судов (нефтяных танкеров). При этом следует понимать, что в настоящее время полная конверсия ПНК СТ может быть проведена меньше чем за два года, что значительно быстрее по сравнению с другими типами ПТП, которые являются объектами нового строительства.

Особенности формы и размеры корпуса обеспечивают большой запас времени на ведение борьбы за живучесть, позволяют применять различные методы борьбы с авариями, часть из которых на других типах платформ может быть неприемлема.

Так как ПНК СТ часто являются переоборудованными танкерами [5], то им присущи не только все преимущества, но и недостатки корпусов судового типа, которые усугубляются повышенной нагрузкой на главную палубе от оборудования верхнего строения (включая воздействие осадков и вес обледенения), неравномерной загрузкой грузовых танков, сильно разветвленной системой трубопроводов и пр. [6].

Снижение весовой нагрузки, связанной с обледенением конструкций блока верхних строений, возможна путем "winterization", которая обеспечивает защиту как самого конструктива ПНК СТ, так и команды судна.

Достаточно важным с точки зрения обеспечения остойчивости представляется контроль загрузки грузовых танков. Изменение их загрузки происходит постоянно, регулярно осуществляется балластировка, а в период отгрузки продукции загрузка танков и балластных цистерн существенно меняется. Поэтому даже незначительный для танкера инцидент для ПНК СТ может иметь серьезные последствия. Так простой отказ электроэнергетической системы на бразильском FPSO «Р-34» в октябре 2002 года привел к критическому крену 35° из-за нарушения работы клапана системы управления балластом (рис. 2). С FPSO было эвакуировано 76 человек персонала. Гибели FPSO удалось избежать благодаря благоприятным погодным условиям и подаче через 4 дня электропитания от судна обеспечения по аварийной схеме.

Не стоит забывать и про то, что в арктических условиях могут возникать ледовые повреждения ПНК СТ, влияющие на его остойчивость, что приводит к необходимости учета при проектировании специфических требований, заложенных в [7].

Следует отметить, что у ПНК СТ экстремальная для судов величина удельной горючей нагрузки, что требует выбора адекватного типа, состава, производительности и конструкции систем пожаротушения.



Рис. 2 FPSO P-34 во время аварии

Согласно статистическим данным по аварийности на морских установках и платформах среди наиболее опасных аварий были выделены разливы и утечки углеводородов, которые, наряду с негативными последствиями для окружающей среды, способны стать причиной возникновения пожаров и взрывов различной силы. Для их предотвращения, локализации и ликвидации последствий обязательно должна быть система пожарной безопасности, включающая: систему и оборудование для пожаротушения, систему конструктивной противопожарной защиты, системы пожарной сигнализации и аварийных отключений, а также средства тушения пожара [8].

В случае если реакция противопожарной системы на взрыв и возгорание не превышает 2 – 3 с, пожар удастся локализовать с минимальным ущербом. При этом большую роль играет наличие огне- и теплозащиты оборудования, трубопроводов, кабелей и т.д. В этом случае, даже после значительного по объемам возгорания, основное оборудование сохранит свою работоспособность. Таким образом, наличие дополнительной покровной огне- и теплозащиты необходимо не только для обеспечения температурного режима оборудования и защиты персонала, но и для минимизации повреждений и, как следствие, снижения длительности восстановительных работ.

Если подобная защита отсутствует, то это может привести, например, к пульсациям давления в трубопроводе, вплоть до его разрушения. Так на FPSO «Maersk Ngujima-Yin» во время пожара в модуле технологического комплекса из-за теплового воздействия в трубопроводах водопожарной системы наблюдались сильные пульсации давления и гидравлические удары, из-за чего остановились пожарные насосы с дизельным приводом [9]. Из-за пульсаций давления в напорном трубопроводе со сбоями работала система водяного орошения, а система пожаротушения мелкодисперсной водой не срабо-

тала из-за отказа клапана-регулятора давления азота после воздействия на него высокой температуры.

В конструкциях современных ПНК СТ специальной постройки уже учтены многие особенности их эксплуатации, в максимальной степени внедряются технические решения, апробированные в судостроении и выработанные по результатам анализа инцидентов на ПНК СТ, находящихся в эксплуатации. Деление ПНК СТ на противоаварийные зоны осуществляется с учетом удельной горючей нагрузки и конструкции корпуса. Применяются огне- и теплозащитные покрытия переборок, палуб, подволоков на границах противоаварийных зон, огнестойкие кабели [10]. Трассировка кабелей электрического питания и цепей управления выполняется с учетом их резервирования по разным противоаварийным зонам.

Часть требований, обеспечивающих подобные проектные решения, заложены в [11] с учетом рекомендаций Кодекса ИМО по конструкции и оборудованию ПБУ (Резолюция А.1023(26)), международного опыта создания и эксплуатации ПНК, требований правил классификационных обществ и международных стандартов.

Все FPSO, эксплуатирующиеся в Северном, Норвежском морях, в северной части Атлантического океана, имеют избыточной высоты надводный борт, единую электроэнергетическую систему, распределенную резервированную схему управления и электропитания ответственных потребителей.

Наличие в танках ПНК СТ недостаточно очищенной от примесей продукции обуславливает высокую коррозионную нагрузку на материал корпуса, в связи с чем набор корпуса выполняется с повышенными надбавками на коррозию. Грузовые танки выполняются с плоскими стенками, с большими углами закругления.

На ПНК СТ Норвегии и Великобритании широко применяется зональный принцип размещения функциональных блоков с разделением их по степени взрывоопасности, как в горизонтальной плоскости вдоль верхней палубы, так и в поперечном к основной плоскости направлении (рис. 3) [12]. При этом четко разграничиваются четыре области:

- жилая зона;
- зона турели;
- зона производства;
- палуба кормовой оконечности с отгрузочным устройством и факельной системой.

Особое внимание уделяется защите грузовых танков, со стороны технологического комплекса они защищены взрыво- и огнестойкой непрерывной палубой верхнего строения и взрыво- и огнестойкой главной палубой. Главная палуба оснащена системами орошения и подачи высокодисперсной пены.



Рис. 3 Схема установки взрыво- и противопожарных барьеров верхних строений ПНК СТ

Вертикальные взрыво- и огнезащитные щиты рассчитаны на отражение и рассеивание ударной волны взрыва в сторону борта и отражение теплового излучения открытого пламени. Щиты оснащаются системой водяного орошения.

Все ПНК СТ оснащены эвакуационными туннелями из зоны производства во временное убежище [10]. Убежище располагается на одном уровне с диспетчерской и непрерывной палубой технологического комплекса. Во временном убежище устанавливаются все необходимые устройства и средства жизнеобеспечения, включая автономную систему водяного орошения, систему отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха, «забирающую» атмосферный воздух из безопасной зоны и поддерживающую температуру воздуха на приемлемом для жизнеобеспечения уровне, а также дублирующие средства управления системами пожаротушения.

Убежище в большинстве случаев располагается рядом с жилым модулем, который в свою очередь может быть размещен либо в носовой, либо в кормовой части судна [13]. Преимуществом размещения этого модуля в носовой части является то, что в этом случае он находится с наветренной стороны (системы динамического позиционирования и особенности конструкций турелей современных ПНК СТ позволяют направлять нос судна по ветру), так что в случае аварии газы или пламя из технологических модулей в меньшей степени будут переноситься в сторону жилого модуля. К недостаткам можно отнести более сложные пути эвакуации, близость к некоторым технологическим модулям, повышенную качку.

В современных ПНК СТ большее распространение получили компоновки с жилым модулем в кормовой части судна. Причем при проектировании блока верхних строений между жилым модулем и

модулями подготовки углеводородов стремятся разместить модули меньшей значимости.

Все ПНК СТ оснащаются вертолетными площадками с избыточной площадью, что обусловлено необходимостью посадки и взлета вертолета, в том числе в сложных погодных условиях, например, при эвакуации персонала.

Наличие на ПНК СТ системы отгрузки продукции предъявляет особые требования к надежности их систем динамического позиционирования, конструкции кормовой оконечности и к ее обводам, расположению в корме критического оборудования. Кормовая оконечность должна быть максимально защищена от возможного навала челночных танкеров. Невыполнение этих требований может привести к тяжелым последствиям.

Отгрузочные устройства должны быть оснащены шлангом как можно большей длины. Система хранения шланга на катушке ограничивает его длину 140 – 150 метрами, что накладывает значительные ограничения на грузовые операции по погодным условиям, указанной длины шланга недостаточно для соблюдения безопасной дистанции между танкером и ПНК СТ во время отгрузки при волнении моря около 4 баллов.

Безопасная дистанция определяется параметрами движения ПНК СТ и танкера, динамическими характеристиками их движительно-рулевого комплекса. Так, например, винторулевая колонка типа «Азипод», применяемая в качестве движителя на арктических челночных танкерах, может осуществить реверс за время около 60 с. Таким образом, при реверсе со скорости хода 1,5 узла, из-за инерции системы динамического позиционирования, отработки команд управления движительным комплексом и инерции движения, танкер водоизмещением 100 000 т до остановки пройдет дистанцию не менее 200 м.

Еще одной важной составной частью обеспечения живучести ПНК СТ является оперативное отключение турели для ухода судна с точки добычи. Как известно, при обустройстве мелководных месторождений, турель обычно вынесена за корпус судна, тогда как в случае реализации глубоководных проектов чаще применяются турели, встроенные в корпус [15]. В обоих исполнениях лучшей живучестью обладают те суда, в которых реализуется быстрая отстыковка плавучего промысла от системы райзеров. В частности, одной из технологических новинок компании Shell стало FPSO Turritella, на которой применен самый большой в мире отключаемый турельный буй – для обеспечения безопасности работ даже в условиях прохождения ураганов [14].

Наличие множества противоаварийных систем с большой потребляемой мощностью требует наличия

на ПНК СТ аварийных источников электроэнергии значительной мощности. При концентрации мощности аварийных источников энергии в одном агрегате часто средства борьбы с авариями становятся неработоспособными. Необходимо распределение мощности аварийных источников энергии по противоаварийным зонам, широкое применение агрегатов бесперебойного электропитания с аккумуляторной поддержкой большой мощности и с длительными токами разряда.

Несмотря на перечисленные выше мероприятия по повышению уровня живучести, в настоящее время конструкции всех ПНК СТ, в том числе и специальной постройки, не предусматривают ведение длительной борьбы персонала и экипажа за живучесть. Например, температура горения при углеводородном пожаре нарушает конструкционную прочность металла несущих конструкций технологического комплекса за 30 – 40 минут, однако сведений по их огневой и тепловой защите на действующих ПНК СТ обнаружено не было.

Также нет информации о применении на FPSO систем информационной поддержки экипажа при борьбе за живучесть.

Основные конструктивные и организационно-технические мероприятия, действующие в настоящее время, направлены на возможность быстрой локализации аварии, а если это не удалось за короткое время, то на обеспечение безопасного укрытия персонала и экипажа в убежище и осуществления его спасания.

Тактика отказа от борьбы за живучесть платформы имеет целесообразность, когда ПНК СТ построено на базе уже находившегося в эксплуатации и окупившего затраты на его постройку танкера. Стоимость такого ПНК СТ, как правило, не превышает \$ 800 млн.

В случае с плавучими технологическими платформами для условий арктического шельфа, ситуация существенно меняется. Стоимость платформы в ледостойком исполнении может превысить \$ 5 млрд, а ее удаленность от берега (до 600 км) и сложные природно-климатические условия могут исключить надежное применение вертолетов для эвакуации персонала и экипажа.

Конструкция ПНК СТ и применяемые на нем организационные технические мероприятия должны быть направлены не только на достижение минимальной вероятности возникновения аварии или инцидентов, но и обеспечивать полноценную борьбу за живучесть ПНК СТ персоналом и экипажем даже в автономном режиме, а при угрозе гибели платформы – безопасную эвакуацию персонала и покидание ПНК СТ экипажем.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время в нормативно-технических документах по проектированию плавучих технологических платформ отсутствуют специфические требования по обеспечению их живучести. Как следствие, отсутствуют критерии и методики оценки их живучести, учитывающие особенности функционирования ПТП. Вместе с тем, как для ПНК СТ, так и для других типов плавучих технологических платформ, задача обеспечения живучести на этапах проектирования, строительства и эксплуатации является весьма актуальной, поскольку любое аварийное прекращение добычи углеводородов даже на незначительное время приводит к существенным убыткам и влияет на срок окупаемости проекта освоения месторождения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Добряков С.И. Выбор технологии и технических средств для разведочного и эксплуатационного бурения на шельфе Карского моря. Известия высших учебных заведений. Нефть и газ, 2011, №1, с. 16-22.
2. Харченко Ю.А., Тер-Саркисов Р.М., Калашников П.К. Критерий «живучесть» для технологических платформ на месторождениях арктического шельфа. Территория Нефтегаз, 2016, №12, с. 82–86.
3. ГОСТ 26883-86: Внешние воздействующие факторы. Термины и определения. Москва, СТАНДАРТИНФОРМ, 2008.
4. Харченко Ю.А., Калашников П.К. Живучесть плавучих нефтегазовых комплексов судового типа, предназначенных для работы в Арктической зоне. Территория Нефтегаз, 2017, №3, с. 74-78.
5. Boschee Pam. Tanker Conversions to FPSO: Design and Integrity Management Challenges. Oil and Gas Facilities, 2013, vol. 2, issue 5, pp. 16-21.
6. НИР «База СПГ»: Разработка производственных технологий и организационно-технологических проектов для строительства судов типа FPSO. ОАО «ЦТСС». Режим доступа: http://rgmt.spb.ru/catalog/upload/files/Baza_SPG.pdf (дата обращения: 10.05.2017)
7. Руководство по операциям с судами в арктических покрытых льдом водах. ИМО, 2009.
8. Вальдман Н.А., Яковлев Д.М. Анализ современных проектных решений по обеспечению безопасной эксплуатации плавучей добывающей установки для хранения и отгрузки углеводородов (FPSO). Морской вестник, 2011, №1, с. 80-83.
9. Davison, Ian. Maersk Ngujima-Yin. FPSO, Down Man Of Non-Essential Personnel Due To Loss Of Emergency Power. Maersk FPSO's, 2008. Режим доступа: http://www.drillsafe.org.au/12-08_pres/DrillSafe_Forum_Dec08_MAERSK_Ian_Davidson_FPSO_Power_Interruption.pdf (дата обращения: 10.05.2017).
10. Наставление по борьбе за живучесть судов Минречфлота РФ (НБЖС РФ-86). РосКонсульт, 2004.
11. Правила классификации, постройки и оборудования морских плавучих нефтегазовых комплексов. Санкт-Петербург, Российский морской регистр судоходства, 2011.
12. Clark, Judy. Canada's Terra Nova Field To Get Ice-Resistant FPSO This Fall. Oil and Gas Journal, 2001. Режим доступа: <http://www.ogj.com/articles/2001/05/canadas-terra-nova-field-to-get-ice-resistant-fps0-this-fall.html> (дата обращения: 10.05.2017).

13. Zhiyong Su, Yong Luo, Xiaoliang Qi, Yi Xie. FPSOS for Deepwater Applications. Offshore Technology Conference, Kuala Lumpur, Malaysia, 2014.
14. Нефть и газ шельфа: технологии глубины. Западные технологии. Аналитическая служба «Нефтегазовой Вертикали». Режим доступа: http://www.ngv.ru/pdf_files/20635.pdf (дата обращения: 10.05.2017).
15. Харченко Ю.А., Тер-Саркисов Р.М., Бартенев В.Н. Турельные системы удержания нефтегазодобывающих платформ судового типа для замерзающих морских акваторий. – Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства, 2016, № 44/45, стр. 102 – 110.

REFERENCES

1. Dobryakov S.I. Vybor tekhnologii i tekhnicheskikh sredstv dlya razvedochnogo i ekspluatatsionnogo bureniya na shel'fe Karskogo morya [Choice of technology and technological facilities for exploration and development drilling on shelf of Kara sea]. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Neft' i gaz [Higher Educational Institutions News. Oil and Gas]. 2011, №1, pp. 16-22.
2. Kalashnikov P.K., Kharchenko Yu.A. Kriteriy «zhivuchest'» dlya tekhnologicheskikh platform na mestorozhdeniyakh arkticheskogo shel'fa [The Criterion «Persistence» For Technology Platforms On The Arctic Shelf Fields]. Territoriya Neftegaz [Oil and gas territory]. 2016, №12, pp. 82–86.
3. GOST 26883-86: Vneshnie vozdeystviyushchie faktory. Terminy i opredeleniya [State Standard 26883-86: External effecting factors. Terms and definitions]. Moscow, Standartinform Publ., 2008.
4. Kalashnikov P.K., Kharchenko Yu.A. Zhivuchest' plavuchikh neftegazovykh kompleksov sudovogo tipa, prednaznachennykh dlya raboty v Arkticheskoy zone [The Persistence of Floating Oil and Gas Marine Systems, Designed for Operation in The Arctic Zone]. Territoriya Neftegaz [Oil and gas territory]. 2017, №3, pp. 74-78.
5. Boschee Pam. Tanker Conversions to FPSO: Design and Integrity Management Challenges. Oil and Gas Facilities. 2013, vol. 2, issue 5, pp. 16-21.
6. NIR «Baza SPG»: Razrabotka proizvodstvennykh tekhnologiy i organizatsionno-tekhnologicheskikh proektov dlya stroitel'stva sudov tipa FPSO. OAO «TsTSS». Available at: http://rgmt.spb.ru/catalog/upload/files/Baza_SPG.pdf (accessed 10.05.2017)
7. Guidelines for ships operating in Arctic polar waters. IMO, 2009.
8. Waldman N.A., Yakovlev D.M. Analiz sovremennykh proektnykh resheniy po obespecheniyu bezopasnoy ekspluatatsii plavuchey dobyvayushchey ustanovki dlya khraneniya i otgruzki uglevodorodov (FPSO) [Analysis of modern design solutions ensuring safe operation of Floating Production, Storage and Offloading System (FPSO)]. Morskoy vestnik [Marine Bulletin]. 2011, №1, pp. 80-83.
9. Davison, Ian. Maersk Ngujima-Yin. FPSO, Down Man of Non-Essential Personnel Due To Loss Of Emergency Power. Maersk FPSO's, 2008. Available at: http://www.drillsafe.org.au/1208_pres/DrillSafe_Forum_Dec08_MAERSK_Ian_Davidson_FPSO_Power_Interruption.pdf (accessed 10.05.2017).
10. Nastavlenie po bor'be za zhivuchest' sudov Minrechflota RF (NBZhS RF-86) [Guidance on persistence saving for Minrechflot RF vessels (NBZhS RF-86)]. RosKonsul't Publ., 2004.
11. Rules for the Classification, Construction and Equipment of Mobile Offshore Drilling Units and Fixed Offshore Platforms. St. Petersburg, Russian Maritime Register of Shipping, 2011. (In Russian)
12. Clark, Judy. Canada's Terra Nova Field To Get Ice-Resistant FPSO This Fall. Oil and Gas Journal, 2001. Available at: <http://www.ogj.com/articles/2001/05/canadas-terra-nova-field-to-get-ice-resistant-fpso-this-fall.html> (accessed 10.05.2017).
13. Zhiyong Su, Yong Luo, Xiaoliang Qi, Yi Xie. FPSOS for Deepwater Applications. Offshore Technology Conference, Kuala Lumpur, Malaysia, 2014.
14. Нефть и газ шельфа: технологии глубины. Западные технологии. Аналитическая служба «Нефтегазовой Вертикали». Available at: http://www.ngv.ru/pdf_files/20635.pdf (accessed 10.05.2017).
15. Kharchenko Yu.A., Ter-Sarkisov R.M., Bartenev V.N. Turret mooring systems of ship-shaped floating oil and gas production units for freezing offshore sea areas. Nauchno-tekhnicheskiy sbornik Rossiyskogo morskogo registra sudokhodstva [Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping]. 2016, № 44/45, pp. 102 – 110. (In Russian)

УДК 622.276

ОЦЕНКА РИСКА МОРСКИХ ОПЕРАЦИЙ

Н.А. Вальдман, канд. техн. наук, ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, e-mail: krylov@krylov.spb.ru

Н.В. Жарких, ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, e-mail: krylov@krylov.spb.ru

В.А. Карев, ФАУ «Российский морской регистр судоходства», Санкт-Петербург

Рассмотрены методические подходы к анализу риска морских операций на шельфе. Применяемая при анализе методология оценки риска должна учитывать уникальность, специфику условий и накопленный опыт проведения морских операций в шельфовых морях. Описаны способы оценки индивидуального, группового и социального рисков, а также определены коэффициенты достаточной безопасности и другие показатели риска, предоставляющие проектанту эффективный методический инструмент для управления рисками при проектировании и проведении морских операций. Разработан классификатор аварийных ситуаций, рассмотрены типовые сценарии аварийных ситуаций и методы количественной оценки риска, даны рекомендации по их эффективному применению. Представлены примеры анализа риска для основных типов морских операций с оценкой риска вероятных сценариев аварийных ситуаций. Предложены подходы к снижению риска при проведении морских операций.

Ключевые слова: оценка риска, критерии достаточности безопасности, морские операции, факторы риска, индивидуальный и социальный риск, кривые F/N

ASSESSMENT OF MARINE OPERATIONS RISK

N.A. Valdman, PhD, Krylov State Research Centre, St. Petersburg, e-mail: krylov@krylov.spb.ru

N.V. Jarkikh, Krylov State Research Centre, St. Petersburg, e-mail: krylov@krylov.spb.ru

V.A. Karev, FAI "Russian Maritime Register of Shipping", St. Petersburg

Methodological approaches to risk analysis for offshore marine operations are considered. It is underlined that the risk assessment methodology should take into account unique and specific nature of marine operations in shelf seas as well as – previous experience in this field. The ways of assessing individual, group and social risks are described. Factors of reasonably achievable safety (ALARA) and other risk indicators are defined to provide an efficient tool of risk management in the design process as well as performance of marine operations. Classification of emergency situations is developed, and typical accident scenarios as well as quantitative risk assessment methods are discussed, and recommendations are given on the most efficient application of these tools. Risk analysis case studies for the main types of marine operations are presented with the assessment of probable accident scenarios, together with the suggestion of approaches for risk mitigation during marine operations.

Keywords: risk assessment, safety sufficiency criteria, marine operations, risk factors, individual and social risks, F/N curves

Разработка методических подходов к оценке безопасности МО, моделированию развития поражающих факторов при инцидентах и аварийных ситуациях при выполнении морских работ и проведении морских операций на континентальном шельфе, оценке результатов анализа риска с учетом накопленного практического опыта работ на шельфе является актуальной задачей.

Российским морским регистром судоходства (РС) в настоящее время проводится работа по актуализации Правил разработки и проведения морских операций (МО). В 2016 году выполнена НИР по разработке новой редакции части IV «Оценка безопасности» Правил, в которой сформулированы требования к оценке безопасности и риска морских операций и рассмотрено применение методов

количественной оценки риска при подготовке проектов МО.

В рамках выполненной НИР идентифицированы типовые опасности и аварийные ситуации при проведении различных МО, разработан алгоритм оценки безопасности (риска) при проведении морских операций с использованием критериев достаточности безопасности (КДБ), уточнена используемая терминология и определения, даны рекомендации по применению методов количественной оценки рисков, по оформлению результатов оценок рисков, построению матрицы уровней риска, реестра рисков, разработан классификатор аварийных ситуаций.

В ходе выполнения данной НИР определены основные опасности и аварийные ситуации (табл. 1) для следующих типов МО:

- погрузочно-разгрузочные операции;
- подъем объектов в море (спуск объекта на воду в заводской акватории, установка объекта на точке эксплуатации);
- буксировочные операции (подход, подача, буксировка во льдах и на чистой воде);
- установка якорных линий (растяжек);
- забивка свай;
- швартовные операции (подход/отход судна к другому судну, к причалу, к буям);
- проходы объектом узкостей (проливов, фарватеров, каналов, мостов);

- спуск объектов на воду (спуск в сухом доке, понтоны, боковой спуск и т.д.);
- установка объектов на точке эксплуатации (установка плавучих объектов, установка стационарных объектов);
- операции по завершению эксплуатации (демонтаж якорной системы позиционирования объекта, размыв грунта вокруг опорного основания, обрезка свай, демонтаж части твердого балласта, демонтаж (при необходимости) верхнего строения (целиком или по модулям);
- стыковка объектов или их частей на плаву.

Таблица 1

Типовые опасности и аварийные ситуации (АС) при МО

Наименование	Типовые опасности и/или аварийные ситуации
Погрузочно-разгрузочные операции Подъем объектов в море	Превышение массы груза Неисправность механизмов, грузозахватных приспособлений, тросов (стропов) Неправильная строповка и перемещение груза Опасное раскачивание груза при подъеме Неустойчивое положение штабелей при складывании Падение или скольжение груза по палубе Косое натяжение подъемного троса при подъеме (перемещении) груза Превышение допустимого вылета стрелы крана
(спуск объекта на воду в заводской акватории, установка объекта на точке эксплуатации)	Ухудшение погодных условий: - усиление скорости ветра - усиление волнения - ухудшение видимости (туман, осадки) - неблагоприятные ледовые условия Навал на сооружение дока Отказ балластной системы Чрезмерный удар о донный грунт Рывки (обрыв) троса при подъеме/спуске
Буксировочные операции (подход, подача, буксировка во льдах и на чистой воде)	Ухудшение предельных погодных условий Посадка буксируемого объекта на мель Обрыв буксирного троса, отказ буксирной лебедки Выход из строя главных двигателей буксира Столкновение буксира или другого судна с буксируемым объектом Повреждение корпуса и нарушение водонепроницаемости объекта или буксира Затопление отсека(ов) Нарушение связи между обеспечивающими судами и (или) объектом
Установка якорных линий (растяжек)	Неправильное положение якоря на грунте при погружении (постановке) или срыв якоря из-за слабого грунта Обрыв ЯШЛ/буксирного троса при заглублении/обтягивании (натяжении якорной линии до необходимых усилий для удержания объекта на заданном месте) якоря Обрыв якорной цепи (троса) Обрыв чазерной линии Обрыв маркерного буйа или буйа на подрывном тросе
Забивка/установка (последовательность работ, обеспечивающая объекту достаточную устойчивость во всех фазах установки) и раскрепление свай	Отказ сваебойного оборудования Столкновения/навалы (обеспечивающих судов с устанавливаемым объектом) Невозможность забивки свай на проектную глубину Не выполнен гидроразжим (метод гидролок) Вытекание цементного раствора в окружающую среду при цементировании свай
Швартовные операции (подход/отход судна к другому судну, к причалу, к буям)	Обрыв швартова Неисправность швартовного устройства
Проходы объектом узкостей (проливов, фарватеров, каналов, мостов)	Выход из строя ЭУ буксировщика Навал на кромку канала, посадка на мель (грунт) Навал на ограждающую обстановку (буй, бакен и др.) фарватера Столкновение с другими судами (объектами) на фарватере Обрыв буксирной линии Превышение допустимой скорости хода Нарушение правил движения по рекомендованным сторонам (путям) судового хода в узкостях Навал на опоры моста

Продолжение табл. 1

Наименование	Типовые опасности и/или аварийные ситуации
Спуск объектов на воду (спуск в сухом доке, понтоны, боковой спуск с построечного места и т.д.)	Навал на сооружения дока. Повреждение корпуса и нарушение водонепроницаемости объекта. Затопление отсека(ов). Выход из строя гидравлической (судовозной) тележки (-ек) (домкратов, роликов).
Установка объектов на точке эксплуатации (установка плавучих объектов, установка стационарных объектов)	Неконтролируемое наклонение корпуса объекта при погружении Размыв грунта под объектом под воздействием донных течений Сдвиг сооружения. Опрокидывание объекта Потеря устойчивости на грунте Разрыв одной или нескольких якорных цепей или швартовых связей Столкновение с судами или плавающим объектом Столкновение с айсбергом или со стамухой при работах в арктических условиях Падение или разрушение конструкции внутри объекта Падение вертолета или летающего объекта (предмета) на сооружение Превышение допустимых гидрометеорологических условий при операции Аварийное заполнение отсека (отсеков) водой
Операции по завершению эксплуатации (демонтаж якорной системы позиционирования объекта, размыв грунта вокруг опорного основания, обрезка свай, демонтаж части твердого балласта, демонтаж (при необходимости) верхнего строения (целиком или по модулям))	Неконтролируемое всплытие гравитационного сооружения. Повреждение корпуса и нарушение водонепроницаемости объекта. Затопление отсека(ов)
Стыковка объектов или их частей на плаву	Разрыв швартова от ветровых, волновых перегрузок Затопление технологических понтонов из-за нарушения герметичности (протечки, поступление воды в отсеки) Нагрузка от падающих предметов Столкновение верхнего строения с опорным основанием Заклинивание стыкуемых конструкций в направляющих Застревание корпуса верхнего строения (стыкуемой конструкции) на полпути подъема или спуска Повреждение конструктивных элементов понтонов, направляющих колонн, раскосов и т.д. Неконтролируемые наклонения корпуса опорного основания или верхнего строения

Оценка риска МО с участием морских объектов, судов и плавсредств включает анализ причин возникновения АС и условий развития аварий, определение степени нанесения вреда окружающей природной среде, персоналу, экипажам судов, а также материального ущерба эксплуатирующей компании-оператора.

Морские операции уникальны (рис. 1). Неопределенность, связанная с возможностью возникновения в ходе реализации проекта МО неблагоприятных ситуаций и последствий, характеризуемая понятием риска, вызвана неполнотой информации об условиях реализации проекта и связанных с ними затратами.

Учет факторов риска, законы распределения которых не всегда известны, базируется на формировании критериев, с помощью которых принимаются решения при обосновании и выборе наилучших вариантов проведения МО. Критерии принятия решений определяют правила, по которым выбирается приемлемый или оптимальный вариант решения.

Для рационального управления рисками МО необходимы точные количественные, либо объективные и взвешенные качественные критерии достаточности безопасности (КДБ).

КДБ подразделяются на относящиеся:

- непосредственно к объектам МО (модуль, блок, морское судно, плавсредство, оборудование (устройство));
- к функционированию системы обеспечения безопасности (СОБ) объектов МО;
- КДБ «по характеру безопасности» классифицируются на относящиеся:
 - к безопасности персонала (экипажа) объекта;
 - к безопасности применяемого при МО оборудования (устройств);
 - к экологической безопасности и охране окружающей среды прилегающей акватории проведения МО.

В настоящее время инструментом по управлению рисками МО с судами и объектами обустройства морских нефтегазовых месторождений является методология формальной оценки безопасности

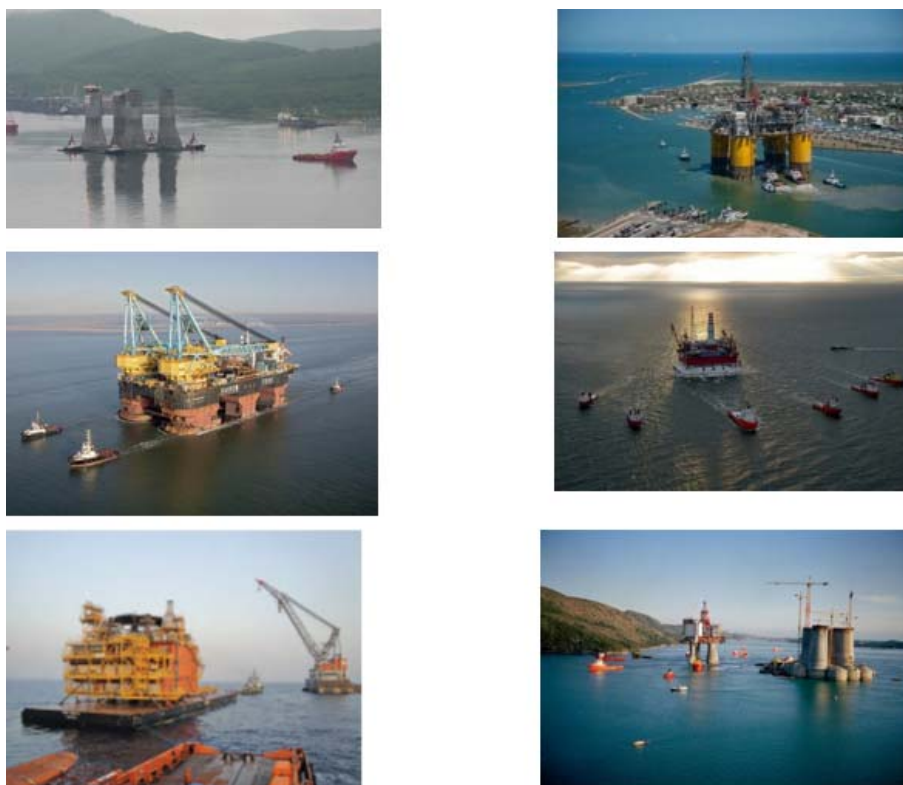


Рис. 1 Примеры морских операций на шельфе (буксировочные операции; установка объектов на точке эксплуатации)

(ФОВ) [1], использующая принцип ALARP (as low as reasonably applicable/practicable), заключающийся в обеспечении уровня воздействия факторов опасности на персонал (экипаж) и окружающую среду «настолько низкого, насколько это разумно достижимо». При этом максимально возможное снижение риска достигается за счет реально существующих материально-технических и финансовых ресурсов.

Определение КДБ при проведении МО позволяет сделать заключение о возможности реализации

различных АС на судах и шельфовых объектах, установить приемлемые и допустимые значения параметров безопасности (риска), выбрать способ проведения МО в ходе сопоставительной оценки безопасности (риска) рассматриваемых вариантов.

Общий алгоритм оценки безопасности (рисков) при проведении МО с использованием КДБ представлен на рис. 2.

На основании анализа мирового опыта оценки риска можно выделить следующие основные КДБ:

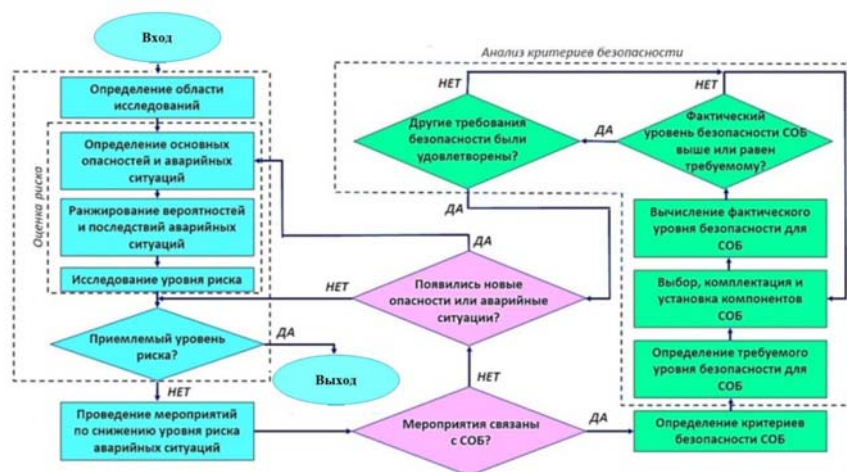


Рис. 2 Алгоритм оценки безопасности (рисков) при проведении МО с использованием КДБ

- уровень допустимого риска (ALARP);
- частота несчастных случаев со смертельным исходом (FAR);
- уровень полноты безопасности (SIL);
- уровень эффективности защиты (PL);
- уровень безопасности (Ranking) на основании индексов риска (Risk Index) и др.

Также при оценке безопасности (риска) проведения МО могут использоваться дополнительно такие КДБ, как: вероятность опасного отказа в час; среднее время наработки на отказ; число потенциальных несчастных случаев со смертельным исходом (PLL) и др. В данной статье остановимся на описании применения ряда из выше указанных КДБ при количественной оценке риска морских операций.

Количественными оценками риска с учетом воздействия поражающих факторов аварии на персонал при проведении МО являются *индивидуальный и социальный риски*.

Индивидуальный риск является основной характеристикой опасности для персонала (экипажа) и третьих лиц при проведении МО.

В соответствии с Правилами [2] значение годового индивидуального риска (AIR) при какой-либо опасности и/или АС в ходе выполнения МО определяется по формуле полной вероятности

$$AIR_k = \sum_{i=1}^n Q_i \cdot Q_{ik} \cdot Q_{ik}^p, \quad (1)$$

где Q_i – повторяемость рассматриваемой i -ой типовой опасности и/или АС;
 Q_{ik} – вероятность возникновения аварии при рассматриваемой типовой опасности и/или АС (риск аварии);
 Q_{ik}^p – условная вероятность поражения члена экипажа/персонала при реализации рассматриваемой типовой опасности и/или АС;
 n – число рассматриваемых типовых опасностей и/или АС;
 k – соответствует данному виду типовой опасности и/или АС.

То есть индивидуальный риск определяется как вероятность того, что с конкретным участником МО произойдет несчастный случай со смертельным исходом в течение периода осреднения (обычно 12-месячный период).

Суммарный годовой индивидуальный риск при воздействии различных АС в расчете на год определяется по формуле

$$AIR_{\Sigma} = \sum_{k=1}^{k=m} AIR_k, \quad (2)$$

где m – число возможных факторов воздействия АС.

В формулах (1) и (2) количество типовых опасностей и факторов воздействия (для каждой МО они различны), вероятности возникновения аварии, а также условные вероятности поражения персонала и экипажа определяются, например, с использования метода построения «деревьев событий». Однако, в ряде случаев, описанный выше подход является трудно осуществимым из-за наличия неопределенностей, связанных, например, с определением условных вероятностей.

Количественная оценка AIR при проведении МО также может быть выполнена и с использованием КДБ в виде интегральных показателей риска FAR и PLL по формулам (3-5) [3]:

$$AIR = FAR \cdot 10^{-8} \cdot H, \quad (3)$$

$$FAR = \frac{PLL \cdot 10^8}{T_{\text{пер}}}, \quad (4)$$

$$PLL = FAR \cdot 10^{-8} \cdot T_{\text{пер}}, \quad (5)$$

где FAR – частота несчастных случаев со смертельным исходом при проведении МО. Показатель FAR (чел./108 час.) отражает количество смертельных исходов в течение 108 часов воздействия вероятных аварийных факторов на здоровье 1000 чел. (нормирующий множитель 108 час. принимается из расчета, например, если $FAR=8$, то это означает, что из 1000 чел. персонала, работающего в отрасли всю трудовую жизнь - 50 лет по 50 недель в год с отпуском 2 недели при 40 час. рабочей неделе - 8 чел. могут погибнуть из-за аварии) и, в сущности, выражает средний индивидуальный риск.

PLL , чел. в год - число потенциальных несчастных случаев со смертельным исходом при выполнении подобных МО и является статистически ожидаемым количеством несчастных случаев в течение определенного периода МО;

POB (Personnel on Board), чел. – количество персонала (численность экипажей судов), задействованных в МО в период ее проведения;

H , час – продолжительность времени несения вахты и отдыха (свободное от вахты время) члена экипажа/персонала в период проведения МО;

$T_{\text{пер}} = POB \cdot H$, чел.-час – количество рабочих часов и часов вне вахты всех задействованных в МО лиц за период ее проведения. Если морская операция имеет круглосуточный характер, то общее число часов определяется с учетом всего штатного числа персонала.

В табл. 2 представлена форма для представления результатов оценки риска МО.

Таблица 2

Форма представления оценки риска

Участник МО (судно или объект)	Этап (фаза) МО	Число задействованных лиц РОВ (экипаж, персонал)	Продолжительность вахты/время отдыха/ на 1 члена экипажа, (персонала), час. $H_{\text{вах.}}$ или $H_{\text{отд.}}$	Количество часов Тпер., час. $POB \cdot H_{\text{вах}}$ или $POB \cdot H_{\text{отд.}}$	Значение FAR	Значение PLL
			$H_{\text{вах.}}$			
			$H_{\text{отд.}}$			

Значения FAR и PLL для типовых опасностей при выполнении различных морских операций можно определить на основе обработки статистических данных шельфовых проектов на шельфе Норвегии, Великобритании и Канады [3] – [5]. В табл. 3 приведены значения FAR для различных типов МО.

Таблица 3
Величины FAR для различных типов морских операций

Тип морской операции	FAR
Погрузо-разгрузочные операции собственными кранами	27
Спуск объектов на воду (спуск в сухом доке, понтоны, боковой спуск и т.д.)	26
Операции по завершению эксплуатации, ликвидационные МО	1,9
Операция по ликвидации объектов	4,1
Установка якорных линий (растяжек)	37
Буксировочные операции	13
Установка объектов на точке эксплуатации	5,5
Поддержка подводно-технической части работ	7,5
Деятельность управленческого и административного персонала	0,4
Время отдыха, свободное от вахты время	0,2

Социальный риск. Уровень социального риска R может быть представлен в виде зависимости $f(F, N)$, где F – частота, а N – тяжесть последствий события, приведшего к ущербу. Под N может пониматься общее число пострадавших, общее число смертельных случаев или другой показатель, характеризующий тяжесть последствий (ущерб). Так называемые F - N диаграммы или кривые, известны также как *кривые Фармера* (рис. 3).

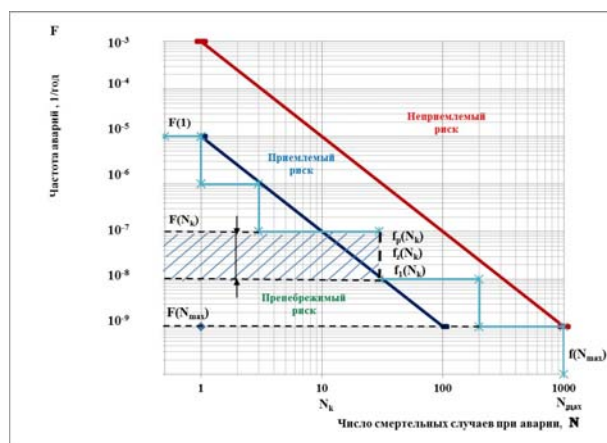


Рис. 3 Кривые F/N и критерии допустимости рисков

Кривая социального риска имеет вид ступенчатой функции с целочисленными значениями аргумента N_k .

Критерий социального риска, как правило, выражается через накопленные частоты. Для

построения F/N кривой составляется список всех неблагоприятных событий, связанных с ними частот f_x и последствий N_x , которые далее сортируются по уменьшению значения N .

При разработке критериев риска применительно к МО, особенно в районах арктического шельфа, должное внимание следует обращать на фактор *неприятия риска* (*risk aversion*) крупных аварий. Неприятие риска выражается установлением приемлемой верхней границы риска [6].

Для решения вопроса о неприятии риска рассматриваются критерии, относящиеся к *групповому риску*, под которым при работах на шельфе часто понимают *социальный риск*.

Анализ методик по оценке безопасности (рисков) показал, что целесообразно определять риски не для каждого участника МО, а для групп лиц из экипажа и персонала, характеризующихся одинаковыми навыками и квалификацией, временем пребывания в опасных зонах и использующих одинаковые средства защиты в соответствии со штатным расписанием, расписаниям по заведованиям.

Актуальность группового риска проистекает из необходимости учитывать важный фактор баланса между частотой незначительных инцидентов и крупномасштабных аварий (катастроф). В связи с резким неприятием обществом крупномасштабных катастроф, соответствие критерию индивидуального риска может быть необходимым, но не всегда достаточным условием допустимости/приемлемости риска. Даже если критерий индивидуального риска удовлетворяется, необходимо рассмотреть и социальный риск с целью решения вопроса о неприятии риска.

Для определения значений социального (группового) риска кривая F/N строится с использованием:

- контрольных точек, в качестве которых принимаются критерии приемлемого риска (которые могут иметь различия для разных стран и отраслей), например, частота аварии, приводящая к 10 или более смертельным случаям не должна превышать 1 на 10000 в год; Контрольная точка представляет собой фиксированную точку с координатами (F, N) и является критерием приемлемости (допустимости);

- градиента кривой, определяющего ее наклон.

Кривая Фармера имеет разные масштабы и размерность осей, что является типичным в теории рисков. F/N кривые имеют приблизительно одинаковый наклон, поэтому их можно линеаризовать, т.е. построить функцию линейного вида по контрольным точкам:

$$\lg F_N = \lg F - b \cdot \lg N, \quad (6)$$

где F_1 и F_N – частоты при одном и N смертельных случаях;
 b – коэффициент неприятия [6], выступающий в качестве градиента, равного тангенсу угла наклона кривой.

Тогда зависимость между частотой и количеством пострадавших имеет вид:

$$F_N = \frac{F_1}{N^b} \quad (7)$$

Координаты опорной точки и градиент предоставляют достаточно информации для построения F/N кривой.

Кривые F/N часто используются в качестве критериальных зависимостей (задаются директивно, исходя из значений нормативных документов по приемлемости социального риска).

Для построения зависимости, связывающей в общем виде AIR , POB и коэффициент неприятия, примем за POB численность персонала при проведении МО в любой момент времени, за F_N - годовую частоту с N или большим количеством смертельных случаев, а за f_N обозначим годовую частоту конкретно N смертельных случаев [3, 6], тогда имеем:

$$f_N = F_N - F_{N+1} \text{ при } N = 1, \dots, POB - 1, \quad (8)$$

$$f_N = F_N \text{ при } N = POB. \quad (9)$$

Из уравнений 7, 8 и 9 следует, что:

$$f_N = F_1 \frac{(N+1)^b - N^b}{N^b(N+1)^b} \text{ при } N = 1, \dots, POB - 1, \quad (10)$$

$$F_N = \frac{F_1}{N^b} \text{ при } N = POB. \quad (11)$$

В этом случае годовой индивидуальный риск для конкретного лица, участвующего в МО, выражается:

$$AIR = \frac{1}{POB} \sum_{N=1}^{POB} N \cdot f_N \quad (12)$$

А годовая частота с одним или большим количеством смертельных случаев при проведении МО составит:

$$F_1 = POB \cdot AIR \cdot \left[\frac{1}{POB^{b-1}} \sum_{N=1}^{POB-1} \frac{(N+1)^b - N^b}{(N^{b-1}(N+1)^b)} \right]^{-1} \quad (13)$$

Коэффициент неприятия может принимать и большие значения, чем 2, на что влияет то, что МО на российском шельфе могут осуществляться в сложных погодных условиях. В обычной практике принимается, что $b = 1,0$.

Оценка риска проводится с целью определения того, находится ли ожидаемая частота аварий с числом смертельных исходов, превышающих N , в пределах зоны приемлемости риска. Если при оценке риска установлено, что его величина находится в зоне «неприемлемого» риска, то руководитель МО, либо организация, проводящая ее, должны принять серьезные меры по снижению риска до приемлемого уровня.

В качестве критериев для максимально допустимого уровня социального риска в соответствии с [7] за основу принята величина $1 \cdot 10^{-4}$ в год с максимальным числом погибших, равным 10, и соответственно $1 \cdot 10^{-6}$ в год при количестве жертв, равном 10, может быть принята в качестве пренебрежимого уровня социального риска. Значения критериев приемлемости, представленные в табл. 4, широко используются ИМО и в других отраслях промышленности [1].

Вероятностная оценка безопасности требует установления правил на случай потери основных функций безопасности, например, наличия путей эвакуации. Потеря основных функций безопасности является проектным критерием и может использоваться в процессе принятия решений относительно технических мероприятий и, таким образом, исключает неоправданные уровни риска при проектировании морских объектов. Этот процесс можно интерпретировать так, что потеря основных функций безопасности является косвенным выражением риска персонала, что очень важно для работы в Арктике. Например, возьмем случай, когда

Таблица 4

Критерии приемлемости риска

Параметр риска		Критерии приемлемости риска	
		Нижний предел для области ALARP	Верхний предел для области ALARP
		Незначительный риск	Максимально допустимый риск
Индивидуальный риск	для экипажа	10^{-6}	10^{-3}
	для пассажиров	10^{-6}	10^{-4}
	для третьих лиц, персонала (включая берегового)	10^{-6}	10^{-4}
	целевые значения для новых судов в соответствии с рекомендациями MSC 72/16	10^{-6}	Вышеуказанные значения должны быть уменьшены на порядок
Социальный (групповой) риск	для групп вышеуказанных лиц	Он должен быть рассчитан с использованием установленных в документе MSC 72/16 Formal Safety Assessment (FSA) экономических показателей	

происходит авария на полностью закрытой платформе, и люди не могут ее покинуть. Критерий потери основных функций безопасности был разработан исключительно для операций на шельфе.

Матрица риска (матрица последствий и вероятностей) является одним из методов оценки риска (ГОСТ Р ИСО/МЭК 31010-2011 «Менеджмент риска. Методы оценки риска») и иллюстрирует результаты оценки в виде таблицы, включающей в качестве строк уровни (ранги) последствий наступления событий (АС), а в качестве столбцов – уровни (ранги) вероятностей наступления событий (АС). Категории представления вероятностей и последствий могут быть либо количественными, либо качественными и часто охватывают последствия для персонала, окружающей среды и экономический ущерб. Матрица рисков выражает степень риска, который задается комбинацией частоты и последствия и позволяет ранжировать риски на низкие, средние и высокие для выбора приоритетных мер по их снижению или для дополнительного анализа.

Матрица (карта) риска является простым в использовании и информативным инструментом, позволяющим представлять данные о рисках в комплексной форме, проводить сопоставление рисков различных аварийных ситуаций между собой и с установленными приемлемыми значениями риска.

Применение данного метода оценки наиболее актуально при отсутствии подробной информации,

включая и статистической, об авариях и отказах систем, оборудования и устройств, применяемых при МО, а также в случаях, в которых представляется затруднительным воспользоваться другими методами оценки риска.

Матрицы риска можно условно классифицировать в зависимости от размерности матрицы риска и по способу ранжирования вероятности и последствий (ущерба). В мировой практике, включая и Россию, отсутствуют жесткие нормативные требования к применению конкретных видов матрицы риска для различных видов работ и производственной деятельности, включая и МО. В ГОСТ ИСО 17776-2012 «Нефтяная и газовая промышленность. Морские добычные установки. Способы и методы идентификации опасностей и оценки риска. Основные положения» представлена типовая матрица риска (табл. 5), дан способ ранжирования вероятностей и последствий АС при эксплуатации морских нефтегазовых сооружений, но конкретные указания к ее применению отсутствуют.

Стандарты по оценке риска нефтегазовых (ПАО «Газпром», ПАО «НК «Лукойл», «Сахалин Энерджи» и т.д.), судостроительных и других компаний содержат варианты матрицы риска, учитывающие специфику деятельности компаний.

Выбор *матрицы риска* для анализа риска МО должен учитывать их специфику и отвечать следующим требованиям:

- размерность матрицы риска должна обеспечивать возможность объективной оценки всех потенциальных

Таблица 5

Типовая матрица риска

Последствия для					Увеличение вероятности опасного события			
оценка серьезности (тяжести)	людей	активов (имущества)	окружающей среды	репутации предприятия	А	В	С	Д
					в отрасли при разведке и добыче углеводородного сырья	в компании-операторе	несколько раз в год в компании-операторе	несколько раз в год на одном месте
0	Без вреда здоровью	Без ущерба	Без вреда	Без урона	Долгосрочное управление, направленное на постоянное улучшение			
1	Легкие ушибы и травмы	Небольшой ущерб	Небольшой вред	Небольшой урон				
2	Небольшие ушибы и ранения	Незначительный ущерб	Незначительный вред	Незначительный урон				
3	Значительные повреждения и ранения	Значительный ущерб	Значительный вред	Значительный урон				
4	Один несчастный случай со смертельным исходом	Крупный ущерб	Существенный вред	Большой урон в масштабах страны	Внедрение мер по снижению риска		Несоответствие отсеивающему критерию	
5	Множественные несчастные случаи со смертельным исходом	Огромный ущерб	Огромный вред	Огромный урон на международном уровне				

АС с некоторым «запасом», создавая разграничение риска реализации одной АС от другой, но с другой стороны – не сильно затрагивать диапазоны уровней вероятности и последствий АС, которые не могут произойти при данной МО при любых обстоятельствах;

- временные периоды при определении вероятности наступления АС должны, с одной стороны, коррелироваться с длительностью МО, с другой стороны, предусматривать возможность реализации данной АС при проведении МО с учетом практики компании-оператора, судоходства в регионе и внешних условий в районе проведения МО в целом;

- тяжесть последствий АС при проведении МО должна ранжироваться для различных объектов (субъектов) воздействия (персонал, окружающая среда, компании-оператора (штрафные выплаты, репутация и т.д.), что позволяет наиболее полно оценить причиненный ущерб.

С использованием ГОСТ ИСО 17776-2012 (Приложение А) проведено ранжирование вероятностей и последствий АС (табл. 6 и 7) и предложен вид матрицы риска (табл. 8 и 9) для проекта части VI «Оценка безопасности» новой редакции «Правил разработки и проведения морских операций» Российского морского регистра судоходства.

Таблица 6

Оценка последствий наступления АС

Вероятные последствия					
Категория	Оценка последствий	Влияние на безопасность людей	Влияние на окружающую среду (ОС)	Материальный и финансовый ущерб	Влияние на репутацию
1	Пренебрежимо малые (Очень низкая)	Отсутствие травматизма	Без загрязнения окружающей среды	< \$10 тыс. Незначительные повреждения оборудования/ без перерыва в эксплуатации	Отсутствие влияния
2	Малые (Низкая)	Возможность травматизма, не приводящего к потере трудоспособности	Незначительное загрязнение окружающей среды Время восстановления ОС < 1 месяца (затраты < \$1 тыс.)	\$10 – 100 тыс. Непродолжительный перерыв в работе вследствие аварийной ситуации (не повлекшей повреждений объекта)	Незначительное влияние
3	Значительные (Средняя)	Возможны тяжкие травмы. Многочисленные незначительные повреждения Длительная потеря трудоспособности	Значительное загрязнение окружающей среды Время восстановления ОС > 1 месяца (затраты > \$1 тыс.)	\$100 – 1000 тыс. Простой объекта (до нескольких суток) из-за аварии, ремонтные работы, не связанные с корпусными конструкциями	Значительное влияние
4	Тяжкие (Высокая)	Возможность несчастного случая со смертельным исходом/многочисленных тяжких травм Одиночные жертвы	Значительное воздействие на окружающую среду. Время восстановления ОС > 1 года (затраты > \$1 млн.)	\$1 – 10 млн. Простой объекта (более нескольких суток) из-за аварии, значительные ремонтные работы корпусных конструкций	Крупные последствия для дальнейшей деятельности
5	Катастрофические (Очень высокая)	Многочисленные жертвы	Катастрофическое воздействие на окружающую среду. Глобальная или национальная катастрофа. Время восстановления ОС > 10 лет	> \$10 млн. Катастрофа – гибель, затопление объекта или его полное конструктивное разрушение	Разрушительные последствия для деятельности

Таблица 7

Уровень вероятности наступления события

Величина	Уровень вероятности наступления события	Определение
1	Крайне маловероятное	Возможное, но никогда не случавшееся событие при МО
2	Маловероятное	Событие, которое не произойдет во время МО
3	Возможное	Нечастое событие, которое может случиться во время МО
4	Вероятное	Событие, которое может произойти один или несколько раз во время МО
5	Частое	Обычное событие, которое может произойти один или более раз при МО

Для проведения оценки риска МО выбрана матрица риска вида, приведенного в табл. 8 и 9.

Таблица 8

Матрица уровней риска МО

Последствия (I)	Вероятность (P)				
	1	2	3	4	5
	Крайне мало-вероятные	Мало-вероятные	Возможные	Вероятные	Частые
1 Пренебрежимо малые	1	2	3	4	5
2 Малые	2	4	6	8	10
3 Значительные	3	6	9	12	15
4 Тяжелые	4	8	12	16	20
5 Катастрофические	5	10	15	20	25

Предложенный вариант для использования в анализе риска МО матрицы риска:

- имеет размерность (5 × 5), что обеспечивает широкий диапазон ранжирования вероятности и последствий АС и оценки результатов;
- позволяет оценить риск, как кратковременных МО (швартовка, погрузка, заводка якорей), так и длительных операций продолжительностью до нескольких недель;
- позволяет оценивать последствия (ущерб) АС для персонала, окружающей среды и компании-оператора.

Таблица 9

Таблица приемлемости рисков

Уровень риска	Баллы	Описание
«Низкий»	1 – 6	Операции могут проводиться без принятия особых мер безопасности
«Средний»	7 – 12	Может потребоваться дальнейшее рассмотрение и/или принятие мер по снижению риска/введению в действие плана по снижению риска до приемлемого уровня
«Высокий»	13 – 25	Операции не могут проводиться. Должны быть выработаны альтернативные способы или меры по снижению риска

Данный вид матрицы риска применен для оценки риска МО с МЛСП «Приразломная», при буксировке опорных оснований платформ для проектов «Сахалин 1 и 2».

Результаты анализа риска могут также быть представлены в виде *реестра риска*.

Реестр риска содержит данные по идентификации, описанию опасных событий, оценке их риска, предполагаемого ущерба, вероятности и риска, данные о возможных последствиях воздействия опасных событий при проведении МО. В реестр риска также включают мероприятия по управлению риском, а также оценки остаточного риска после выполнения данных мероприятий и т.д.

Форма реестра риска утверждается руководителем организации, выполняющей МО, и согласуется проектантом с владельцами объектов МО и судов, участвующих в МО [ГОСТ Р 51901.22-2012]. Форма реестра для оценки риска морских операций (рекомендуемая) представлена в табл. 10.

Результаты оценки риска МО (рис. 4) представлены в табл. 11 и 12.

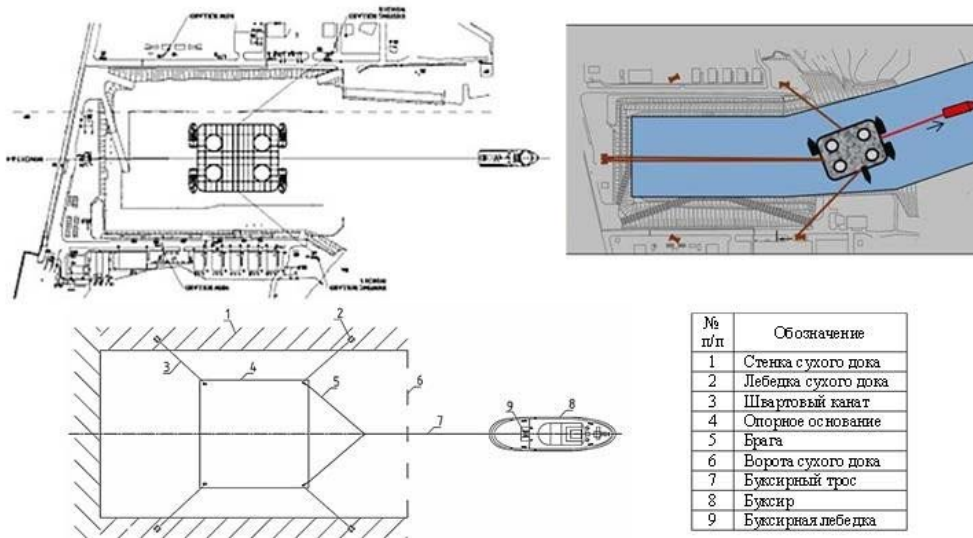


Рис. 4 Расположение объектов МО при выводе опорного основания (ОО) из сухого дока

Таблица 11

Оценка риска для проекта буксировки объекта

№ п/п	Название сценария	Уровень вероятности	Выводы экспертов	Уровень последствий	Выводы экспертов
1	Нарушение герметичности, просачивание воды в балластную систему (трубы, заглушки, клапаны) через сварные и фланцевые соединения	Крайне маловероятное (1)	После проведения всех надлежащих проверок герметичности крайне маловероятное событие	Пренебрежимо малые (1)	Последствия просачивания воды (разгерметизации) пренебрежимо малы
2	Выход из строя элементов буксирного и швартовного устройства. Обрыв буксирной линии	Крайне маловероятное (1)	При проведении МО при безопасных метеоусловиях и соблюдении установленной скорости буксировки крайне маловероятное событие	Значительные (3)	После обрыва буксирной линии возможен неконтролируемый дрейф объекта в узком канале, что может вызвать значительные повреждения конструкций установки и длительную приостановку МО (до 2 дней)
3	Выход из строя судна-буксировщика	Крайне маловероятное (1)	Крайне маловероятное событие при соблюдении надлежащих мер безопасности и наличии на судне-буксировщике опытного экипажа	Малые – значительные (2 – 3)	Выход из строя буксирного судна вызовет паузу (1 – 2 дня) в проведении МО (ремонт или привлечение нового судна)
4	Повреждения, вызванные падением/смещением внутри объекта оборудования, конструкций, фундаментов, груза и др.	Крайне маловероятное (1)	Крайне маловероятно, так как все элементы конструкций должны быть надлежащим образом закреплены	Пренебрежимо малые – малые (1 – 2)	Повреждения могут вызвать небольшой перерыв в проведении МО (до 1 дня)
5	Повреждения объекта, вызванные падением внешних объектов (вертолет, самолет, груз)	Крайне маловероятное (1)	Практически невероятное событие	Варьируются в больших пределах	Сложно определить
6	Повреждения, вызванные касанием грунта	Маловероятное (2)	Событие, которое не произойдет при соблюдении режима буксировки и правил безопасности мореплавания, но может иметь место при нарушениях вышеуказанного	Пренебрежимо малые (1)	Касание грунта не вызовет никаких серьезных повреждений объекта и не повлияет на план проведения МО
7	Посадка на мель	Маловероятное (2)	Аналогично п. 6	Значительные (3)	Посадка на мель потребует привлечение судов и плавсредств для снятия с грунта объекта, что вызовет приостановку МО
8	Повреждения, вызванные столкновением с другим судном/опасным дрейфующим объектом	Крайне маловероятное (1)	Учитывая то, что во время проведения МО все движение в канале будет приостановлено, событие весьма маловероятно	Варьируются (1 – 3)	При возникновении подобного события возможны повреждения конструкций объекта, в том числе и значительные
9	Навал буксира на объект	Крайне маловероятное (1)	Маловероятное, но имеющее место на практике событие, возникающее при ошибке судовождения в узкостях и каналах	Малые (2)	При установленной скорости буксировки навал не вызовет никаких повреждений объекта

Таблица 12

Оценка риска морской операции вывода ОО из сухого дока

№ п/п	Потенциальная авария / нежелательное событие	Вероятность события, Р	Серьезность воздействия, I	Оценка риска, РхI	Отв. лицо*	Действия по снижению/устранению риска
1	Последствия аварии/нежелательного события (посадка ОО на грунт/столкновение)			высокий		
	Влияние на объекты МО					
1.1	Обрыв троса буксира	1	2	2	LTO	Проверка соответствия спецификаций судов Проверка пригодности буксиров Анализ технических характеристик буксировочного оборудования (систем) Проведение инструктажа персонала и экипажей судов Проведение совещания с руководителем буксировки Проверка соответствия заявленных в проекте методов проведения операций. Необходимые справочные документы: • Спецификация буксирного судна • Классификационное свидетельство судна • План проведения операций вывода ОО из дока • Руководство по безопасности МО
1.2	Неуправляемое отсоединение швартова	1	2	2	LTO	Анализ технических характеристик швартовного оборудования (систем) Проведение инструктажа персонала и экипажей судов Проведение совещания с руководителем буксировки Осуществление контроля натяжения швартовых тросов Анализ реакции на отсоединение швартовного троса Проверка соответствия заявленных в проекте методов проведения операций. Необходимые справочные документы: • План проведения операций вывода ОО из дока
1.3	Неуравновешенность швартовой системы во время движения	1	2	2	LTO	Анализ технических характеристик швартовного оборудования (систем) Проверка соответствия заявленных в проекте методов проведения операций Осуществление контроля натяжения швартовых тросов Анализ реакции на отсоединение швартовного троса. Необходимые справочные документы: • План проведения операций вывода ОО из дока
1.4	Повреждение энергетической установки судна	1	2	2	LTO	Проверка соответствия спецификаций судов Проверка пригодности буксиров Проведение инструктажа персонала и экипажей судов Проведение совещания с руководителем буксировки Проверка соответствия заявленных в проекте методов проведения операций. Необходимые справочные документы: • Спецификация буксирного судна • Классификационное свидетельство судна • План проведения операций вывода ОО из дока • Руководство по безопасности МО
1.5	Авария судовой лебедки	1	2	2	LTO	Осмотр буксирной лебедки и буксирного устройства (системы) Проведение совещания с руководителем буксировки Проверка соответствия заявленных в проекте методов проведения операций. Необходимые справочные документы: • Спецификация буксирного судна • Классификационное свидетельство судна • План проведения операций вывода ОО из дока

Продолжение табл. 12

№ п/п	Потенциальная авария / нежелательное событие	Вероятность события, Р	Серьезность воздействия, I	Оценка риска, R _{xi}	Отв. лицо*	Действия по снижению/устранению риска
1.6 1.7	Проблема языка/связи	2	3	6	LTO	Проведение инструктажа персонала и экипажа судов Проведение совещания с руководителем буксировки. Необходимые справочные документы: • План проведения операций вывода ОО из дока • Руководство по безопасности МО
	Помехи морскому транспортному движению в порту	2	3	6	LTO	Проведение МО в дневное время Обеспечение связи и обмена информацией с офисом порта Информирование офиса порта во время выполнения операций Передача радиосообщений относительно безопасности Проверка соответствия заявленных в проекте методов проведения операций. Необходимые справочные документы: • План проведения операций вывода ОО из дока
*LTO (Lead tow operation) – руководитель операции буксировки						

В перспективе предусматривается создание методической базы для актуализации Правил РС с целью достижения концептуальной идентичности в Правилах РС (Правила по нефтегазовому оборудованию ПНК/ПБУ/МСП (часть X), Правила классификации и постройки подводных добычных комплексов (часть XIII) и Правила классификации и постройки морских подводных трубопроводов МПТ (раздел 10 части I, приложения 2 и 3) в соответствии с планом НИОКР РС.

Необходимо дальнейшее расширение номенклатуры рассматриваемых при анализе АС факторов риска и КДБ, затрагивающих работу оборудования и различных систем, выполнения инструкций по их эксплуатации, а также условий, в которых находится производственный персонал на морском объекте (условий обитания), его профессиональную подготовку и психофизиологическое состояние (человеческий фактор). В проекте FAROS [8] предпринята попытка разработки модели оценки риска, связывающей влияние человеческого фактора при возникновении АС, таких как столкновение судов, посадка на мель, пожар и т.д. с условиями обитания для персонала на морских объектах.

При продолжении работ по формированию методического подхода к оценке риска для актуализации Правил РС необходима более корректная оценка ущерба от возможных АС, оценка эффективности мероприятий по их предупреждению и ликвидации. При этом может рассматриваться экономическая эффективность затрат по методу «затраты – выгода» (CostBenefitAnalysis – CBA), когда экономическую эффективность оценивают только по соотношению вложенных и

полученных денежных средств. Но более актуальным на данный момент является экономический анализ по методу «затраты – результативность», который предполагает сравнение вариантов расходования средств на мероприятия по предупреждению, ликвидации аварий, снижению риска их возникновения до приемлемого уровня. Полученный от проведения конкретных мероприятий по снижению риска эффект в стоимостном выражении сравнивается с затратами на проведение самих мероприятий. При определении приоритета мер по снижению риска выбирается не максимальный эффект, не минимальные вложения, а максимальная удельная эффективность – отношение эффекта к затратам.

Рассмотренные в статье подходы к оценке риска МО являются эффективным методическим инструментом управления рисками, позволяющим повысить безопасность проектов МО, выбрать наиболее предпочтительный вариант их проведения, что особенно актуально для районов со сложными климатическими, гидрологическими и ледовыми условиями арктических морей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. MSC-MEPC.2/Circ.12/ Rev.1 18 June 2015 Revised guidelines for formal safety assessment (FSA) for use in the IMO rule-making process.
2. Правила классификации, постройки и оборудования плавучих буровых установок и морских стационарных платформ. СПб.: Российский морской регистр судоходства – 2014
3. Vinnem Jan-Erik, Offshore Risk Assessment. Vol. 1. Principles, Modelling and Applications of QRA Studies / The Faculty of Science and Technology. – Stavanger: University of Stavanger, 2014.

4. Comparative Assessment Report for SNS Phase 1, Project BMT Cordah Ltd, 2015.
5. Risk Analysis of Decommissioning Activities. Joint Industry Project. ST-20447-RA-1-Rev 03. Main Report, 2005.
6. Schofield S. L., A Framework for Offshore Risk Criteria, 1993
7. Быков А.А., Акимов В.А., Фалеев М.И. Нормативно-экономические модели управления риском // Проблемы анализа риска. 2004. – 1, №2. – С. 125-137.
8. Consortium of EU project FAROS (2012 – 2015). Final Report. Edited by Dr. Romanas Puisa, 2016. <http://www.faros-project.eu>.
9. Егоров Г.В. Теория риска в морской деятельности – СПб.: ЗАО «Морское Инженерное Бюро» – 2016 г.

REFERENCES

1. MSC-MEPC.2/Circ.12/ Rev.1 18 June 2015 Revised guidelines for formal safety assessment (FSA) for use in the IMO rule-making process.

2. Rules for the classification, construction and equipment of mobile offshore drilling units and fixed offshore platforms. St. Petersburg, Russian maritime register of shipping, 2014. (In Russian)
3. Vinnem Jan-Erik, Offshore Risk Assessment. Vol. 1. Principles, Modelling and Applications of QRA Studies. The Faculty of Science and Technology. Stavanger: University of Stavanger, 2014.
4. Comparative Assessment Report for SNS Phase 1, Project BMT Cordah Ltd, 2015.
5. Risk Analysis of Decommissioning Activities. Joint Industry Project. ST-20447-RA-1-Rev 03. Main Report, 2005.
6. Schofield S. L.. A Framework for Offshore Risk Criteria, 1993.
7. Bykov A.A., Akimov V.A., Faleev M.I. Normativno-ekonomicheskie modeli upravleniya riskom [Normative-economic models of risk management]. Problemy analiza riska [Problems of risk analysis]. 2004, № 2, pp. 125-137.
8. Consortium of EU project FAROS (2012 – 2015). Final Report. Edited by Dr. Romanas Puisa, 2016. Available at: <http://www.faros-project.eu>.
9. Egorov G.V. Teoriya riska v morskoy deyatel'nosti [Risk theory in marine activities]. St. Petersburg, ZAO "Marine Engineering Bureau", 2016.

ОБОЗРЕНИЕ: СЕМИНАР РС И ЗАСЕДАНИЕ СЕКЦИИ НТС «МОРСКИЕ НЕФТЕГАЗОВЫЕ СООРУЖЕНИЯ»

19–21 сентября в г. Волжский, Волгоградская область, прошел пятый обучающий семинар «Техническое наблюдение за морскими подводными трубопроводами», организованный Российским морским регистром судоходства. Семинары по организации технического наблюдения за МПТ проводятся РС с 2008 года. Первый был организован в Санкт-Петербурге, последующие в регионе деятельности Астраханского филиала. В этом году в мероприятии приняли участие более 30 человек, в том числе представители компаний, с которыми Регистр связывает многолетнее сотрудничество: ЛУКОЙЛ-Нижневолжскнефть, ВолгоградНИПИморнефть, ЛУКОЙЛ-Инжиниринг, Трубопроводные покрытия и технологии, ЦНИИ КМ «Прометей», Волжский трубный завод, Челябинский трубопрокатный завод и др.

На семинаре представители Регистра выступили с докладами о результатах технического наблюдения за МПТ и развитии нормативно-технической базы, о ходе технического наблюдения за постройкой внутрипромысловых трубопроводов на месторождениях имени В. Филановского и Ю. Корчагина. Были представлены доклады о техническом сопровождении изготовления материалов и изделий для МПТ, средствах антикоррозионной защиты МПТ, системах обнаружения утечек, прокладке подводных кабелей, периодических освидетельствованиях МПТ в классе Регистра, техническом наблюдении за нанесением изоляционных покрытий для внутрипромысловых МПТ.

Специалисты организаций-партнеров РС рассказали об особенностях проектирования, строительства и ремонта МПТ в условиях Северного Каспия, поделились опытом применения инновационных решений для внешнего подводного обследования и внутритрубной диагностики трасс, обсудили перспективы развития

трубной промышленности для реализации шельфовых проектов. Место проведения семинара обеспечило его участникам хорошую возможность посетить с экскурсией сразу два ведущих предприятия-изготовителя, находящихся в г. Волжский – АО «Волжский трубный завод» и ООО «Трубопроводные покрытия и технологии».

Помимо проведения семинаров, взаимодействие РС с организациями и специалистами в области проектирования, постройки и эксплуатации объектов морского шельфа осуществляется в рамках Научно-технического совета. В 2017 году проведено три заседания секции НТС «Морские нефтегазовые сооружения» (апрель, июль, ноябрь). В работе секции, помимо специалистов РС, принимают участие специалисты СПбПУ, КГНЦ, СПМБМ «Малахит», ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, ЦКБ МТ «Рубин», ЦНИИ КМ «Прометей», РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, Санкт-Петербургский горный университет, ООО «Газпромнефть-Сахалин», ООО «Энергодиагностика».

В рамках заседания секции рассмотрены результаты двух выполняемых по заказу РС научно-исследовательских работ, завершение которых запланировано в 2017 году: «Разработка требований Правил Регистра к ремонту морских подводных трубопроводов» и «Разработка проекта требований Правил Регистра к конструктивному оформлению пересечения трасс подводных трубопроводов и электрокабелей, а также выходов трубопроводов на береговой участок трассы». Рассмотрены также перспективные направления для научно-исследовательских работ, выполняемых по заказу Регистра и направленных на совершенствование нормативной базы, а также статьи для новых выпусков журнала «Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства».



ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ НА МОРСКОМ ТРАНСПОРТЕ

УДК 504.062:911.2

АНАЛИЗ ХОЗЯЙСТВЕННОЙ АКТИВНОСТИ В АКВАТОРИЯХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ СИСТЕМ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ МОРСКОГО ТРАНСПОРТА И КОСМОСНИМКОВ

П.С. Сорокин, канд. геогр. наук, Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, Владивосток,
тел. +7 (423) 237-59-26, e-mail: paveleco@tig.dvo.ru

Предлагается методика оценки использования морского пространства на основе мониторинга передвижения плавсредств с целью определения степени активности хозяйственной деятельности и инструмента морского пространственного планирования. Выполнен анализ зарубежной литературы по использованию ночных спутниковых снимков для определения местоположения рыболовных судов, использующих электрический свет для привлечения морских гидробионтов. Представлено зонирование Японского моря, подготовленное на основе компьютерной обработки спутниковых растровых изображений ночных огней судов и плотности морского транспорта, доступных для общего пользования на указанных в данной статье Интернет-ресурсах. Определены границы морских районов, имеющих преимущественно портовую специализацию, и участки добычи гидробионтов, промышленный лов которых осуществляется при помощи источников мощного электрического освещения на палубе (кальмара и сайры).

Ключевые слова: мониторинг, прибрежно-морское природопользование, хозяйственная деятельность, морской транспорт, зонирование, ночные космоснимки, позиционирование, судоходство

ANALYSIS OF ECONOMIC ACTIVITY IN WATER AREAS USING THE DATA OF SEA TRANSPORT TRACKING SYSTEMS AND SATELLITE IMAGES

P.S. Sorokin, PhD, Pacific Geographical Institute, Far Eastern Branch Russian Academy of Sciences,
Vladivostok, tel. +7 (423) 237-59-26, e-mail: paveleco@tig.dvo.ru

A methodology for assessing the management of marine areas based on monitoring the ship movement is proposed to determine the degree of economic activity as a tool for marine spatial planning. Related literature analysis on application of night satellite images to determine the location of fishing vessels using electric light to attract marine hydrobionts is performed. Patterns of marine zoning by sea transport density are shown using the Sea of Japan as an example, based on the analysis of raster images of maritime transport density and night lights location on the satellite images. There are defined the boundaries of marine areas with predominant port specialization and areas for squid and saury fishing in the open sea, the hydrobionts caught using sources of powerful electric illumination.

Keywords: monitoring, coastal-marine nature management, economic activities, sea transport, zoning, night satellite images, positioning, navigation

ВВЕДЕНИЕ

Использование данных дистанционного зондирования имеет важное значение в работе исследователей различных областей науки. Наряду с этим сведения автоматизированного контроля за средствами передвижения позволяют оперативно и объективно оценить информацию об объекте исследования. Но, к сожалению, она не всегда учитывает все виды морского транспорта. В рамках проведения морского пространственного планирования выше упомянутые материалы представляют основу для функционального зонирования и, в нашем случае, для определения наиболее используемых морских районов. На конкретном примере, Японском море, была выполнена работа по использованию его акватории с применением современных информационных методов фиксации деятельности человека.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Материалом для исследования стали растровые снимки ночных огней на акватории Японского моря с гидрометеорологического спутника ("Earth at Night", Suomi NPP) и данные о расположении в море судов (сайт: <http://www.marinetraffic.com>), составленные на основе автоматизированной идентификационной системы (AIS).

Карта позиционирования морских судов ("density maps") была скопирована в виде скриншота. Она составлена на основе данных передатчиков радиочастоты, установленных на судах (как правило, с водоизмещением больше 299 GT) и представлена за 2015 г. На карте плотности судов "marine traffic" в цветовой гамме передана информация о количестве зафиксированных позиций морского транспорта на 1 км² в единицу времени. Синий цвет – менее 30, зеленый – от 30 до 70, желтый – от 71 до 140, красный – более чем 140 морских судов [1].

Следует отметить, что сервис "marine traffic" предоставляет данные о передвижении морского транспорта в основном в прибрежной полосе и не для всех стран мира. Поэтому информация о расположении судов в открытом море может отсутствовать, либо появляться на сайте с опозданием из-за скорости обработки сигнала, погодных условий, расположения антенны на судне и рельефа берега там, где расположены базовые станции приема сигнала с судов и передачи его в единую базу данных. Важным фактором является и неправильная установка системы автоматизированного позиционирования, что приводит к искажению данных. На судне отсутствует судовой оператор, и игнорирование правильных настроек или обновления системы может стать причиной недостоверного расположения судна или же вовсе его отсутствие в базе "marine traffic".

Этапы обработки скриншота

Схема позиционирования морского транспорта в нашем исследовании конвертируется в векторную графику с помощью компьютерной программы ArcMap для выделения зон, где наиболее часты скопления морского транспорта. С помощью стандартных инструментов ArcMap преобразование растровых файлов выполняется в следующем порядке: привязка к заданной географической проекции и береговой линии, обрезка изображения по границе района исследования и трансформация растрового изображения в векторное с выделением одинаковых (по цветовой гамме) классов построенных полигонов (рис. 1).

Аналогичную работу по векторизации и дальнейшему анализу изображения можно провести, используя космоснимки. В нашем случае, мы взяли за основу снимок "Earth at Night" Suomi NPP (радиометр VIIRS - Visible Infrared Imaging Radiometer Suite). По этим снимкам представляется возможным зафиксировать местоположение рыболовных судов при добыче кальмара, сайры и других гидробионтов, промысел которых осуществляется с использованием мощных осветительных установок на палубе в качестве привлечения к орудиям лова [2]. Установлено, что данные этого спутника можно использовать для мониторинга передвижения рыболовного флота

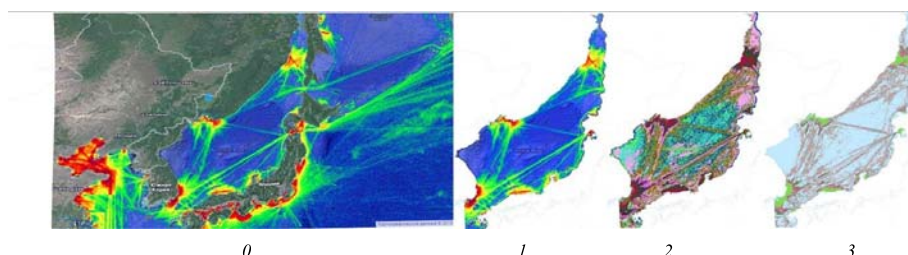


Рис. 1 Подготовка и векторизация растрового изображения в ArcMAP

1 - Привязка растрового изображения Marinetraffic (0), совмещение с береговой линией; 2 - Классификация: Spatial Analyst/Iso Cluster; 3 - Объединение классов (reclassify) и векторизация полигонов

(рис. 2, 3), в частности кальмароловов, где используется электрическое освещение на палубе мощностью более 20 кВт [3].

На рис. 2 представлены изображения, подтверждающие присутствие в море исключительно кальмароловов, т.к. на фотографии запечатлены в видимом спектре для человека именно синие галогеновые лампы, которыми оснащены специализированные суда.

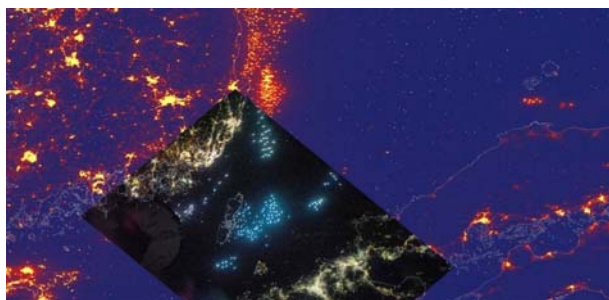


Рис. 2 Наложение фотографии астронавта 37-й Экспедиции (11.11.2013) на снимок DNB (Suomi NPP, NOAA) аналогичного времени на Корейский пролив Японского моря
[Источник: <https://earthobservatory.nasa.gov/IOTD/view.php?id=84571> <https://worldview.earthdata.nasa.gov/>]

Данные со спутника согласуются с фактическим расположением рыболовных судов при добыче кальмара, зафиксированных системой автоматического позиционирования. На рис. 4 приведены данные работы зарубежных исследователей при анализе активности рыболовства вдоль западного побережья Южной Америки [4].

Несмотря на имеющиеся Интернет-ресурсы по мониторингу рыболовных судов, использование ночных спутниковых снимков DNB выглядит более объективным показателем использования морского пространства. Доказательством этому служит

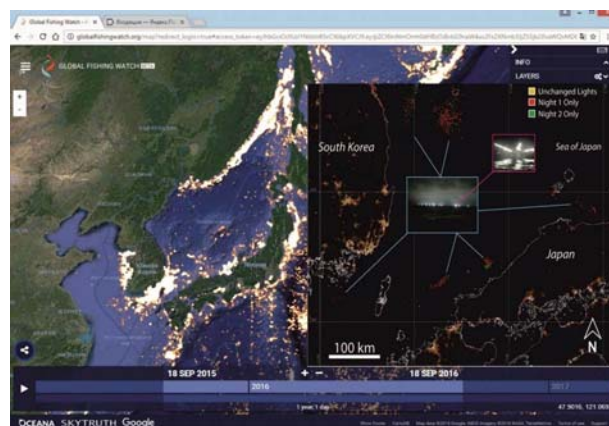


Рис. 3 Расположение рыболовных судов за период с 18.09.2015 по 18.09.2016 и кальмароловов 24 - 25 сентября 2012 г. в южной части Японского моря

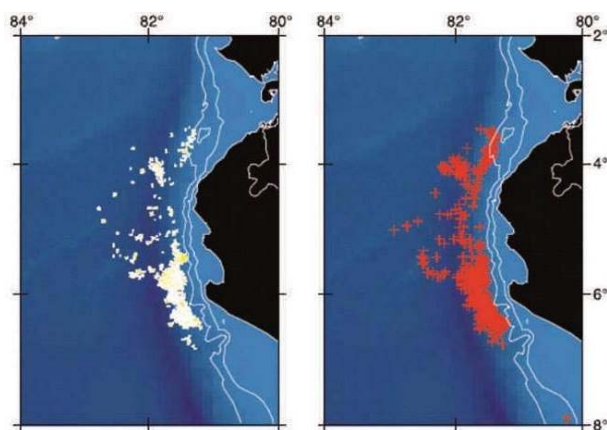


Рис. 4 Размещение рыболовных судов при промысле *Dosidicus gigas* у побережья Перу (июль – декабрь 1999 г.)
По данным: DMS-OLS (рис. слева) и ARGOS (рис. справа)

следующий рисунок центрального района Японского моря за конкретный временной промежуток (рис. 5). На этом примере наглядно видно, что не все суда морского

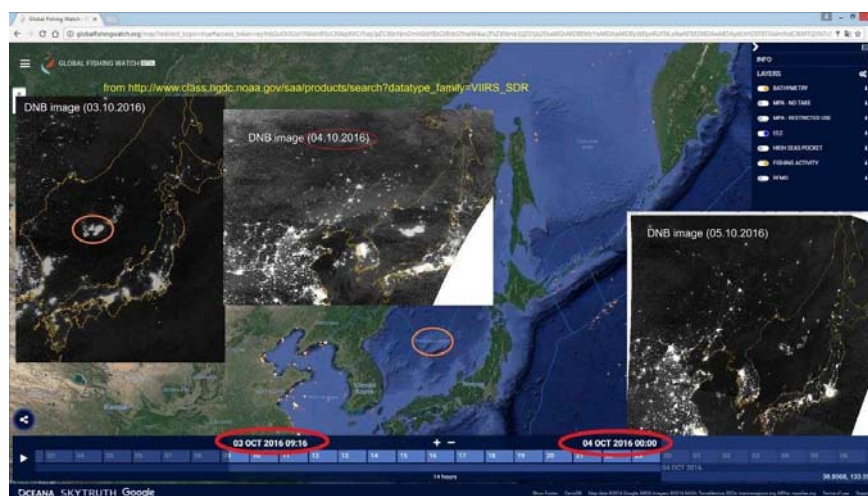


Рис. 5 Мониторинг кальмароловов в Японском море по ночным спутниковым снимкам в период с 03.10. по 04.10.2016 г. (черно-белые изображения) и данные Global Fishing Watch («подложка») за этот же период

реестра и ведущие промысел регистрируются в глобальных системах позиционирования. Этот район (поднятие Ямамото) нами выбран не случайно. Здесь практически круглогодично базируется рыболовный флот. Участок удален от береговой охраны и, возможно из-за погодных условий, наблюдаются перебои с передачей сигнала позиционирования морского транспорта на береговые станции приема.

РЕЗУЛЬТАТЫ

С использованием совмещения графических данных и компьютерной обработки карт плотности морского транспорта определены районы с конкретной градацией активности использования морского пространства (рис. 6). По полученной схеме передвижения морского транспорта на основе критерия интенсивности, однородности и дискретности окрашенных участков были выделены следующие зоны:

- активные: там, где происходит основная портовая деятельность, частые передвижения морского транспорта, швартовка или длительная стоянка судов дальнего плавания и маломерного флота;
- умеренные: морские участки, по которым осуществляются каботажные перевозки, подходы судов и ожидание их на пропуск в порт;
- неактивные (или рейдовые): расположение объектов морского транспорта на удалении от портов.

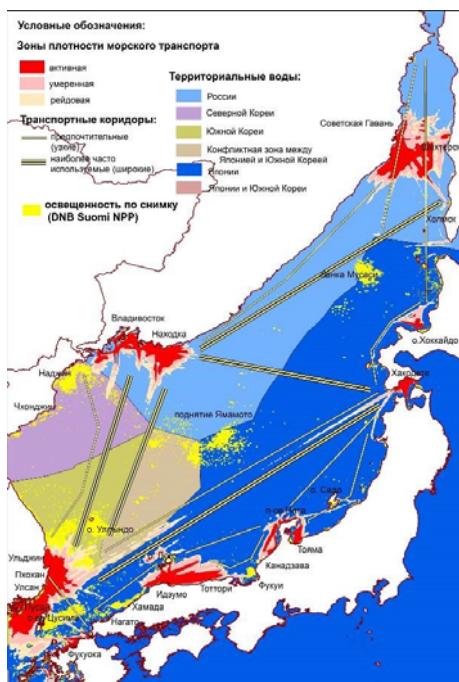


Рис. 6 Схема зонирования Японского моря по активности использования морским транспортом и участки добычи тихоокеанского кальмара

Кроме этого по карте "marine traffic" (преобразованной нами в векторный формат) отчетливо выделяются 2 вида транспортных путей: широкие и узкие транспортные коридоры (рис. 6).

На основе нашего зонирования по активности передвижений морского транспорта и наличия освещенности на ночных космоснимках можно обозначить районы исключительно портовой деятельности, такие как Советская Гавань – Холмск – Шахтерск, Владивосток – Находка. Для перечисленных российских припортовых акваторий отчетливо выделяются границы зон. Такое обстоятельство, вероятно, обусловлено скоплением судов у причалов и постоянным сообщением между ближайшими портопунктами.

Что касается портовой активности в япономорской части Северной Кореи, то здесь следует отметить, что на карте плотности морского транспорта отсутствует информация о локализации морского транспорта вообще. Несмотря на это, по спутниковым снимкам ночной освещенности на акватории КНДР повсеместно наблюдается активное свечение в прибрежных акваториях, пространственно не выходящее за пределы установленной зоны прибрежного рыболовства в этой стране. Более яркое и обширное свечение отмечено между г. Наджин и г. Чхонджин, а также в направлении центральной части Японского моря (поднятие Ямато). Это позволяет предположить, что указанный морской участок, удаленный от берега, используется как район для рыбопромысловой деятельности.

В акваториях Южной Кореи границы выделенных нами районов портовой активности отмечены у городов Пусан, Улсан и Пхохан. Корейский пролив разделяют о-ва Цусима, восточнее которых расположен морской район, выделенный по освещенности и не связанный с портовой деятельностью. Следовательно, такие скопления очагов ночного свечения в море можно рассматривать как участки рыболовства в южной части Японского моря. Так, у о-ва Уллындо от берега Южной Кореи и восточнее зафиксировано максимальное для Японского моря ночное свечение.

Что касается анализа освещенности япономорского побережья Японии, то здесь выделяются участки портовой активности по размеру выделенных полигонов в акваториях. Самым широким участком портовой деятельности является район напротив о. Дого (между г. Мацуэ и Тоттори). Севернее о. Дого выделен небольшой полигон умеренной и рейдовой портовой деятельности, расположенный на пересечении транспортного маршрута между проливами Лаперуза и Корейским.

Средним по активности портовой деятельности районом япономорского побережья можно считать г. Хакодате. Здесь проходят морские маршруты в Южную Корею, в сторону Владивостока и соседние портопункты Японии. Наименьшими по площади

портовой активности являются акватории у г. Саппоро, полуострова Ното (г. Тояма) и г. Фукуока.

В акваториях напротив г. Хамада (южнее г. Идзумо) зафиксирован район свечения, не связанный с зонами портовой активности. Небольшое свечение наблюдается в акватории напротив г. Фукуи и локальные огни у берегов о. Хоккайдо (рис. 6). Наибольшие очаги ночного свечения находятся на границе территориальных вод Японии и России, а именно напротив о. Хоккайдо (банка Мусаси), между п-вом Ното и Владивостоком (поднятие Ямамото), а также восточнее островов Цусима.

ВЫВОДЫ

Примененный нами методический подход можно предложить в качестве инструмента морского пространственного планирования. Используя такую методику, нам удалось определить границы районов, фактически используемых для плавания и рыбного промысла. При отсутствии реальных данных о местонахождении рыболовных судов и проблематичности в получении такой информации, наш метод позволяет определить зоны локализации кальмароловов и иных судов, использующих мощное электрическое освещение на палубе (при промысле сайры, сардины, анчоуса).

Используя доступные материалы по плотности морского транспорта, мониторинга рыболовных судов и фиксации электрического света на морской поверхности, выполнен анализ использования этих данных для определения хозяйственной активности в Японском море.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Карты плотности морского транспорта. Available at: <http://www.marinetraffic.com/ru/> (accessed 01.03.2017)

2. Elvidge C.D., Zhizhin M., Baugh K., Hsu Feng-Chi, Ghosh T. Automatic Boat Identification System for VIIRS Low Light Imaging Data. *Remote Sens.* 2015, 7, pp. 3020-3036.
3. Miller S.D., Straka W., Mills S.P., Elvidge C.D., Lee Th.F., Solbrig J., Walther A., Heidinger A.K. and Weiss S.C. Illuminating the Capabilities of the Suomi National Polar-Orbiting Partnership (NPP) Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS) Day/Night Band. *Remote Sens.* 2013, 5, pp. 6717-6766.
4. Waluda C.M., Yamashiro C., Elvidge C.D., Hobson V.R., Rodhouse P.G. Quantifying light-fishing for *Dosidicus gigas* in the eastern Pacific using satellite remote sensing. *Remote Sensing of Environment.* 2004, 91, pp.129-133
5. Kiyofuji H., Saitoh Sei-Ichi. Use of nighttime visible images to detect Japanese common squid *Todarodes pacificus* fishing areas and potential migration routes in the Sea of Japan. *Marine Ecology Progress series Mar. Ecol. Prog. Ser.* 2004, 276, pp.173-186.
6. Sorokin P.S. Zoning of Sea of Japan/East sea for monitoring human activity based on remote sensing data. *Resources, Environment and Regional Sustainable Development in Northeast Asia. Proceedings of the III International Conference.* Vladivostok, Dalnauka, 2016, pp.145-148.

REFERENCES

1. Karty plotnosti morskogo transporta [Density maps of marine transport]. Available at: <http://www.marinetraffic.com/ru/> (accessed 01.03.2017).
2. Elvidge C.D., Zhizhin M., Baugh K., Hsu Feng-Chi, Ghosh T. Automatic Boat Identification System for VIIRS Low Light Imaging Data. *Remote Sens.* 2015, 7, pp. 3020-3036.
3. Miller S.D., Straka W., Mills S.P., Elvidge C.D., Lee Th.F., Solbrig J., Walther A., Heidinger A.K. and Weiss S.C. Illuminating the Capabilities of the Suomi National Polar-Orbiting Partnership (NPP) Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS) Day/Night Band. *Remote Sens.* 2013, 5, pp. 6717-6766.
4. Waluda C.M., Yamashiro C., Elvidge C.D., Hobson V.R., Rodhouse P.G. Quantifying light-fishing for *Dosidicus gigas* in the eastern Pacific using satellite remote sensing. *Remote Sensing of Environment.* 2004, 91, pp. 129-133.
5. Kiyofuji H., Saitoh Sei-Ichi. Use of nighttime visible images to detect Japanese common squid *Todarodes pacificus* fishing areas and potential migration routes in the Sea of Japan. *Marine Ecology Progress series Mar. Ecol. Prog. Ser.* 2004, 276, pp. 173-186.
6. Sorokin P.S. Zoning of Sea of Japan / East sea for monitoring human activity based on remote sensing data. *Resources, Environment and Regional Sustainable Development in Northeast Asia. Proceedings of the III International Conference.* Vladivostok, Dalnauka Publ., 2016, pp.145-148.

УДК 614.841

АНАЛИЗ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ОПЕРАТИВНОГО РЕАГИРОВАНИЯ ПРОТИВОПОЖАРНЫХ ПОДРАЗДЕЛЕНИЙ МЧС РОССИИ НА ПОЖАРЫ ОБЪЕКТОВ МОРСКОГО И РЕЧНОГО ТРАНСПОРТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕОРИИ ГРАФОВ

К.С. Власов, канд. техн. наук, ФГБУ ВНИИПО МЧС России, Балашиха, тел. +7 (495) 524-81-32, e-mail: vlasov-k@yandex.ru

Н.А. Аручиди, канд. эконом. наук, доцент, ФБГОУ ВПО РГЭУ (РИНХ), Ростов-на-Дону

Противопожарная защита морских и речных портов является важным элементом в системе обеспечения стабильной работы объектов транспортной инфраструктуры. Практически каждый пожар дестабилизирует работу порта и нарушает структуру цепей поставок в региональных, национальных и международных логистических системах. В статье анализируются показатели оперативного реагирования пожарных подразделений на объектах морского и речного транспорта в сравнении с общими показателями по Российской Федерации. Основным недостатком методов, используемых в настоящее время для оценки эффективности деятельности подразделений пожарной охраны, в том, что статистические показатели анализируются разрозненно, без учета взаимных влияний и определения общих трендов. Методами теории графов предлагается выявить связи и степень влияния различных факторов на деятельность оперативных пожарных подразделений на примере пожаров объектов морского и речного транспорта.

Ключевые слова: оперативные пожарные подразделения, корреляция, теория графов

ANALYSIS OF OPERATIONAL RESPONSE INDICATORS OF THE RF EMERCOM FIRE DEPARTMENTS ON THE FIRES OCCURRING ON THE OBJECTS OF MARINE AND RIVER TRANSPORT USING GRAPH THEORY METHOD

K.S. Vlasov, PhD, VNIPO EMERCOM, tel. +7 (495) 524-81-32, e-mail: vlasov-k@yandex.ru

N.A. Aruchidi, PhD, associate professor, FBGOU VPO Rostov state University (RINH), Rostov-on-don

Fire protection of sea and river ports is an important element of the system ensuring the stable operation of transport infrastructure. Almost every fire destabilizes the work of the port and breaks the structure of supply chains in regional, national and international logistics systems. The article analyzes the rapid response indicators of the fire units at sites of sea and river transport in comparison with the general indicators for the Russian Federation. The main disadvantage of the methods currently used to assess the effectiveness of fire departments is that the statistical indicators are analyzed in isolation, without taking into account mutual influences and identifying common trends. Methods of the graph theory are proposed to help identify relationships and the degree of influence of various factors on the operational activities of fire departments using fires on objects of sea and river transport as an example.

Keywords: operational fire departments, correlation, graph theory

Обеспечение пожарной безопасности в морских и речных портах является одним из важнейших условий их стабильной работы. По сравнению с другими объектами в портах чрезвычайные ситуации, связанные с пожарами, происходят достаточно редко. По статистике с 2010 года по настоящее время в целом по Российской Федерации зарегистрировано немногим более 600 пожаров (табл. 1), что не превышает 0,001 % от общего количества пожаров по стране [1]. Вместе с тем, практически каждый пожар дестабилизирует работу порта и нарушает структуру цепей поставок в региональных, национальных и международных логистических системах.

Пожары на судах часто принимают большие размеры и приводят к крупному материальному ущербу. Тушение пожаров на судах, как правило, сопряжено с большими трудностями в оценке обстановки, значительными затратами огнетушащих веществ, привлечением большого количества сил и средств пожарной охраны и служб флота, со сложностью планировки, насыщенностью пожарной нагрузки, отсутствием безопасных путей эвакуации. Практика тушения пожаров показывает, что главными препятствиями являются дым и высокая температура. Тушение пожаров на судах проводится в условиях недостаточного естественного освещения, плотного задымления, высокой температуры и

Таблица 1

Сведения по количеству пожаров в Российской Федерации на объектах морского и речного транспорта гражданского назначения за период с 2010 по 2016 год

Объект пожара	Годы							Общий итог за период с 2010 по 2016 г
	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	
Морское, речное судно*	94	87	82	78	72	83	88	584
Портовое сооружение	4	2	3	7	-	1	1	18
Судоверфь, док	2	1	2	1	3	1	2	12
Общий итог по годам	100	90	87	86	75	85	91	614

Примечание: *учитываются пожары только на гражданских судах, приписанных к портам Российской Федерации.

теплопроводности конструкций судна при большой скорости распространения горения по коридорам, шахтам трапов и вентиляционным каналам [2].

Основными причинами возникновения пожаров на судах и в портах, за период с 2010 по 2016 год являются: нарушение правил пожарной безопасности при проведении электрогазосварочных работ (более 21 % случаев), неосторожное обращение с огнем (20,2 %) и поджоги (14,8 %). В общей сложности за рассматриваемый период от пожаров погибло 12 и пострадало 52 человека. Общая сумма прямого ущерба превысила 164 млн. руб. [1].

Основные статистические показатели [3], характеризующие деятельность оперативных пожарных подразделений по тушению пожаров – это время прибытия пожарных расчетов к месту вызова (на диаграммах (рис. 1) – обозначено «Следование»); время локализации, представляющее собой период времени, необходимый для создания условий ограничения развития пожара в пространстве; и заключительная стадия «ликвидация» – полное прекращение горения на пожаре и создание условий, исключающих повторное возгорание.

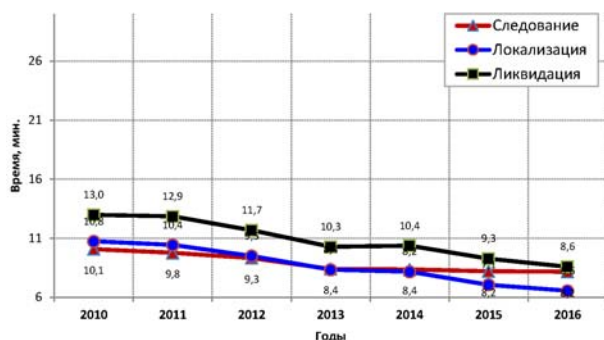


Рис. 1 Основные показатели оперативного реагирования по Российской Федерации за 2010 – 2016 гг.

Общероссийские показатели оперативного реагирования (рис. 1) представляют собой достаточно гладкие кривые с устойчивой тенденцией к снижению. Чего нельзя сказать о данных показателях для объектов морского и речного транспорта (рис. 2).

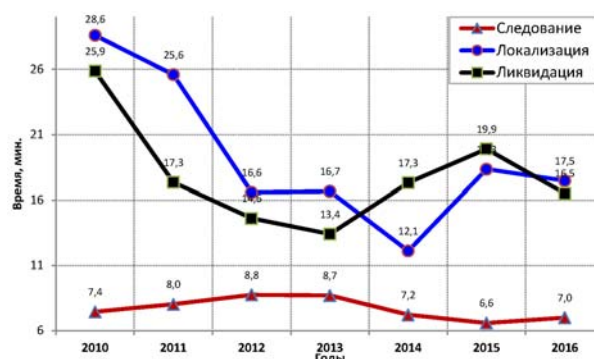


Рис. 2 Основные показатели оперативного реагирования на объектах морского и речного транспорта Российской Федерации за 2010 – 2016 гг.

Предварительная оценка характеристик представленных кривых (рис. 1 и 2) позволяет сделать вывод о более высокой тактической сложности пожаров, возникавших на интересующих нас объектах, что может быть объяснено следующим:

- во-первых, время следования пожарных подразделений на пожары в портах ниже общероссийских показателей, что может быть связано с обеспечением условий для быстрого обнаружения возгорания и передачи сообщения в дежурную службу, а также небольшого расстояния до пожарных депо. Последнее обусловлено тем, что в населенных пунктах пожарные депо, как правило, располагаются как можно ближе к наиболее пожароопасным объектам;

- во-вторых, показатели локализации и ликвидации пожаров в портах значительно выше средних по стране, что свидетельствует о том, что, не смотря на оперативное прибытие пожарных расчетов к месту вызова, для тушения пожара требуется больше времени и, следовательно, привлечение дополнительных сил и средств.

Как уже было сказано выше, динамика общероссийских показателей имеет устойчивый тренд к снижению. Для пожаров на объектах морского и речного транспорта тренды представлены на диаграмме (рис. 3).

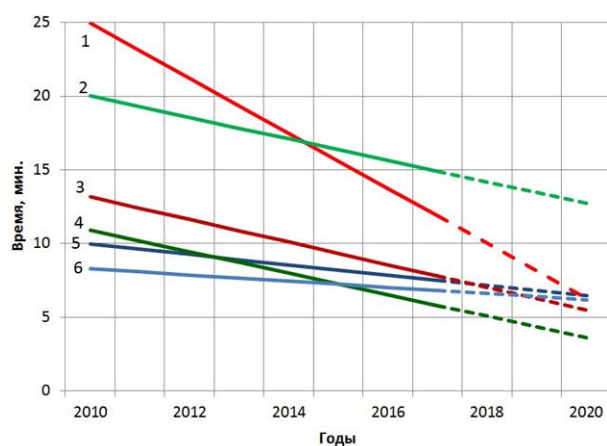


Рис. 3 Тренды (2010-2016 гг.) и прогнозы (до 2020 г.) динамики показателей оперативного реагирования

1 – локализация в портах; 2 – ликвидация в портах;
3 – ликвидация; 4 – локализация; 5 – следование;
6 – следование на пожары в портах.

Пунктиром показаны прогнозы для показателей до 2020 г.

Линейные функции и основные расчетные значения, обосновывающие соответствие вышеназванных трендовых моделей фактической ситуации, а также достоверность прогнозов, приведены в табл. 2.

Коэффициенты детерминации (R^2) всех моделей общероссийских показателей достаточно близки к максимальному значению 1, и относительно низкие значения σ^2 позволяют сделать вывод о том, что предлагаемые зависимости приемлемы для изучения процесса на некотором ограниченном временном интервале. Динамика показателей оперативного реагирования пожарных подразделений на пожары объектов морского и речного транспорта недостаточно хорошо описывается функциональными зависимостями, представленными в табл. 2, но в целом позволяет сделать определенные выводы.

Анализ прогнозов трендовых моделей (рис. 4) показывает, что рассматриваемые показатели оперативного реагирования начинают приближаться к некоторым пороговым значениям, дальнейшее

снижение которых при существующих условиях невозможно. Например, по прогнозу, после 2025 года среднее время локализации пожара в Российской Федерации должно практически приблизиться к нулю, а для пожаров в портах возможно еще раньше. То есть, получается, что на каждый пожар должно прибывать такое количество сил и подаваться такое количество огнетушащих средств, чтобы пожар ликвидировался в тех размерах, какие он принял на момент прибытия пожарных подразделений. Следовательно, сразу после прибытия пожарных к месту вызова, минуя этап локализации, должен наступать этап ликвидации пожара. Такое возможно только в двух случаях:

- если период свободного развития пожара (включающий себя периоды обнаружения, сообщения, следования и другие действия до начала активного тушения пожара) будет относительно непродолжительным, и пожар, возможно, будет ликвидировать силами первого прибывшего к месту вызова подразделения;

- даже на развившемся пожаре будет практически одновременно сосредотачиваться необходимое для его локализации количество сил и средств.

Справедливо предположить, что снижение показателей оперативного реагирования, как направление улучшения эффективности деятельности оперативных пожарных подразделений, когда-то неизбежно достигнет своего естественного предела.

В качестве одного из следующих вариантов решения обозначенной проблемной ситуации возможно:

- 1) принять в качестве ориентировочных некоторые фиксированные значения показателей оперативного реагирования, (возможно дифференцированных для групп регионов) и использовать их в качестве базовых для оценки эффективности деятельности;

- 2) расширить диапазон рассматриваемых причинно-следственных связей и приоритетов в деятельности оперативных пожарных подразделений.

Таблица 2

Функциональные зависимости

№ ¹⁾	Показатель	Объекты	Вид линейной функции ²⁾	Коэффициент детерминации, R^2	Стандартное отклонение, σ^2
5	Следование	Все пожары на территории Российской Федерации	$t = -0,35 d + 10,31$	0,887	0,270
4	Локализация		$t = -0,73 d + 11,64$	0,981	0,224
3	Ликвидация		$t = -0,77 d + 13,95$	0,962	0,331
6	Следование	Объекты морского и речного транспорта	$t = -0,21 d + 8,50$	0,281	0,712
1	Локализация		$t = -1,87 d + 26,83$	0,499	4,048
2	Ликвидация		$t = -0,73 d + 20,75$	0,146	3,973

Примечания: ¹⁾ нумерация строк таблицы соответствует нумерации линий трендов на диаграмме (рис. 3);
²⁾ в функциях приняты относительные значения параметра d , где единице соответствует 2010 год.

Исходя из основной задачи пожарных подразделений (снижение количества случаев гибели и травматизма людей, а также уменьшение материального ущерба, причиняемого пожарами), целесообразно рассмотреть второй из предложенных выше вариантов.

В целях более глубокого исследования обстоятельств пожаров на объектах морского и речного транспорта были использованы методы теории графов. Было определено взаимное влияние 29 факторов: A1 – дата возникновения пожара, год (здесь A1, A2, ... , A29 – условные обозначения факторов); A2 – код субъекта Российской Федерации; A3 – код района субъекта Российской Федерации; A4 – дата возникновения пожара, месяц; A5 – тип пожара (пожар/загорание); A6 – объект пожара; A7 – продолжительность свободного горения, мин.; A8 – время следования первого пожарного подразделения к месту вызова, мин.; A9 – время локализации пожара, мин.; A10 – время ликвидации пожара, мин.; A11 – количество погибших на пожаре, чел.; A12 – причины гибели, код; A13 – условия гибели, код; A14 – количество травмированных на пожаре, чел.; A15 – площадь пожара, м²; A16 – количество пожарных автомобилей, привлекаемых на пожар, ед.; A17 – ущерб от пожара, руб.; A18 – расстояние от ближайшей пожарной части до места пожара, км.; A19 – общее количество стволов, подаваемых на тушение пожара, ед.; A20 – создание штаба пожаротушения (да/нет); A21 – использование СИЗОД (да/нет); A22 – этажность здания, где произошел пожар; A23 – этаж пожара; A24 – степень огнестойкости; A25 – первый РТП; A26 – наиболее старший по должности РТП; A27 – A29 – условия, повлиявшие на развитие пожара до крупных размеров.

Для корректного проведения анализа была выполнена предварительная статистическая обработка исходного массива данных. Затем данные были представлены в виде треугольной корреляционной матрицы F размером 29 × 29 (рис. 4).

Исходные данные для расчетов статистических показателей были взяты из федеральной государственной информационной системы «Федеральный банк данных «Пожары» (ФГИС «Пожары») [3 – 5]. Расчеты выполнялись с использованием СУБД Microsoft Access 2010.

Расчетные значения коэффициентов корреляции, проверялись по статистической значимости. При уровне значимости $\alpha = 0,05$ из 406 связей подтвердилось 107 для прямой корреляционной зависимости и 58 для обратной. Для наглядного представления взаимосвязей матрица F представлена в виде нагруженных неориентированных подграфов с положительными G+ (рис. 5) и G – отрицательными Пирсона.

Перераспределение узлов графов выполнено с использованием алгоритма "Yifan Hu Proportional" компьютерной программы Gephi 0.9.1, толщина связей пропорциональна силе корреляционной связи, а диаметр окружности узла соответствует количеству связей (степени) вершины.

На G+ (рис. 5) показаны такие группы факторов, при которых изменение влияющего фактора в любую сторону приводит к пропорциональному изменению зависимого фактора в ту же сторону. Некоторые связи могут опосредованно определяться влиянием третьего показателя и/или быть только статистическими, но не причинно-следственными. Например, количество пожарных отделений связано с

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29
1		0,001	0,018	-0,01	-0,02	0,106	-0,02	0,002	-0,04	-0,02	-0,01	-0,01	4E-04	-0	0,011	-0,01	4E-04	0,015	-0,01	-0,01	0,04	-0,01	0,06	-0,02	-0	0,001	0,051	0,003	6E-04
2			0,004	-0	-0,01	-0,02	-0	-0,01	0,019	0,01	-0	-0	-0	-0	-0	0,007	-0	-0,01	-0	-0,01	7E-04	-0,01	-0	-0,02	-0,01	-0	-0,01	-0,01	-0
3				-0	-0	-0,01	0,012	-0	0,004	-0,01	-0	-0,01	-0	-0	-0	-0,01	-0	0,008	0,01	-0,01	0,016	-0,01	-0	-0,01	-0,01	-0	-0,05	-0	0,013
4					0,068	0,005	-0,03	-0,02	-0,04	-0,03	0,003	0,007	0,004	0,002	0,003	0,024	-0	-0,01	0,034	0,07	0,031	0,03	0,014	0,066	0,071	0,07	0,014	0,017	0,007
5						-0,01	-0,01	-0,04	0,059	0,025	0,157	0,191	0,166	0,166	0,017	0,48	0,032	-0,01	0,419	0,908	0,44	0,503	0,109	0,908	0,886	0,879	-0	0,256	0,122
6							-0,03	-0,03	-0,03	-0,03	-0,01	-0,01	-0	-0,01	-0	-0,01	-0	-0,03	-0,01	-0,01	-0,01	-0,02	-0	-0	-0,01	-0,01	-0,03	-0,01	-0,01
7								0,91	0,203	0,213	0,018	0,018	-0,01	-0,01	0,024	-0,02	0,008	0,748	0,035	0,019	-0,05	-0,04	-0	0,014	0,018	0,014	0,101	0,054	0,003
8									0,194	0,207	0,01	0,008	-0,01	-0,02	0,024	-0,04	0,002	0,809	0,005	-0,01	-0,07	-0,06	-0	-0,01	-0,01	-0,01	0,085	0,042	0,003
9										0,407	0,058	0,045	0,031	0,033	0,054	0,181	0,031	0,151	0,237	0,059	0,047	0,025	0,011	0,048	0,067	0,071	0,016	0,053	0,007
10											0,035	0,031	0,013	0,011	0,048	0,088	0,019	0,178	0,17	0,039	-0	-0,02	0,004	0,033	0,045	0,044	0,074	0,043	0,007
11												0,693	0,067	0,094	0,004	0,151	0,002	0,016	0,138	0,135	0,142	0,09	0,003	0,139	0,141	0,143	0,008	0,058	0,04
12													0,064	0,078	0,004	0,146	0,001	0,016	0,137	0,168	0,166	0,11	0,004	0,168	0,171	0,172	0,011	0,073	0,043
13														0,76	0,004	0,147	0,007	-0,01	0,102	0,147	0,149	0,163	0,012	0,126	0,148	0,153	-0,01	0,051	0,029
14															0,003	0,16	0,006	-0,02	0,101	0,145	0,164	0,181	0,011	0,12	0,147	0,154	-0,02	0,044	0,026
15																0,04	0,019	0,014	0,056	0,037	0,009	0,002	0,002	0,036	0,04	0,037	0,012	0,028	0,011
16																	0,067	-0,04	0,595	0,42	0,426	0,338	0,077	0,405	0,439	0,473	-0,07	0,278	0,159
17																		0,002	0,072	0,024	0,024	0,011	0,004	0,027	0,028	0,03	-0	0,012	0,01
18																			0,027	0,015	-0,06	-0,06	-0	0,013	0,014	0,009	0,142	0,071	0,015
19																				0,369	0,298	0,133	0,056	0,401	0,381	0,39	0,044	0,249	0,158
20																					0,393	0,456	0,099	0,871	0,955	0,935	0,011	0,234	0,105
21																						0,382	0,084	0,334	0,394	0,421	-0,05	0,13	0,071
22																							0,087	0,302	0,448	0,454	-0,07	0,086	0,029
23																								0,081	0,097	0,101	-0	0,036	0,024
24																									0,854	0,839	0,019	0,248	0,122
25																										0,955	0,009	0,251	0,117
26																											-0,01	0,231	0,103
27																											0,026	-0,03	
28																													0,193
29																													

Рис. 4 Корреляционная матрица F для факторов, характеризующих деятельность оперативных подразделений пожарной охраны за период с 2010 по 2016 г.

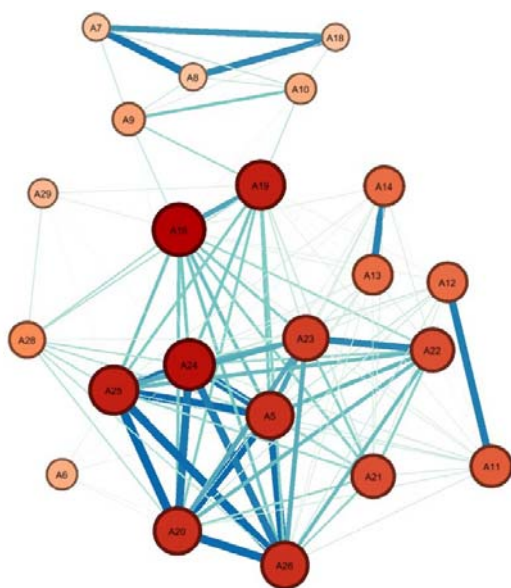
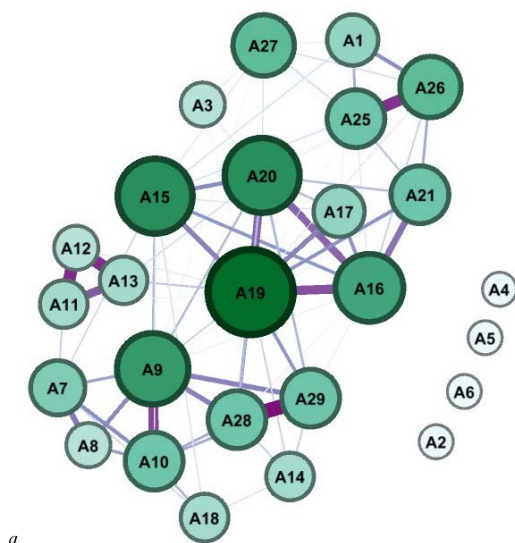


Рис. 5 Условия и факторы деятельности оперативных пожарных подразделений (положительные связи) для всех пожаров Российской Федерации за период с 2010 по 2016 год

количеством погибших людей, хотя известно [4], что основные причины гибели людей являются результатом стечения не рассматриваемых здесь обстоятельств (состояние погибшего, состояние объекта пожара и др.). На G^- (рис. 6) показаны случаи, когда увеличение влияющего фактора приводит к пропорциональному уменьшению зависимого.

Подграфы G^+ и G^- , построенные на основе показателей для пожаров на объектах морского и речного транспорта имеют следующий вид (рис. 7).



а

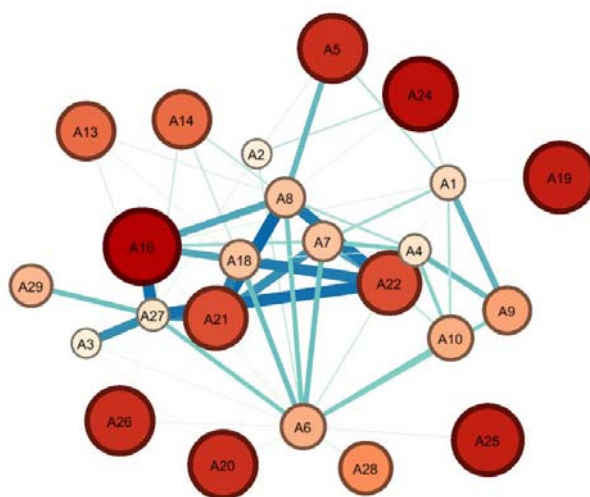
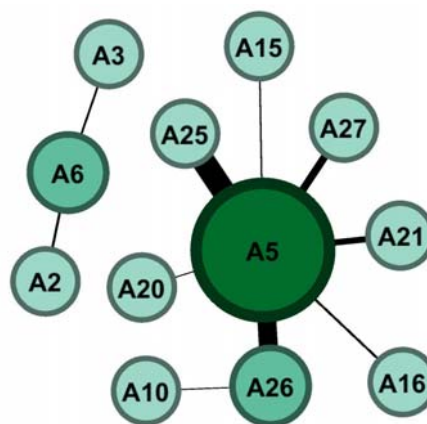


Рис. 6 Условия и факторы деятельности оперативных пожарных подразделений (отрицательные связи) для всех пожаров Российской Федерации за период с 2010 по 2016 год

Для примера рассмотрим некоторые выводы по результатам исследования – G^+ по сравнению с G^- имеет более сложную структуру, плотность первого составляет 0,234, а второго 0,031 (показатель плотности показывает, на сколько граф близок к полному, у которого плотность равна 1). Как было сказано выше, увеличение значения какого-либо отдельного фактора в G^+ приводит к пропорциональному увеличению других, и в данном случае достаточно многих факторов. Например, A15 (площадь пожара) степень данной вершины $\deg(A15) = 12$, то есть увеличение площади горения на пожарах в портах, как правило, приводит к пропорциональному увеличению других 12



б

Рис. 7 Условия и факторы деятельности оперативных пожарных подразделений при пожарах на объектах морского и речного транспорта (а – положительные связи; б – отрицательные связи)

факторов. В G – для вершины A15 есть только одна связь с фактором A5.

Наиболее очевидным практическим выводом из данной ситуации является то, что возрастание масштабов горения и перерастание его из загорания в пожар (A5) может приводить к каскадному увеличению других факторов, и при этом повышение количества привлекаемых для тушения пожара сил и средств (A16, A19) не приводит к увеличению эффективности действий. В этом случае пожар, как правило, переходит в стадию длительного горения и может быть потушен только после выгорания основной массы пожарной нагрузки.

Ценной для практического использования в представленных выше графах является возможность построения логических цепочек и выявление факторов, посредством которых возможно эффективно воздействовать на конечный результат. Например, продолжительность свободного горения A7 (рис. 5) достаточно сильно зависит от расстояния до пожарной части т.к. коэффициент корреляции положительный A18 ($r = 0,748$) и оказывает влияние на продолжительность этапов локализации A9 ($r = 0,203$) и ликвидации A10 ($r = 0,2130$) пожара.

Широко используемый в настоящее время одномерный статистический анализ совокупности данных, состоящих из наблюдений и характеризующих их переменных, заключающийся в рассмотрении каждой отдельной переменной и исследовании их попарной взаимосвязи весьма ограничен. Потому что закономерности и взаимосвязи, присущие всей совокупности, невозможно выявить, исследуя каждую переменную в отдельности. Поэтому наиболее целесообразным, с точки зрения прикладных исследований является многомерный статистический анализ данных [6, 7].

В статье представлены только отдельные выводы о состоянии системы. В целом применение методики многомерного анализа представляет большой практический интерес и позволяет объективно оценить практически весь комплекс показателей, характеризующих деятельность оперативных пожарных подразделений и выявить основные тенденции дальнейшего развития.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пожары и пожарная безопасность в 2016 году: статистический сборник. Под общей редакцией Д.М. Гордиенко. – М.: ВНИИПО, 2017, – 124 с: ил. 40.
2. Повзник Я. С. Пожарная тактика: М.: ЗАО «Спецтехника», 2001. – 416 с.
3. Приказ МЧС РФ №714 от 21.11.2008 «Об утверждении порядка учета пожаров и их последствий»
4. Статистика пожаров в Российской Федерации за 2000-2016 г. [Эл. версия]. <http://www.mchs.gov.ru/stats>.
5. Отчеты по НИР «Анализ действий пожарной охраны при тушении крупных пожаров и проведении связанных с ними аварийно-спасательных работ на территории Российской Федерации», ВНИИПО. 2000 – 2016 гг.
6. Оре О. Теория графов. – 2-е изд. – М.: Наука, 1980. – С. 336.
7. Халафян А.А. STATISTICA 6. Статистический анализ данных. 3-е издание. Учебн. – М.: ООО "Бином-Пресс", 2007. – 512.: ил.

REFERENCES

1. Pozhary i pozharnaya bezopasnost' v 2016 godu: statisticheskiy sbornik. [Fires and fire safety in 2016: a statistical compendium]. Under the General editorship of D. M. Gordienko. Moscow, VNIPO, 2017, 124 p.
2. Povsic Y. S. Pozharnaya taktika [Firefighting tactics]. Moscow, ЗАО "Special Equipment", 2001, 416 p.
3. Prikaz MChS RF №714 ot 21.11.2008 "Ob utverzhdenii poryadka ucheta pozharov i ikh posledstviy" [The order of EMERCOM of the Russian Federation No. 714 dated 21.11.2008 "On approval of accounting fires and their consequences"]
4. Statistika pozharov v Rossiyskoy Federatsii za 2000-2016 g. [Fire statistics in the Russian Federation for 2000-2016]. Available at: <http://www.mchs.gov.ru/stats>.
5. Otchety po NIR "Analiz deystviy pozharnoy okhrany pri tushenii krupnykh pozharov i provedenii svyazannykh s nimi avariynospasatel'nykh rabot na territorii Rossiyskoy Federatsii" [Reports on the research "Analysis of the fire protection to extinguish large fires moat and conducting related rescue operations on the territory of the Russian Federation" of fire prevention]. FGU VNIPO of EMERCOM of Russia, 2000 – 2016.
6. Ore O. Teoriya grafov [Theory of graphs]. 2nd ed. Moscow, Nauka Publ., 1980, 336 p.
7. Khalafyan A. A. STATISTICA 6. Statisticheskiy analiz dannykh. 3-e izdanie. Uchebn. [STATISTICA 6. Statistical analysis of data. 3rd edition. Uchebn]. Moscow, ООО "Binom-Press", 2007. 512 p.



ПРОЧНОСТЬ СУДОВ И ПЛАВУЧИХ СООРУЖЕНИЙ

УДК 629.542.2

РАСЧЕТЫ ПРОЧНОСТИ И ОБОСНОВАНИЕ СПОСОБА РЕМОНТА СУДНА ОГРАНИЧЕННОГО РАЙОНА ПЛАВАНИЯ С ЦЕЛЮ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЕГО БЕЗОПАСНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

О.А. Горетый, ФАУ «Российский морской регистр судоходства», Владивосток,
e-mail: goretiiy.aa@rs-class.org

С.С. Зимин, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург,
e-mail: zimn_sergei@mail.ru

О.Э. Суров, канд. техн. наук, доцент, Дальневосточный федеральный университет, Владивосток,
e-mail: surov.oye@dvfu.ru

М.В. Китаев, канд. техн. наук, доцент, Дальневосточный федеральный университет, Владивосток,
e-mail: kitaev.mv@dvfu.ru

В статье рассматривается проблема обеспечения общей продольной прочности корпуса судна с широким раскрытием палубы. Приведены результаты расчетов при действии изгибающих моментов в вертикальной плоскости. Расчеты выполнены как для случаев построечных толщин, так и с учетом износа связей, входящих в состав эквивалентного бруса. Выполнены расчеты напряженно-деформированного состояния прерывистых связей надстроек корпуса судна с использованием программного комплекса ANSYS. На основе анализа полученных результатов рекомендованы принципиальные схемы подкреплений корпуса в районе миделя и в местах окончания надстроек. Результаты исследования могут быть использованы при проектировании и технической эксплуатации судов с широким раскрытием палуб с целью обеспечения прочности и надежности.

Ключевые слова: изгибающие моменты, прочность, напряженно-деформированное состояние, прерывистые связи

STRENGTH CALCULATIONS AND REPAIR JUSTIFICATION FOR A SHIP OF RESTRICTED NAVIGATION AREA TO ENSURE ITS SAFE OPERATION

O.A. Goretiiy, FAI "Russian Maritime Register of Shipping", Vladivostok, e-mail: goretiiy.aa@rs-class.org

S.S. Zimin, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, e-mail: zimn_sergei@mail.ru

O.E. Surov, PhD, associate professor, Far Eastern Federal University, Vladivostok, e-mail: surov.oye@dvfu.ru

M.V. Kitaev, PhD, associate professor, Far Eastern Federal University, Vladivostok,
e-mail: kitaev.mv@dvfu.ru

The results of longitudinal strength calculations under action of vertical bending moments for a real ship with wide hatch openings are shown in this paper. Verifying calculations have been carried out for as-built thicknesses and actual thicknesses resulted by corrosion of hull girder's elements. Based on the obtained results concept schemes of hull reinforcements have been proposed for safe operation of

the ship. The results of stress and strain state for intermittent hull elements in the areas of superstructures endings are presented based on the ANSYS structural analysis software. The reinforcements of the hull in the places of superstructures endings have been proposed. Obtained results of the research and conclusions can be used for designing and technical operation for strength and reliability provisions of ships with wide hatch openings.

Keywords: hull strength, longitudinal strength, stress and strain state, intermittent hull elements

ВВЕДЕНИЕ

Повреждения судовых конструкций, связанные с нарушением местной и общей прочности и обусловленные появлением трещин в процессе эксплуатации, могут привести к гибели судов и экипажей. Трещины появляются в первую очередь в районах с высокой концентрацией напряжений и в районах конструкций с прерывистыми связями [1, 2, 3, 4]. Задачи, связанные с обеспечением безопасной эксплуатации судов, решаются как на этапе проектирования судна, так и в процессе эксплуатации. Несмотря на большой опыт проектирования судовых конструкций с прерывистыми связями, отмечаются случаи появления значительных повреждений корпуса, которые могут считаться опасными с точки зрения дальнейшей эксплуатации судна.

Высокая концентрация напряжений возникает также в узлах пересечения балок разных направлений, при выполнении технологических вырезов, а также у вырезов люков, дверей, проходов вентиляционных каналов, отверстий для прохода трубопроводов, сварных швов, кабельных трасс, предназначенных для протока воздуха и жидкостей, также у облегчающих вырезов и иллюминаторов.

Многообразие функций, выполняемых вырезами в корпусных конструкциях, приводит к необходимости выбора рациональных форм вырезов и установки соответствующих подкреплений, обеспечивающих приемлемый уровень концентрации напряжений. Размеры и форму вырезов корпусных конструкций стремятся выбрать так, чтобы максимальные напряжения в кромках при нормальных условиях эксплуатации не превышали предела текучести материала, из которого они изготовлены. Однако для ряда конструкций добиться этого оказывается невозможным, и часть материала у кромки выреза работает в упругопластической зоне, т.е. находится в состоянии местной текучести. Подобное явление не безопасно и часто является причиной появления трещин.

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

В качестве объекта для исследования повреждений корпусных конструкций рассмотрим судно смешанного (ограниченного) плавания. По условиям эксплуатации, соотношениям размеров, архитектурно-конструктивному типу эти суда отличаются как от судов внутреннего плавания, так и от морских транспортных судов. Для таких судов характерны большое раскрытие палуб, двойные борта и двойное дно, упрощенное конструктивное оформление ряда узлов соединения набора. Как правило, главные размерения таких судов ограничиваются глубиной фарватера, габаритами шлюзов и извилистостью фарватера внутренних водных путей. В настоящее время в Дальневосточном бассейне эксплуатируется большое количество судов ограниченного и смешанного районов плавания. Не редко у судовладельцев возникают вопросы эксплуатационного характера, связанные с повреждением судовых корпусных конструкций и появлением трещин, что, как правило, обусловлено нарушением общей или местной прочности. Опыт решения подобных задач говорит о том, что появление трещин обусловлено как ошибками в проектировании конструкций, так и несоблюдением эксплуатационных режимов плавания.

В 2016 г. к специалистам кафедры Кораблестроения и океанотехники ИШ ДВФУ обратился судовладелец с просьбой выполнить расчеты остаточной продольной прочности корпуса судна и, в случае необходимости, разработать комплекс мер по его подкреплению. Рассматриваемый мелкогидротранспортный рефрижератор представляет собой двухвинтовое, однопалубное судно, с баком и ютом, с кормовым расположением машинного отделения, с двойным дном и двойными бортами, с наклонным носом и транцевой кормой. На баке расположена двухъярусная надстройка. Общий вид судна показан на рис. 1.

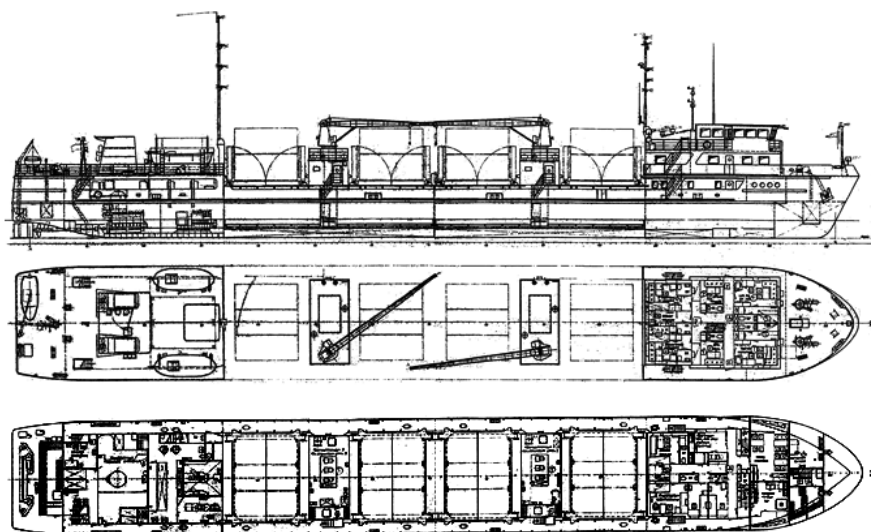


Рис. 1 Общий вид судна

Судно имеет четыре трюма с люковыми закрытиями, обслуживаемыми двумя кранами грузоподъемностью по 3,0 т. Главные размерения судна согласно данным регистражной книги 2017 г.:

- длина расчетная 78,65 м
- ширина теоретическая 11,20 м
- высота борта 3,60 м
- осадка наибольшая 2,50 м
- водоизмещение 1406 т
- дедвейт 1021 т
- мощность главных двигателей 2×330 кВт
- спецификационная скорость 9,8 уз.

Схема поперечного сечения корпуса судна в средней части представлена на рис. 2.

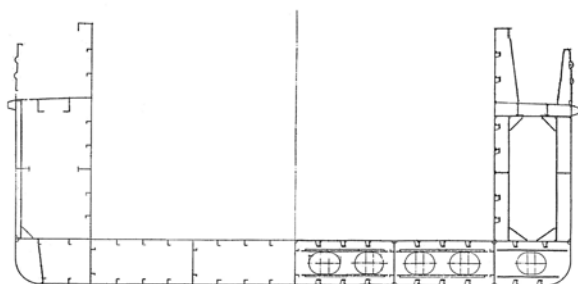


Рис. 2 Схема поперечного сечения в средней части

Причиной беспокойства судовладельца были локальные повреждения элементов корпуса (трещины) в районах прерывистых связей и в углах вырезов в стенке юта (рис. 3, а) и бака (рис. 3, б) в нижней части притыкания надстроек к продольным комингсам как с левого, так и с правого борта (рис. 4 – 9).

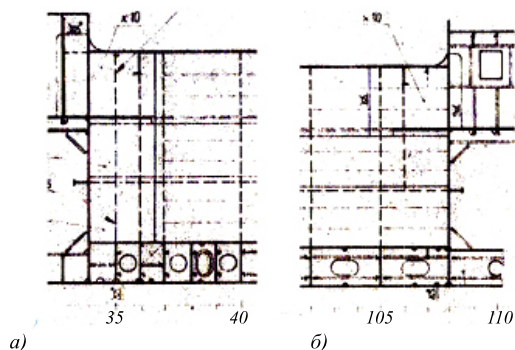


Рис. 3 Схема конструктивного окончания: а – юта; б – бака



Рис. 4 Заваренные трещины в районе окончания бака, левый борт



Рис. 5 Заваренные трещины в районе окончания бака, правый борт



Рис. 6 Заваренные трещины в районе окончания юта, левый борт



Рис. 7 Заваренные трещины в районе окончания юта, левый борт



Рис. 8 Заваренные трещины в районе окончания юта, правый борт

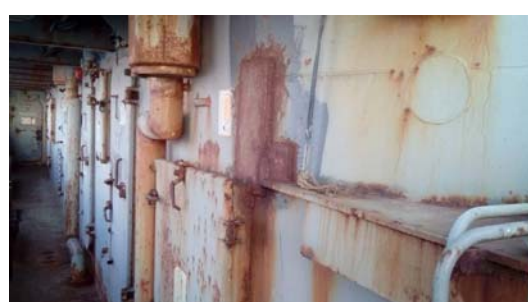


Рис. 9 Вид на ют в районе выреза, правый борт

Наиболее существенные повреждения наблюдаются в районе юта и бака. Так, в кормовой части у надстройки юта наблюдается отрыв переходного узла в нижней части по сварному шву у полки комингса. Эти повреждения обусловлены высокой концентрацией напряжений в связях, резко меняющих сечение по длине.

Высокая концентрация напряжений возникает также в углах вырезов под окна (рис. 4, 5) в стенке надстройки бака, а также в стенке надстройки юта в районе углов вырезов (рис. 6, 9) под двери.

Основной причиной возникновения трещин в указанных элементах корпусных конструкций является неудачно выбранная форма образования свободных кромок переходных книц надстроек, а также углов вырезов. Для устранения рассмотренных повреждений был разработан комплект документов для подкрепления и модернизации указанных узлов конструкций корпуса.

2. РАСЧЕТЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

По согласованию с судовладельцем выполнена оценка прочности в соответствии с требованиями Правил РС [5] с целью определения сжимающих и растягивающих напряжений в связях корпуса. Для расчетов были использованы актуальные результаты замеров остаточной толщины. При выполнении итерационных расчетов эквивалентного бруса с редуцированием сжатых связей палубы и днища,

расчетным способом было выявлено, что у ширстрекка наблюдается потеря устойчивости в случае прогиба корпуса судна.

В табл. 1 представлены результаты сопоставительных расчетов остаточных и допускаемых остаточных моментов сопротивления корпуса. Приведенные данные показывают, что за время эксплуатации судна уменьшение момента сопротивления (в сравнении с построечными значениями) составило: 2,7 % – для комингса; 2,1 % – для расчетной палубы; 4,5 % – для днища. При этом момент сопротивления поперечного сечения у продольного комингса люка для изношенного корпуса приблизился к допустимому пределу согласно требованиям [6] и для долговременной эксплуатации в морских условиях требуется разработка и реализация проекта подкреплений корпуса судна. Для других элементов остаточные характеристики поперечного сечения корпуса находятся в допустимых пределах.

Таблица 1

Сопоставление результатов расчетов для поперечного сечения корпуса

Обозначение	Продольный комингс люка	Палубный стрингер	Днищевая обшивка
Момент сопротивления корпуса $W \times 10^{-6}$, требуемый по [5], см^3	0,3827	0,3827	0,3827
Построечный $W_0 \times 10^{-6}$, см^3	0,3717	0,6745	0,6174
Допускаемый $[W] \times 10^{-6}$ по [6], см^3	0,3584	0,3584	0,3584
Остаточный $W' \times 10^{-6}$, см^3	0,3617	0,6604	0,5894
Запасы прочности, %	0,9 %	84 %	64 %
Напряжения для судна с износом, МПа	149,3	80,5	89,0

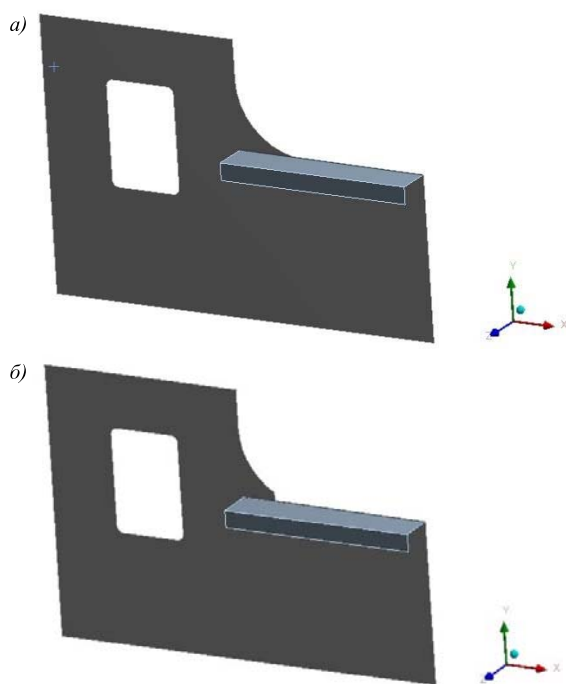


Рис. 10 Расчетная модель фрагмента корпуса:
а – без подрезки окончания надстройки; б – с подрезкой
окончания надстройки

С целью дальнейшей проверки прочности корпуса были выполнены расчеты напряженно-деформированного состояния элементов корпусных конструкций в районах прерывистых связей, а именно стенок надстройки бака (рис. 3, б). Расчет выполнен в программном комплексе конечно-элементного анализа ANSYS (v.17.2). Расчетная модель фрагмента корпуса представлена на рис. 10. Моделирование выполнено в плоской постановке и учитывало два варианта окончания надстройки – без подрезки (рис. 10, а), как для построечного варианта (рис. 3), и с подрезкой переходного листа (рис. 10, б).

Сопряжения элементов модели друг с другом принято жестким; по граням сопряжения модели с неучитываемыми частями корпуса судна накладывались жесткие связи. Результаты расчета представлены на рис. 11 в виде изополей траекторий главных растягивающих напряжений σ_1 , действующих значений главных растягивающих σ_1 , а также сдвигающих τ_{xy} напряжений.

Результаты расчета позволяет отметить следующее:

- наибольшие по значению главные растягивающие напряжения σ_1 и сдвигающие напряжения τ_{xy} возникают в областях входящих углов А и Б отверстия и в области В окончания надстройки;
- траектории главных растягивающих напряжений развиваются: для формы переходного листа как в проектном варианте под углами 30° – в области А,

45° – для района Б, а в области В траектория параллельна наружному контуру пластины; для варианта с подрезкой переходного листа под углами 45° – в области А, $5 - 10^\circ$ – для района Б, а в области В близка к 45° ;

- в области А напряжения σ_1 достигают значения 1050 МПа, в области Б – значения 950 МПа. Влияние подрезки окончания надстройки оказывает негативное воздействие, увеличивая напряжения σ_1 в области В на 10 % до значений $\sigma_1 = 1160$ МПа;

- в области А напряжения τ_{xy} достигают значения 400 МПа, в области Б – значения 350 МПа. Влияние подрезки окончания надстройки оказывает негативное воздействие, увеличивая напряжения τ_{xy} в области В с значения 425 МПа в районе выше таврового сварного шва – без подрезки до значения τ_{xy} 440 МПа в районе таврового сварного шва – с подрезкой.

Анализ результатов численного моделирования позволяет сделать следующие выводы:

1. Подрезка окончания надстройки приводит к усилению концентрации как главных растягивающих напряжений σ_1 , так и сдвигающих напряжений τ_{xy} в месте подрезки, а также усложняет характер напряженно-деформированного состояния в данной области.

2. Значения главных растягивающих σ_1 и сдвигающих τ_{xy} напряжений существенно превышают соответствующие предельные напряжения, что, учитывая траектории напряжений, обуславливают появление в областях А и Б наклонных трещин, а в области В – горизонтальной трещины.

3. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПОДКРЕПЛЕНИЮ КОРПУСА

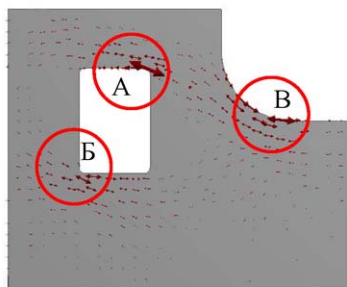
Как показано выше, корпус рассматриваемого судна имеет минимальные запасы прочности при общем изгибе, наблюдаются значительная концентрация напряжений в прерывистых связях, что приводит к появлению трещин и потере устойчивости указанных связей. В таких случаях рекомендуется выполнить подкрепления корпуса в средней части для увеличения момента сопротивления поперечного сечения корпуса и уменьшения напряжений в районах повышенных напряжений.

Ниже на рис. 12 показана схема подкрепления комингса люка и настила верхней палубы, которые испытывают наибольшие напряжения от внешних усилий.

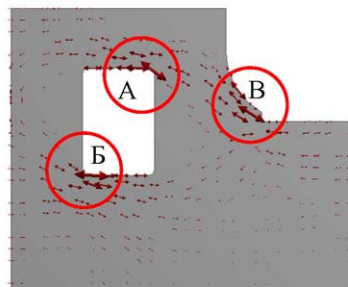
С целью определения рационального варианта подкрепления корпуса судна были выполнены сопоставительные расчеты для нескольких возможных вариантов. Результаты сопоставительных расчетов прочности корпуса судна с учетом различных вариантов подкреплений представлены в табл. 3.

**Вариант модели без подрезки
переходного листа**

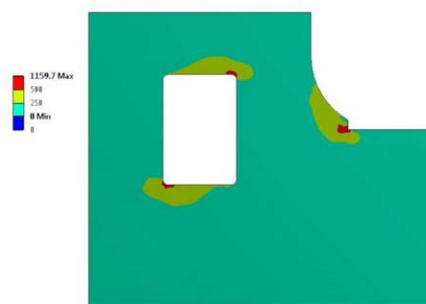
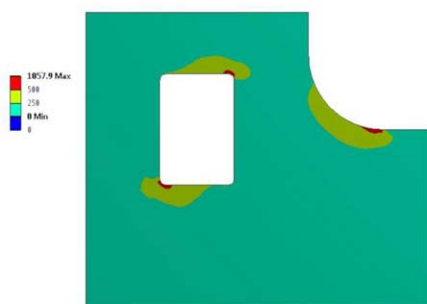
Траектории главных растягивающих напряжений σ_1 и области,
в которых напряжения достигают наибольших значений



**Вариант модели с подрезкой
переходного листа**



Изополе главных растягивающих напряжений σ_1



Изополе сдвигающих напряжений τ_{xy}

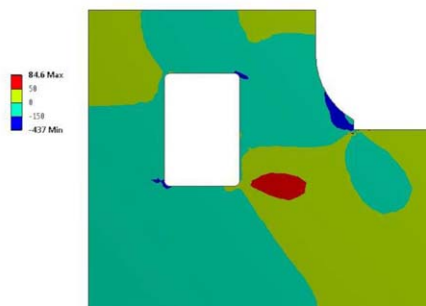
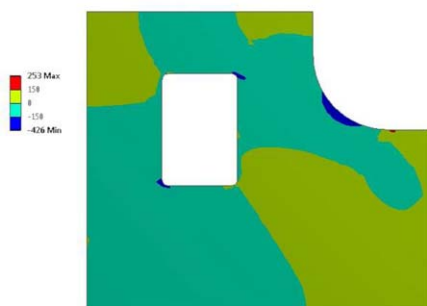


Рис. 11 Результаты расчетов

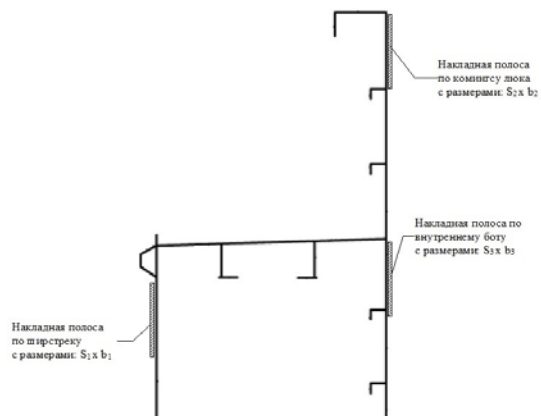


Рис. 12 Схема подкрепления поперечного сечения корпуса

Таблица 3

Сопоставление моментов сопротивления корпуса W с подкреплениями

№	Вариант подкрепления	Комингс люка $W_K \cdot 10^{-6}$, $см^3$	Палуба $W_{ВП} \cdot 10^{-6}$, $см^3$	Днище $W_D \cdot 10^{-6}$, $см^3$	Количество дополни- тельного материала	Стоимость материала, руб.
1	Подкрепление ширстрека накладной полосой 8×400 мм	0,3726	0,6881	0,5880	площадь 18,7 м ² , масса 1,17 т	53000
2	Подкрепление ширстрека накладной полосой 10×500 мм	0,3955	0,7409	0,5992	площадь 23,4 м ² , масса 1,84 т	83000
3	Подкрепление ширстрека и комингса люка накладными полосами 8×400 мм	0,3935	0,7354	0,6000	площадь 34,1 м ² , масса 2,14 т	96000
4	Подкрепление ширстрека и комингса люка накладными полосами 10×500 мм	0,4072	0,7679	0,6056	площадь 42,6 м ² , масса 3,35 т	151000
5	Подкрепление ширстрека и обшивки внутреннего борта накладными полосами 8×400 мм	0,3789	0,7038	0,5879	площадь 34,1 м ² , масса 2,14 т	96000
6	Подкрепление ширстрека и обшивки внутреннего борта накладными полосами 10×500 мм	0,3844	0,7180	0,5872	площадь 42,6 м ² , масса 3,35 т	151000
7	Подкрепление ширстрека, комингса люка и обшивки внутреннего борта накладными полосами 8×400 мм	0,3996	0,7513	0,5997	площадь 49,5 м ² , масса 3,11 т	140000
8	Подкрепление, комингса люка и обшивки внутреннего борта накладными полосами 10×500 мм	0,4166	0,7927	0,6051	площадь 61,9 м ² , масса 4,86 т	219000

В результате анализа возможных вариантов подкреплений по критерию увеличения поперечного момента сопротивления корпуса установлено:

- менее эффективным является вариант № 6: подкрепление ширстрека (30 – 115 шп.) и обшивки внутреннего борта (36 – 106 шп.) накладными полосами 10×500 мм. Увеличение момента сопротивления поперечного сечения корпуса судна составит: для комингса люка – 6 %, для палубы – 9 %, для днища – 0 % при стоимости материала 151000 руб. Удельная цена материалов при увеличении момента сопротивления поперечного сечения корпуса для комингса люка на 1 % составит ≈ 24000 руб.

- эффективный по затратам вариант № 2: подкрепление ширстрека накладной полосой 10×500 мм (30 – 115 шп.). Увеличение момента сопротивления составит: для комингса люка – 9 %, для палубы – 12 %, для днища – 2 % при стоимости материала 83000 руб. Удельная цена материалов при увеличении момента сопротивления поперечного сечения корпуса для комингса люка на 1 % составит ≈ 9000 руб.

- вариант подкреплений № 8: установка накладных полос 10×500 мм по ширстреку (30 – 115 шп.), комингсу люка и по обшивке внутреннего борта (36 – 106 шп.) приводит к максимальному увеличению

момента сопротивления для комингса люка – 15 %, при стоимости материала 219000 руб. Удельная цена материалов при увеличении момента сопротивления поперечного сечения корпуса для комингса люка на 1 % составит ≈ 14500 руб. При этом увеличение фактического момента сопротивления поперечного сечения корпуса для палубы превысит 20 %, что является предметом рассмотрения Регистра.

- наиболее целесообразным представляется вариант № 4: подкрепление ширстрека (30 – 115 шп.) и комингса люка (36 – 106 шп.) накладными полосами 10×500 мм. Увеличение момента сопротивления составит: для комингса люка – 13 %, для палубы – 16 %, для днища – 3 % при стоимости материала 151000 руб. Удельная цена материалов при увеличении момента сопротивления поперечного сечения корпуса для комингса люка на 1 % составит ≈ 12000 руб.

Во всех представленных вариантах при определении окончательной стоимости работ необходимо учитывать технологические вопросы установки накладных полос по комингсу люка в районе межлюковой перемишки (устанавливаемые полосы, должны проходить через поперечные связи, не разрезаясь на них), что может потребовать дополнительных затрат на работы.

Модернизацию узлов притыкания продольных стенок надстроек с продольным комингсом,

показанных на рис. 4 – 9, и имеющих повреждения в виде трещин, рекомендуется производить в соответствии с Правилами РС [5]. Так, бортовую обшивку у концов бака и юта следует продолжить за концевую переборку и плавно по кривой сводить на длине d_1 , м, определяемой по формуле

$$d_1 \geq 0,2(B_2/2 + h),$$

где B_2 - ширина палубы надстройки, измеренная посередине ее длины, м;
 h - высота первого яруса надстройки, м.

Подкрепление углов прямоугольных вырезов в наружных боковых переборках надстроек, имеющих трещины в стенке надстройки бака в районе углов вырезов под окна (рис. 4, 5), а также в стенке надстройки юта в районе углов вырезов под двери (рис. 6, 9) следует выполнять в соответствии с Правилами РС [5]. Углы прямоугольных вырезов должны быть надлежащим образом скруглены, иметь обделочные рамки и быть дополнительно подкреплены утолщенными листами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье приведен пример решения комплексной научно-практической задачи обеспечения безопасной эксплуатации судна смешанного плавания с широким раскрытием палубы, выполненный на основании требований нормативных документов РС, методик инженерного анализа прочности корпусных конструкций, а также оценки стоимости ремонта.

В результате выполненной работы разработаны принципиальные схемы подкреплений корпуса рассматриваемого судна для обеспечения его общей продольной прочности.

Выполнен анализ технического состояния корпуса судна на основе результатов актуальных замеров остаточных толщин, полученных при дефектации связей корпуса. На основании анализа данных дефектации установлено:

- фактические скорости износов связей меньше, чем по Правилам РС;
- средние износы по всем конструкциям не более 15 %.

При осмотре корпуса в период стоянки судна в п. Владивосток в декабре 2016 г. выявлены повреждения, вызванные внешними нагрузками от изгиба корпуса. На фотографиях (рис. 4 – 9) видно, что трещины образуются в районе прерывистых связей, а именно в нижней части притыкания надстроек к продольным комингсам. Высокая концентрация напряжений отмечается также в углах вырезов под окна в стенках надстройки бака, а также в стенке

надстройки юта в районе углов вырезов под двери – характер выявленных трещин идентичен для обоих бортов.

Основной причиной появления трещин в указанных конструкциях корпуса судна является нарушение правил конструирования прерывистых связей, а именно: неудачно выбранная форма образования свободных кромок переходных книц надстроек, а также углов вырезов.

По результатам расчетов напряженно-деформированного состояния прерывистых связей корпуса в районе окончания надстроек в программном комплексе ANSYS установлено:

1. Подрезка окончания надстройки приводит к усилению концентрации как главных растягивающих напряжений σ_1 , так и сдвигающих напряжений τ_{xy} в месте подрезки, а также усложняет характер напряженно-деформированного состояния в данной области.

2. Значения главных растягивающих σ_1 и сдвигающих τ_{xy} напряжений существенно превышают соответствующие предельные напряжения, что, учитывая траектории напряжений, обуславливают появление в областях А и Б наклонных трещин, а в области В – горизонтальной трещины.

По результатам расчетов общей продольной прочности корпуса судна с учетом износа продольных связей без подкреплений корпуса установлено:

1. За время эксплуатации уменьшение момента сопротивления составило: 2,7 % – для комингса люка; 2,1 % – для расчетной палубы; 4,5 % – для днища.

2. Построечные геометрические характеристики поперечных сечений корпуса удовлетворяют требованиям Правил РС, за исключением продольного комингса люка.

3. Остаточный запас общей продольной прочности корпуса без учета подкреплений практически равен нулю.

4. Для долговременной эксплуатации судна в морских условиях требуется разработка и реализация проекта подкреплений корпуса.

По результатам выполненных проверочных расчетов разработаны принципиальные схемы подкреплений корпуса судна. При анализе и сравнении вариантов подкрепления корпуса судна по критерию увеличения поперечного момента сопротивления установлено, что наиболее целесообразным представляется вариант, включающий подкрепления ширстрек и комингса люка накладными полосами 10×500 мм. Увеличение момента сопротивления в этом случае составит: для комингса люка – 13 %, для палубы – 16 %, для днища – 3 %.

Во всех представленных вариантах подкреплений при определении окончательной стоимости работ необходимо учитывать технологические

особенности установки накладных полос по комингсу люка в районе межлюковой перемишки, что может потребовать дополнительных затрат.

На основе расчетов напряженно-деформированного состояния представлены принципиальные схемы модернизации узлов притыкания продольных стенок надстроек бака и юта к продольным комингсам люка, а также подкрепления углов прямоугольных вырезов в переборках надстроек.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барабанов Н.В., Иванов Н.А., Новиков В.В., Шемендюк Г.П. Повреждения и пути совершенствования судовых конструкций. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Судостроение. 1989. – 254 с.
2. Барабанов Н.В. Конструкция корпуса морских судов: в двух томах: учебник Том 2. Местная прочность и проектирование отдельных корпусных конструкций судна. – 4-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Судостроение. 1993. – 336 с.
3. Горетый О.А., Новиков В.В., Суров О.Э., Турмов Г.П. Прочность конструкций судов с широким раскрытием палуб. Учебное пособие, ДВФУ, – Владивосток, 2016. – 146 с.
4. Горетый О.А., Новиков В.В., Суров О.Э., Турмов Г.П. Вопросы прочности судовых конструкций при сложном нагружении. Монография, ДВФУ, – Владивосток, 2016. – 158 с.

5. Правила классификации и постройки морских судов. Российский морской регистр судоходства. – СПб., 2017.
6. Правила классификационных освидетельствований судов в эксплуатации. Российский морской регистр судоходства. – СПб., 2017.

REFERENCES

1. Barabanov N.V., Ivanov N.A., Novikov V.V., Shemendjuk G.P. Povrezhdeniya i puti sovershenstvovaniya sudovykh konstrukcij [Damages and ways of improvements of ships structures]. 2nd ed., Leningrad, Sudostroenie Publ., 1989, 254 p.
2. Barabanov N.V. Konstrukcija korpusa morskikh sudov [Hull construction of sea-going ships]. 2nd vol. Mestnaja prochnost' i proektirovanie otdel'nykh korpusnykh konstrukcij sudna [Local strength and designing of some ship hull structures], 4th ed. St. Petersburg, Sudostroenie Publ., 1993, 336 p.
3. Goretyi O.A., Novikov V.V., Surov O.E., Turmov G.P. Prochnost' konstrukcij sudov s shirokim raskrytiem palub [Strength of structures of ships with wind hatch openings]. Educational book. Vladivostok, FEPU Publ., 2016, 146 p.
4. Goretyi O.A., Novikov V.V., Surov O.E., Turmov G.P. Voprosy prochnosti sudovykh konstrukcij pri slozhnom nagruzenii [Strength questions of hull structures under complex loading]. Monograph. Vladivostok, FEPU Publ., 2016, 158 p.
5. Rules for the Classification and Construction of Sea-Going Ships. Russian Maritime Register of Shipping, St. Petersburg, 2017. (In Russian)
6. Rules for the Classification Surveys of Ships in Service. Russian Maritime Register of Shipping, St. Petersburg, 2017. (In Russian)

УДК 629.5.01

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА «РОЯ ЧАСТИЦ» ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПОПЕРЕЧНОЙ ТАНКЕРНОЙ РАМЫ СОГЛАСНО ТРЕБОВАНИЯМ ОБЩИХ ПРАВИЛ МАКО

Д.А. Алексахин, ФАУ «Российский морской регистр судоходства», Санкт-Петербург,
e-mail: aleksashin.da@rs-class.org

М.С. Бойко, канд. техн. наук, ФАУ «Российский морской регистр судоходства», Санкт-Петербург,
e-mail: boyko.ms@rs-class.org

М.А. Кутейников, д-р техн. наук, ФАУ «Российский морской регистр судоходства», Санкт-Петербург,
e-mail: kuteynikov.ma@rs-class.org

В статье производится постановка и решение задачи автоматизированного параметрического проектирования корпусной конструкции согласно требованиям Гармонизированных Общих правил МАКО. Сложная структура и многокритериальность требований Общих правил МАКО приводит к необходимости использовать новые более совершенные алгоритмы оптимизации. В приведенной статье для решения задачи используется алгоритм оптимизации методом «роя частиц». Приведена формулировка целевой функции применительно к проектированию конструкции поперечной танкерной рамы, состав варьируемых параметров и ограничения задачи. Разработано MATLAB приложение для решения поставленной задачи. В статье приведено общее описание разработанного приложения, состав модулей. Полученные результаты решения задачи параметрического проектирования сопоставлены с данными судна-прототипа.

Ключевые слова: автоматизированное параметрическое проектирование, Гармонизированные Общие правила МАКО, метод «роя частиц», проектирование корпусных конструкций, нефтеналивные суда, поперечные танкерные рамы

APPLICATION OF PARTICLE SWARM OPTIMIZATION ALGORITHM FOR PARAMETRIC DESIGN OF OIL TANKER WEB FRAMES ACCORDING TO IACS COMMON STRUCTURAL RULES

D.A. Aleksashin, FAI "Russian Maritime Register of Shipping", St. Petersburg, e-mail: aleksashin.da@rs-class.org
M.S. Boyko, PhD, FAI "Russian Maritime Register of Shipping", St. Petersburg, e-mail: boyko.ms@rs-class.org
M.A. Kuteynikov, DSc, FAI "Russian Maritime Register of Shipping", St. Petersburg, e-mail: kuteynikov.ma@rs-class.org

The paper provides the task formulation and the task solution as applicable to ship structure design according to IACS Harmonized CSR. Complex rules structure and multiple criteria provided require the application of new and improved optimization algorithms. The article provides the solution of the task by using the particle swarm optimization algorithm. The formulations are provided for goal function as applicable to oil tanker web frame structure, together with the task's variables and limitation. MATLAB application is developed to solve the task. The article provides the general description of the MATLAB application, and the composition of separate modules. The results obtained are compared with those of the prototype vessel.

Keywords: IACS Common Structural Rules, particle swarm optimization algorithm, ship structures design, oil tankers, transverse web frames

ВВЕДЕНИЕ

Современное состояние судостроения характеризуется интенсивным внедрением информационных технологий в проектно-конструкторские работы и процессы обеспечения постройки судов [1]. Вступление в силу Гармонизированных Общих правил МАКО по конструкции и прочности навалочных и нефтеналивных судов [2] поставило перед инженерами-конструкторами новые задачи по разработке алгоритмов и программного обеспечения для выполнения проектных расчетов корпусных конструкций.

Автоматизированное параметрическое проектирование предоставляет инженерам-конструкторам возможность оперативно получать проектные решения, полностью удовлетворяющие требованиям необходимых нормативных документов. Информационные технологии, аккумулируя накопленные знания в предметной области, предоставляют современные программные и технические средства для быстрого и эффективного решения проектных задач.

Постановкой задачи инженерной оптимизации (автоматизированного параметрического проектирования) называется следующая последовательность действий [3]:

- определение границ системы;
- выбор характеристического критерия (функции цели);
- выбор независимых переменных;
- задание математической модели системы.

Конечной целью задачи автоматизированного параметрического проектирования является нахождение глобального экстремума (в большинстве случаев – минимума) функции цели.

Общие правила МАКО характеризуются относительно сложной структурой требований и многокритериальностью. В связи с этим для решения задачи автоматизированного параметрического проектирования конструкций следует использовать математические оптимизационно-поисковые алгоритмы, позволяющие найти оптимальное решение при большом количестве неизвестных параметров и ограничений, с минимальными затратами машинного времени. В ходе проведенного исследования был использован, так называемый, алгоритм роя частиц, разработанный в начале 2000-х годов американскими учеными: Дж. Кеннеди и Р. Эберхартом. В работе [4] был предложен новый мощный оптимизационный алгоритм – метод оптимизации роя частиц (англ. Particle swarm optimization), далее – PSO.

В статье приведена постановка и произведено решение задачи автоматизированного параметрического проектирования поперечной танкерной рамы согласно требованиям Общих правил МАКО с использованием алгоритма PSO.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Снижения массы корпуса – одна из основных задач, решаемых при проектировании конструкции корпуса морских транспортных судов. Для поперечной кольцевой танкерной рамы функция цели для массы материала конструкции будет иметь следующий вид:

$$C(X) = \sum_n (\sum_i A_i \cdot l_i \cdot \rho) + \sum_j (S_j \cdot t_j \cdot \rho) + k_{ct} \cdot A_{ct} \cdot l_{ct} \cdot \rho \quad (1)$$

где: n – количество рассматриваемых рамных балок;
 i – количество листов, из которых состоит стенка n -ной рамной балки;
 A_i – площадь поперечного сечения рамной балки с присоединенным и свободным поясками в i -том сечении, м²;

l_i – ширина i -го листа стенки n -ной рамной балки, м;
 ρ – плотность материала конструкции (стали), т/м³;
 j – количество бракет в рассматриваемой кольцевой раме;
 S_j – площадь j -той brackets в плоскости мидель шпангоута, м²;
 t_j – толщина j -той brackets, м;
 k_{ct} – коэффициент наличия распорки;
 A_{ct} – площадь поперечного сечения распорки, м²;
 l_{ct} – пролет распорки, м.

В качестве независимых переменных принимаются следующие параметры:

• Для рамного бимса и для любого сечения рамной стойки продольной переборки:

h_w – высота стенки балки, мм (точность рассмотрения 5 мм);

t_w – толщина стенки, мм (точность рассмотрения 0,5 мм);

b_f – ширина свободного пояса, мм (точность рассмотрения 0,5 мм);

t_f – толщина свободного пояса, мм (точность рассмотрения 0,5 мм);

R_{eH} – предел текучести материала рамного бимса, МПа. Может принимать значения из следующего ряда: [235, 315, 355, 390];

• Для любого сечения флора и для любого сечения вертикальной диафрагмы двойного борта:

t_w – толщина стенки в рассматриваемом сечении, мм (точность рассмотрения 0,5 мм);

R_{eH} – предел текучести материала флора в рассматриваемом сечении, МПа. Может принимать значения из следующего ряда: [235, 315, 355, 390];

• Для каждой brackets:

d_1 – ширина катета кницы, прилегающего к рассматриваемой балке, мм (точность рассмотрения 5 мм);

d_2 – ширина катета кницы, перпендикулярного к рассматриваемой балке, мм (точность рассмотрения 5 мм);

r – радиус скругления кромки кницы (при наличии), мм (точность рассмотрения 5 мм);

t – толщина стенки рассматриваемой кницы, мм (точность рассмотрения 0,5 мм);

R_{eH} – предел текучести материала рассматриваемой кницы, МПа. Может принимать значения из следующего ряда: [235, 315, 355, 390];

При подготовке исходных данных необходимо задаться количеством проверяемых сечений и количеством книц в рассматриваемой раме. После этого может быть сформирован вектор варьируемых параметров, который будет состоять из наборов варьируемых параметров для каждого сечения и для каждой кницы, входящих в рассматриваемую кольцевую поперечную раму.

На основе анализа требований Правил могут быть сформулированы следующие ограничения для каждой рамной балки:

1) Ограничение на минимальную высоту стенки балки рамного набора имеет вид:

$$h_w - h_{req} \geq 0 \quad (2)$$

где: h_w – фактическая высота стенки балки рамного набора, мм;
 h_{req} – требуемая высота стенки балки рамного набора, определяемая согласно соответствующему пункту Правил, мм.

2) Требование к прочности на изгиб, выраженное через момент сопротивления:

$$Z_{n50} - Z_{n50 req} \geq 0 \quad (3)$$

где: Z_{n50} – фактический нетто-момент сопротивления поперечного сечения рамной балки, включая присоединенный пояс, см³;

$Z_{n50 req}$ – требуемый нетто-момент сопротивления поперечного сечения рамной балки, определяемая согласно соответствующему пункту Правил, см³.

3) Требование к прочности рамной балки на срез, выраженное через площадь поперечного сечения, работающую на срез:

$$A_{n50} - A_{n50 req} \geq 0 \quad (4)$$

где: A_{n50} – фактическая нетто-площадь поперечного сечения рамной балки, работающая на срез, см²;

$A_{n50 req}$ – требуемая нетто-площадь поперечного сечения рамной балки, работающая на срез, определяемая согласно соответствующему пункту Правил, см².

4) Требование к местной устойчивости стенки рамной балки:

$$t'_w - t_{w sl} \geq 0 \quad (5)$$

где:

$$t'_w = t_w - 0,5 t_{w corr} \quad (6)$$

где: t_w – фактическая построечная толщина стенки рамной балки, мм;

$t_{w corr}$ – добавка на износ и коррозию для стенки рассматриваемой рамной балки, мм;

$t_{w sl}$ – требуемая толщина стенки рамной балки по критерию местной устойчивости, определяемая согласно соответствующему пункту Правил, мм.

5) Требование к местной устойчивости пояса рамной балки

$$t'_f - t_{f sl} \geq 0 \quad (7)$$

где:

$$t'_f = t_f - 0,5 t_{f corr} \quad (8)$$

где: t_f – фактическая построечная толщина свободного пояса рамной балки, мм;

$t_{f corr}$ – добавка на износ и коррозию для свободного рассматриваемой рамной балки, мм;

$t_{f sl}$ – требуемая толщина свободного пояса рамной балки по критерию местной устойчивости, определяемая согласно соответствующему пункту Правил, мм;

6) Требование к соотношению момента инерции рамного бимса и момента инерции балки основного набора палубы:

$$I_{n50\ 80} - I_{st req} \geq 0 \quad (9)$$

$I_{n50\ 80}$ – нетто момент инерции рамного бимса с присоединенным пояском, имеющим ширину 0,8S, см⁴;

$I_{st req}$ – момент инерции балки основного набора, определяемая согласно соответствующему пункту Правил, см⁴.

Для каждой из рамных балок, входящих в расчетную схему, используются только те ограничения, которые требуются Правилами для каждой конкретной рамной балки.

Таким образом задача параметрического проектирования поперечной рамы нефтеналивного судна представляет собой задачу минимизации функции (1) при ограничениях, представленных выше.

РАЗРАБОТКА ПО ДЛЯ РЕШЕНИЯ ПОСТАВЛЕННОЙ ЗАДАЧИ

Для решения сформулированной задачи было разработано MATLAB приложение, реализующее итерационный проектировочный расчет поперечной рамы нефтеналивного судна согласно требованиям Правил МАКО с использованием оптимизационного алгоритма PSO.

Приложение имеет модульную структуру, представленную на рис 1.

Управление программой и своевременное подключение необходимых модулей осуществляется главным исполняемым файлом *PSO_TWT_main.m*.

Модуль исходных данных

В этом модуле происходит считывание основных исходных данных по тестируемому судну, подключается функция цели, задаются области допустимых значений варьируемых параметров,

задаются параметры оптимизации (количество точек в решении и количество итераций), см. рис. 2.

В файле *General_Data.txt* находится общая информация по рассматриваемому судну, в файле *Scheme.txt* находится информация о расчетной схеме рассматриваемой поперечной рамы: номер схемы согласно идеологии Правил, геометрические пролеты рамных связей и некоторые другие характеристики. В файл *Brackets.txt* записывается информация о типе подкрепляющих книц, в файл *Compartments.txt* необходимые для расчета нагрузок данные по отсекам. В файле *Plates.txt* находится информация о положении сечений, которые будут проверяться в процессе проектирования.

Модуль генерации решения

В этом модуле осуществляется: в случае первого решения – генерирование, в случае цикла PSO – модификация точек решения, а также задание полученным значениям необходимой точности и проверка на соответствие сортаменту.

Модуль проверочного расчета

В этом модуле выполняется расчет фактический и требуемых согласно Правил МАКО характеристик поперечных рамных балок. Находятся соотношения этих характеристик. Схема модуля и подключаемых подмодулей представлена на рис. 3.

На этапе расчета требуемых характеристик в подмодулях класса *require_xx.m* производится расчет требуемых характеристик для рассматриваемой

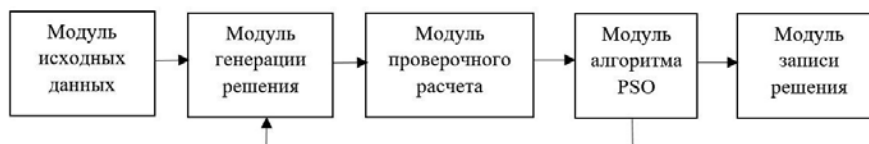


Рис. 1 Структура модулей разработанного MATLAB приложения



Рис. 2 Схема модуля исходных данных и подключаемых подмодулей и файлов

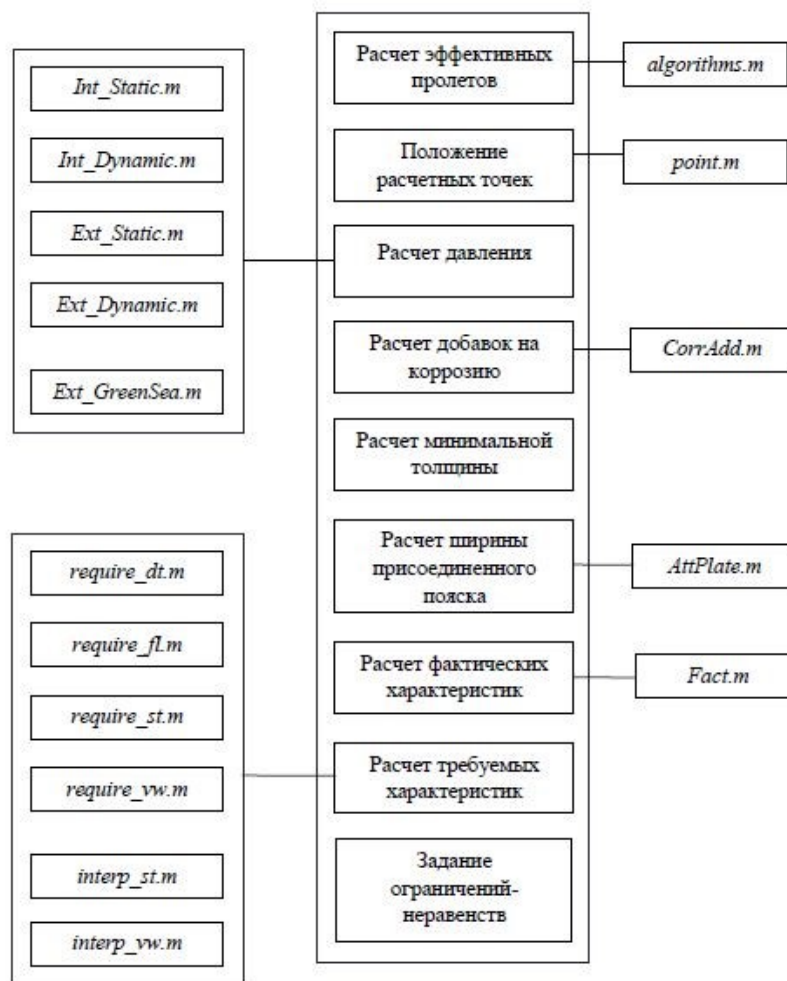


Рис. 3 Схема модуля проверочного расчета и подключаемых подмодулей

рамной балки в заданных требованиях Правил сечениях, в подмодулях класса *interp_xx.m* происходит пересчет требуемых характеристик для конкретного, заданного в исходных данных сечения.

Модуль алгоритма PSO

В данном модуле происходит анализ соотношений, полученных в модуле проверочного расчета, расчет величины функции цели, осуществляется управление итерационными процессами оптимизационного цикла PSO.

Модуль записи решения

После выхода из оптимизационного цикла данный модуль производит запись решения в файл и построение необходимой графической информации о решении.

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ

Для тестирования программного обеспечения, разработанного в ходе данной работы, был

выполнен тестовый расчет на примере танкера 300 000 DWT. Исходные данные для записи в файлы *General_data.txt*, *Scheme.txt*, *Brackets.txt*, *Compartments.txt* и *Plates.txt* представлены в табл. 1 – 3.

Таблица 1
Исходные данные по тестируемому судну для записи в файл *General_data.txt*

№ п/п	Величина	Обозначение	Значение	Единица измерения
1	Длина расчетная	L	315,82	м
2	Ширина	B	58	м
3	Ширина в рассматриваемом сечении	B_x	58	м
4	Высота борта	D	32	м
5	Расчетная осадка	T_{SC}	22	м
6	Балластная осадка	T_{BALL}	10,067	м
7	Коэффициент полноты	C_B	0,823	-

Таблица 2
Исходные данные по тестируемому судну для записи в файл
Scheme.txt

№ п/п	Величина	Обозначение	Значение	Единица измерения
1	Номер расчетной схемы	—	1	—
2	Высота второго дна	h_{DB}	3000	мм
3	Ширина двойного борта	h_{ST}	3520	мм
4	Фактический пролет рамного бимса в бортовом танке	$l_{dt\ WT}$	14,56	м
5	Фактический пролет рамного бимса в центральном танке	$l_{dt\ CT}$	16,53	м
6	Фактический пролет рамной стойки	l_{vw}	25,67	м
7	Фактический пролет флора в бортовом танке	$l_{fl\ WT}$	10,01	м
8	Фактический пролет флора в центральном танке	$l_{fl\ CT}$	16,38	м
9	Фактический пролет вертикальной диафрагмы	l_{ST}	26,687	м

В качестве расчетных рассматривались сечения, совпадающие с нижними (по высоте) и наиболее удаленными от ДП (по ширине) кромками листов, образующих стенку рассматриваемой рамной балки.

Используя разработанное MATLAB приложение *PSO_TWT* было выполнено решение задачи параметрического проектирования поперечной танкерной рамы нефтеналивного судна в постановке, показанной в предыдущих пунктах данной статьи.

Таблица 3
Исходные данные по тестируемому судну для записи в файл
Brackets.txt

№ п/п	Рассматриваемая балка	Значение параметра (правая кница и левая кница соответственно)
1	Флор в бортовом танке	12, 11
2	Флор в центральном танке	0, 12
3	Бимс в центральном танке	22, 22
4	Бимс в бортовом танке	22, 0
5	Вертикальная диафрагма двойного борта	1, 12
6	Рамная стойка продольной переборки	22, 22

При такой постановке задачи число варьируемых параметров D и количество ограничений G будут равны соответственно:

$$\begin{aligned} D &= 101 \\ G &= 83 \end{aligned} \quad (10)$$

Для решения задачи алгоритм выполнил 350 итераций. Такой большое число повторений обусловлено многомерностью пространства поиска и большим количеством варьируемых параметров. Зависимость значения величины функции цели для лучшего решения в итерации от числа итераций представлена на рис. 4.

Наличие горизонтальных участков на графике означает, что в данных итерациях позиция лучшего решения не изменялась, однако остальные точки продолжали осуществлять движение в рамках этих итераций, что в итоге привело к нахождению лучшего решения и продолжению поиска.

По полученным данным видно, что на стадии preliminary расчета по требованиям Общих правил МАКО массу рассматриваемой схемы поперечной

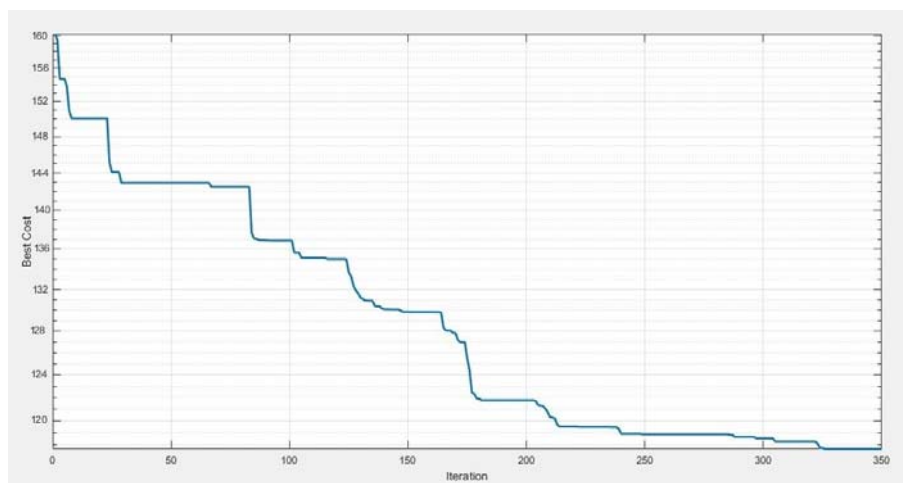


Рис. 4 Зависимость значения величины функции цели для лучшего решения в итерации от числа итераций

Таблица 4

Сравнение проектного решения и решения, полученного при помощи PSO

№ п/п	Рамная балка	Масса, т	Решение, т	Результат
1	Бимс в бортовом танке (DTWT)	9,74	8,53	– 12%
2	Бимс в центральном танке (DTCT)	10,08	10,7	+6%
3	Рамная стока продольной переборки (VW)	23,03	20,85	– 9,4%
4	Флор в бортовом танке (DBFWT)	9,36	7,93	– 15,3%
5	Флор в центральном танке (DBFCT)	28,01	27,89	– 0,42%
6	Вертикальная диафрагма двойного борта (VW)	41,16	37,2	– 9,48%
7	Кницы (BR)	6,21	5,73	– 8,37%
8	Сумма	127,67	118,85	– 6,91%

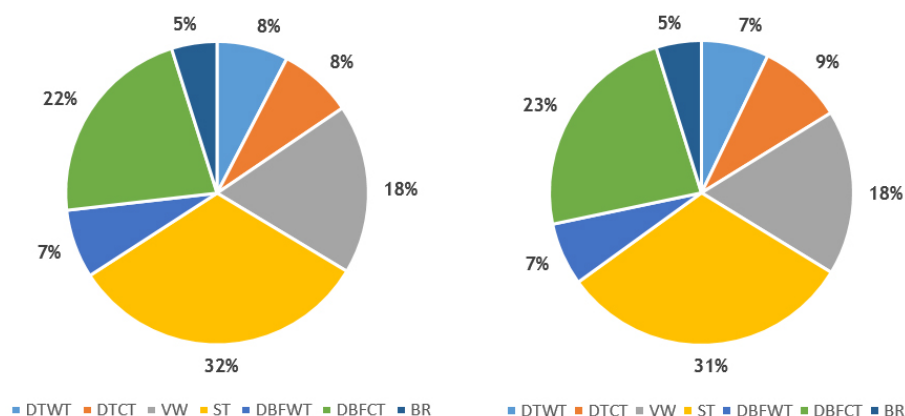


Рис. 5 Сравнение распределение массы по конструктивным элементам поперечной рамы рассматриваемого судна

танкерной рамы удалось сократить на 6,91 %. Распределение массы материала по конструкции осталось при этом практически неизменным.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

Анализ требований предварительной (проектировочной, prescriptive) части Гармонизированных Общих правил МАКО для поперечных рамных связей нефтеналивных судов позволил выполнить постановку задачи автоматизированного параметрического проектирования поперечной танкерной рамы нефтеналивного судна. Показано, что задачи согласно требованиям Общих правил МАКО отличаются многокритериальностью и требуют большого количества ограничений. В связи с этим для решения задачи следует исследовать возможности применения принципиально новых оптимизационных алгоритмов для решения поставленной оптимизационной задачи. Решение поставленной задачи было получено при помощи разработанного MATLAB приложения с

использованием алгоритма метода PSO. Полученный результат позволяет говорить о возможности успешного применения алгоритма PSO для решения задач параметрического проектирования судовых корпусных конструкций согласно требованиям Общих правил МАКО. Масса материала для полученного решения всего на 7 % расходится с принятым проектным решением, что показывает правильность работы алгоритма даже при решении таких многокритериальных задач проектирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тряскин В.Н., Автоматизированное параметрическое проектирование конструкций корпуса судна: учебное пособие/ СПбГМТУ. – СПб., 2010. – 137с.
2. IACS Common Structural Rules for Bulk Carriers and Oil Tankers, IACS, 2017
3. Реклейтис Г., Рейвиндран А., Рэгсдел К., «Оптимизация в технике», в 2-х кн, М.: Мир, 1986, - 226 с.
4. Eberhart, R. C., & Kennedy, J. (1995). A new optimizer using particle swarm theory. In Proceedings of the sixth international symposium on micro machine and human science (pp. 39–43), Nagoya, Japan.

REFERENCES

1. Tryaskin V.N. Avtomatizirovannoe parametricheskoe proektirovaniye konstruksiy korpusa sudna [Automated parametric design of hull construction]. St. Petersburg, SMTU, 2010, 137 p.
2. IACS Common Structural Rules for Bulk Carriers and Oil Tankers, IACS, 2017.
3. Rekleytis G., Reyvindran A., Regsdel K. Optimizatsiya v tekhnike [Optimization in technic]. Moscow, Mir Publ., 1986, 226 p.
4. Eberhart, R. C., & Kennedy, J. (1995). A new optimizer using particle swarm theory. In Proceedings of the sixth international symposium on micro machine and human science (pp. 39–43), Nagoya, Japan.

ПАМЯТИ ПРОФЕССОРА ВИТАЛИЯ ВАСИЛЬЕВИЧА КОЗЛЯКОВА



20 июня 2017 года на 90-м году жизни скончался выдающийся ученый с мировым именем Виталий Васильевич Козляков. Жизненный путь Виталия Васильевича неразрывно связан с судостроением, решением важнейших задач обеспечения прочности и надежности корпусных конструкций.

Виталий Васильевич Козляков родился 9 апреля 1928 года в Новосибирске. В 1944 году поступил в Новосибирский институт военных инженеров ж/д транспорта на факультет мостов и туннелей. В 1946 году перевелся на II-й курс Ленинградского кораблестроительного института на кораблестроительный факультет и с отличием окончил его в 1951 г. Затем В.В. Козляков был принят в очную аспирантуру ЛКИ при кафедре строительной механики корабля и в 1954 году защитил кандидатскую диссертацию «Расчет днищевых перекрытий транспортных судов». В 1970 г. последовала успешная защита докторской диссертации на тему «Вопросы оценки прочности и надежности корпусных конструкций морских транспортных судов».

Дальнейшая деятельность Виталия Васильевича неразрывно связана с Одесским институтом инженеров морского флота (ОИИМФ). В 1971 году он был избран на должность профессора и заведующего кафедрой «Сопротивление материалов и строительная механика корабля». Новый заведующий кафедрой возглавил важное научное направление, связанное с совершенствованием методов прочностного анализа и обеспечения надежности судовых конструкций. В 1986-1996 годах В.В. Козляков занимал должность заведующего кафедрой «Строительная механика и конструкция корпуса» ОИИМФ, с 1997 года – профессор кафедры «Сопротивление материалов и строительной механики корабля», затем профессор кафедры «Теория и проектирование корабля».

С 1991 года Виталий Васильевич принимал активное участие в работе Международного конгресса по судовым конструкциям (ISSC), с 1993 года – член (Fellow) Английского Королевского института морских инженеров (RINA). С 1995 года – член Академии наук судостроения Украины и член Американского общества кораблестроителей и морских инженеров (SNAME).

Виталий Васильевич с 1956 г. являлся членом Научно-технического совета Российского морского регистра судоходства. В 2003 г. удостоен звания Почетного работника Российского морского регистра судоходства. Работы В.В. Козлякова внесли существенный вклад в развитие современных требований Регистра к конструкции и прочности судов, обеспечили интенсивное развитие отечественной науки.



МОРЕХОДНЫЕ КАЧЕСТВА СУДОВ

УДК 532.5

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НЕКОТОРЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ ФОРМЫ КОРПУСОВ ГЛИССИРУЮЩИХ СУДОВ НА ИХ СОПРОТИВЛЕНИЕ ЧИСЛЕННЫМИ МЕТОДАМИ

Е.Ю. Чебан, канд. техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Волжский государственный университет водного транспорта», Нижний Новгород, e-mail: egor.cheban.2@gmail.com

Д.В. Никущенко, д-р техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет», Санкт-Петербург, e-mail: ndmitry@list.ru

Несоответствие формы корпуса маломерных судов условиям эксплуатации может приводить к опасным аварийным ситуациям, например, при возникновении дельфинирования. Поэтому при проектировании таких судов необходима тщательная проработка формы корпуса. Целью выполненной работы являлось исследование гидродинамических характеристик маломерного катера и разработка на их основе основных проектно-технических решений по созданию оптимального по кораблестроительным элементам и конструктивным характеристикам скоростного глиссирующего катера. В статье приводятся результаты исследования влияния поперечного редана и гидролыжи на сопротивление скоростного маломерного глиссирующего судна. Для исследования были использованы методы вычислительной гидродинамики, реализованные в программном комплексе NUMECA/FineMarineTM. Выполнено исследование влияния моделей турбулентности и размеров расчетной сетки на результаты моделирования. Обосновано использование k- ω SST модели турбулентности для моделирования движения скоростных маломерных судов без учета движителя. Произведено сравнение результатов численных и полномасштабных буксировочных испытаний, которое показало хорошее соответствие. Показано, что программный комплекс NUMECA/FineMarineTM может быть использован для исследования гидродинамических характеристик скоростных маломерных судов. Полученные результаты нашли практическое применение, в том числе на этапе эскизного и технического проектов.

Ключевые слова: вычислительная гидродинамика, глиссирование, скоростное судно, дельфинирование, редан, гидролыжа, буксировочные испытания, NUMECA FINE/Marine

STUDY OF THE EFFECT OF A SPEED BOAT HULL DESIGN ON WATER RESISTANCE BY NUMERICAL METHODS

E.Yu. Cheban, PhD, associate professor, Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, e-mail: egor.cheban.2@gmail.com

D.V. Nikuschenko, DSc, associate professor, St. Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, e-mail: ndmitry@list.ru

Poor compliance of a speed boat's hull form with the operating conditions may lead to dangerous emergencies, for instance, in case of porpoising. Therefore, it is important to give special consideration to the hull design at the design stage. The article provides a numerical study of the effects of step-hull and hydro-ski-hull design of a planing boat on the water resistance. The main purpose of this study has been to reliably predict the hydrodynamic characteristics for different boat hull shape designs, using the NUMECA/FineMarineTM software. Different turbulence models have been observed and their effects for the water resistance were investigated. Analysis of the flow fields around planing boats hulls has been given. Changing of a trim angle and draft have also been described for both cases. Comparison of numerical results has been shown to be in good agreement with towing tests. The results of this study have been used for creating the technical design project of a new speed boat.

Keywords: computer fluid dynamics, planing, speed boat, porpoising stability, stepped hull, hydro-ski, towing test, NUMECA FINE/Marine

ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на большое разнообразие предлагаемых на рынке маломерных судов, эксплуатационные качества многих из них оставляют желать лучшего.

Движение скоростного глиссирующего судна по поверхности воды сопровождается комплексом сложных физических явлений, таких как перераспределение давлений по поверхности корпуса, брызгообразование и многие другие, достаточно полный учет которых на данный момент не представляется возможным. Поэтому разработка точной, вполне исчерпывающей теории, объясняющей законы глиссирования, является сложной задачей.

Фундаментальные исследования гидродинамики глиссирующих поверхностей проводились во многих странах в течение более 80 лет и в основном были направлены на проработку гидродинамического дизайна гидросамолетов и, в несколько меньшей степени, на развитие глиссирующих лодок. Позднее, с развитием скоростного гражданского флота, исследования акцентировались на определении оптимальных форм корпусов глиссирующих катеров и судов на подводных крыльях.

Некоторые исследования призматических глиссирующих поверхностей были выполнены Baker [1] в 1910 г., но первые комплексные эксперименты были сделаны Зотторфом [2]. После этого последовали исследования Shoemaker [3], Sambraus [4], Седова [38] и Locke [5], которые отражены в значительном объеме экспериментальных данных, описывающих гидродинамические характеристики призматической глиссирующей пластины с постоянной килеватостью при фиксированных дифференте и смоченной длине, а также постоянной скорости. Для практического использования этих данных было желательно установить эмпирические соотношения, которые позволили бы адекватно связать между собой параметры глиссирования и подъемную силу, силу сопротивления, кренящий и дифференцирующий моменты, площадь смоченной поверхности. В 1947 году в лаборатории Дэвидсона Института технологий Стивенсона были выполнены теоретические исследования и анализ экспериментальных данных явления глиссирования, в результате которых были получены закономерности, которые описывали всплытие глиссирующей поверхности, сопротивление, смоченную поверхность, распределение давления, действующие силы, форму кильватерного следа, формирование брызг, динамическую устойчивость в том числе и для параллельно глиссирующих пластин.

В 1949 Корвин-Кроковский и Савитский [6] опубликовали отчет по исследованию глиссирования, в том числе сопротивления и подъемной

силы для смоченной поверхности, и в 1950 году Мюррэй [7] использовал эти результаты для разработки расчетной процедуры с целью оценки эффективности глиссирования. В 1954 году Савитский и Нейдингер [8] разработали набор эмпирических уравнений для расчета глиссирования, которые увеличили диапазон применимости параметров за пределами разработанных ранее [6]. Большой объем исследований гидродинамики реданных корпусов был произведен Е. Клементом [9]. Кроме того, вопросами теории глиссирования занимались многие выдающиеся ученые: С.А. Чаплыгин, Г. Е. Павленко, Н.А. Соколов, Н.С. Володин, А.М. Ваганов, К.П. Харитонов, Я.И. Войткунский, которые разработали основы современной теории глиссирования и методы расчета сопротивления глиссирующих судов.

В России существуют хорошо зарекомендовавшие себя типы маломерных судов, которые, однако, оказываются неконкурентоспособными по сравнению с иностранными образцами в силу того, что гидродинамический дизайн таких судов длительное время в России широко не развивался. Одним из способов создания маломерного судна, способного конкурировать с иностранными образцами маломерного флота и заменить их, может быть глубокая модернизация существующих отечественных конструкций.

Целью настоящей работы являлось исследование гидродинамических характеристик и разработка на их основе основных проектно-технических решений по созданию оптимального по кораблестроительным элементам и конструктивным характеристикам скоростного глиссирующего катера.

1. ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И АПРОБАЦИЯ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКТА NUMECA/FINEMARINE™ НА ОСНОВЕ НАТУРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

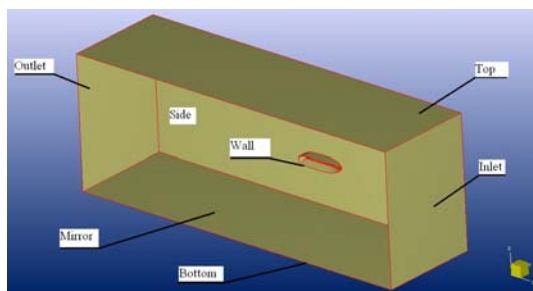
В настоящее время использование коммерческих расчетных комплексов для прогнозирования гидродинамических характеристик (ГДХ) судов в ходе их проектирования становится общеупотребительным. Это связано как с высоким качеством определения ГДХ с одной стороны, так и с удобным пользовательским интерфейсом и документированностью программного обеспечения. В настоящем исследовании использовался программный комплекс NUMECA/FineMarine™, основанный на подходе RANS и предназначенный для решения специализированных задач корабельной гидродинамики, включая определение сопротивления движению судна, расчет маневренных качеств, моделирование кавитации и работы движителей [10, 11, 11 – 19].

Исследования буксировочного сопротивления судов в условиях ходовых испытаний, выполненные ранее в программном комплексе NUMECA/FineMarine™ для различных судов и объектов, свидетельствуют о хорошем соответствии расчетных и экспериментальных результатов [11 – 19].

С целью анализа возможностей программного комплекса NUMECA/FineMarine™ в настоящей работе было выполнено сравнение результатов численного моделирования и натурных буксировочных испытаний модели катера длиной 1,35 м (в масштабе 1:4), предоставленных ООО «НПП «Спиннинглайн боатс». В ходе испытаний сопротивление измерялось динамометром с борта катера-буксировщика с возможностью движения модели катера со всеми степенями свободы.



Рис. 1 Общий вид модели катера и его твердотельной геометрии в масштабе 1:4



1.	Длина в нос	1 длина корпуса – 1,35 м
2.	Ширина	1,5 длины корпуса – 2 м
3.	Длина в корму	5 длин корпуса – 7 м
4.	Глубина	2,5 м

Рис. 2 Общий вид и размеры расчетной области

Таблица 1

Граничные условия на границах расчетной области

Грани	Тип граничного условия
Верх и дно (Top and bottom)	"Prescribed pressure" > "Updated hydrostatic pressure"
Выход-вход-боковая грань (Outlet, Side, Inlet)	"Far field" (velocity components equal to zero)
Плоскость симметрии (Mirror)	"mirror" (symmetry)
Корпус катера	all solids – "Wall function"
Палуба	"Slip" (zero shear stress)

ление трения для глиссирующих судов существенно ниже, чем для водоизмещающих, поэтому в соответствии с [10, 11] параметр y^+ был принят равным 100, и основное внимание уделялось разрешению корабельных волн на свободной поверхности. Для более точного расчета в области гидродинамического следа и области изменения положения корпуса судна была введена область с более мелкой сеткой. Параметры сетки приведены в табл. 2, на рис. 3 показан вид сетки средней плотности.

Кроме сеточной независимости, в ходе моделирования было выполнено исследование влияния моделей турбулентности (k- ω SST, DES SST и EASM), используемых в NU-MECA/FineMarineTM, на величину сопротивления модели. Использовалась нестационарная постановка задачи, катер имел три степени свободы: движение вперед, изменение осадки и угла дифферента. Был задан $\frac{1}{2}$ и $\frac{1}{4}$ синусоидальный закон разгона катера, время разгона соответствовало реальному времени разгона модели. Для проверки сопротивления были заданы скорости: 5,56; 9,72; 11,2 м/с.

Результаты моделирования при сетке средней плотности (рис. 4) показывают неплохое совпадение с экспериментальными результатами, что позволяет сделать вывод о том, что точность численного

моделирования достаточна для дальнейших исследований. При малых скоростях различие может быть связано, во-первых, с масштабными эффектами используемой модели турбулентности, а во-вторых, с некоторым дельфинированием катера в пределах 10 мм, которое, как показывает моделирование, возникает при скорости 5,56 м/с. При более высоких скоростях движения дельфинирования не наблюдалось. Необходимо отметить, что в случае испытаний модели на открытой воде буксировкой другим катером около борта, возможно влияние движущегося рядом корпуса, что необходимо проверить в ходе дополнительных исследований. Сравнение моделей турбулентности (рис. 5) показывает, что при рассматриваемых скоростях движения даже относительно небольших судов, результаты отличаются несущественно. Влияние модели EASM, которая учитывает вращательное движение, может быть существенно при моделировании катера с двигателем.

На рис. 6 представлена форма свободной и смоченной поверхности для трех вариантов сетки при скорости 11,2 м/с. Из рисунков можно сделать вывод, что более подробная сетка обеспечивает более детальное разрешение свободной поверхности, что может оказать существенное влияние на волновую и брызговую составляющие сопротивления. В ряде

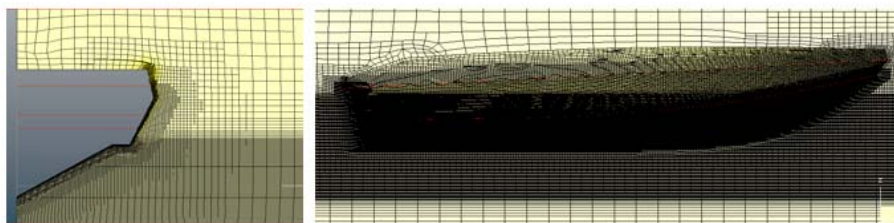


Рис. 3 Расчетная сетка средней плотности 2 343 021 ячеек

Таблица 2

Параметры расчетных сеток

	Низкая плотность	Средняя плотность	Высокая плотность
Начальная сетка	250	528	1280
Адаптация геометрии:			
днище в корме	8	8	8
днище в носу	8	8	8
транец	8	8	8
скула	7	7	7
свободная поверхность	8	8	8
Разрешение пограничного слоя $y^+ = 100$	4 – 7	4 – 7	4 – 7
Итоговое количество ячеек	1487274	2343021	4039472
Ортогональность		–	13,27
Коэффициент роста		7,53	6,1

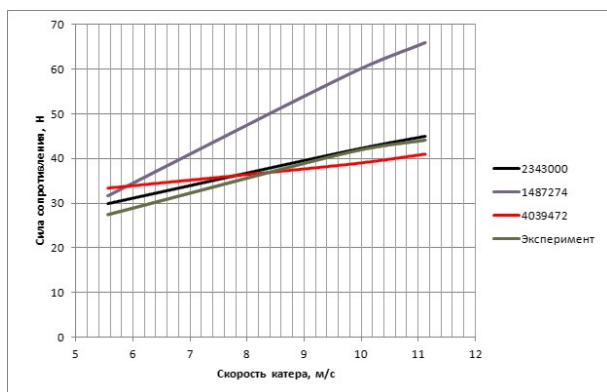


Рис. 4 Сравнение результатов моделирования на разных сетках с результатами экспериментов

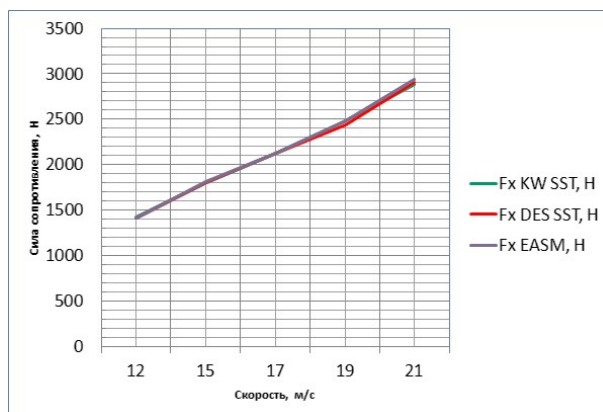


Рис. 5 Сравнение моделей турбулентности

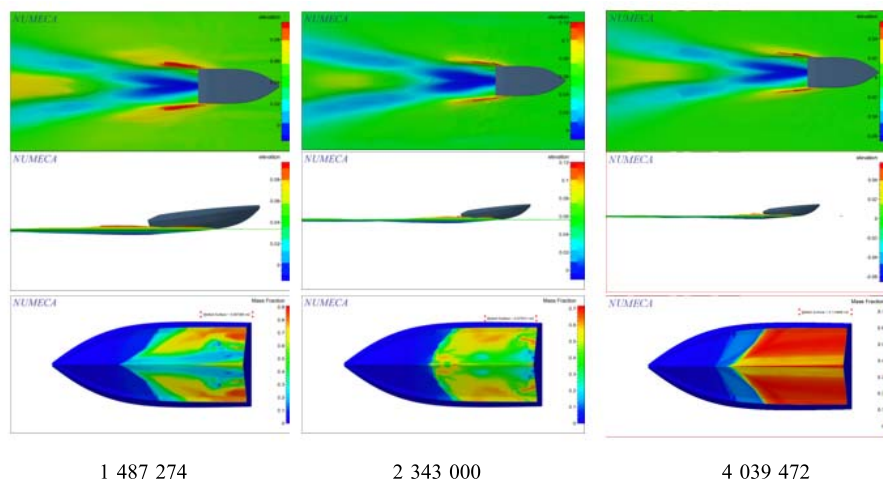


Рис. 6 Форма волновой поверхности VOF и смоченная поверхность для различных сеток при скорости 11,2 м/с

случаев было замечено, что размерность сетки существенно влияет на результаты моделирования изменения посадки. Например, при одной и той же скорости наблюдалось различное поведение катера на разных сетках. На более крупной сетке наблюдалось дельфинирование катера, о чем свидетельствует периодическое изменение амплитуды колебаний, которое отсутствует на более подробной сетке.

В целом, выполненное исследование показывает, что программный комплекс NUMECA/FineMarine™ вполне пригоден для прогнозирования сопротивления скоростного катера.

3. ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ФОРМЫ КОРПУСА КАТЕРА НА ЕГО СОПРОТИВЛЕНИЕ

Моделирование гидродинамики катера, оснащенного поперечным реданом

После апробации программного комплекса NUMECA/FineMarine™ была определена возможность снижения величины сопротивления реданного катера по сравнению с прототипом, для чего были разработаны два варианта твердотельной геометрии – катера-прототипа и реданного катера, изготовленного на его основе. Параметры редана были рассчитаны по методике, изложенной в [20]. Внешний вид обоих вариантов приведен на рис. 7. Использовалась геометрия катера в натурную величину. При моделировании использовались подходы и результаты, описанные выше.



Рис. 7 Твердотельная геометрия двух вариантов катера:
а – катер-прототип, б – реданный катер.

Построение расчетной сетки также выполнялось в HEXPRESS на основе первоначального грубого разбиения с адаптивным разрешением, в том числе в области потоков около поперечного и продольных реданов. Параметры сеток приведены в табл. 3.

Таблица 3
Параметры расчетных сеток для катера-прототипа и реданного катера

	Катер-прототип	Реданный катер
Начальная сетка	250	280
Адаптация геометрии:		
Продольные реданы в носовой части	–	6 – 7
Редан	–	8
Днище в корме	8	7
Продольные реданы в корме	7	8
Днище в носу	–	7
Транец	8	8
Скула	7	7
Свободная поверхность	8	8
Итоговое количество ячеек	2 316 725	2 913 387

Использовалась нестационарная постановка задачи с тремя степенями свободы катера. С учетом результатов ранее выполненных исследований использовалась модель k- ω SST. Скорости движения изменялись в диапазоне 12-21 м/с, разгон модели

соответствовал $\frac{1}{2}$ по синусоидальному закону, как и ранее, с реальным временем разгона катера.

Результаты моделирования позволяют утверждать, что оба катера выходят на устойчивое глиссирование, о чем свидетельствует установившееся значение осадки (рис. 11) и угла дифферента начиная со скоростей ниже 12 м/с. Также следует отметить, что при скоростях 12-15 м/с осадка реданного катера больше, чем у прототипа, но при увеличении скорости до 17 м/с происходит резкое его всплытие (рис. 11). Как было установлено в ходе численного моделирования, в ряде случаев осадка реданного катера периодически изменяется с одинаковой амплитудой в пределах нескольких сантиметров, что вполне согласуется с практическим опытом эксплуатации подобных маломерных судов [9, 20, 21].

Сравнение сопротивления, реданного катера с катером-прототипом (рис. 11) показывает его снижение для реданного катера до 16,5 %, что позволяет достичь более высокой скорости при той же характеристиках движительно-рулевого комплекса. При этом необходимо отметить, что при скорости 12 м/с сопротивление реданного катера оказывается выше, чем у прототипа, что согласуется с теоретическими данными А.М. Ваганова и др. [9, 20, 21] о наличии «горба сопротивления» при переходе катера к глиссирующему режиму.

Для реданного катера смоченная поверхность существенно уменьшается, о чем свидетельствуют результаты моделирования (рис. 12), из которых видно, что поперечный редан создает воздушную пленку под корпусом (рис. 8), которая способствует снижению сопротивления.

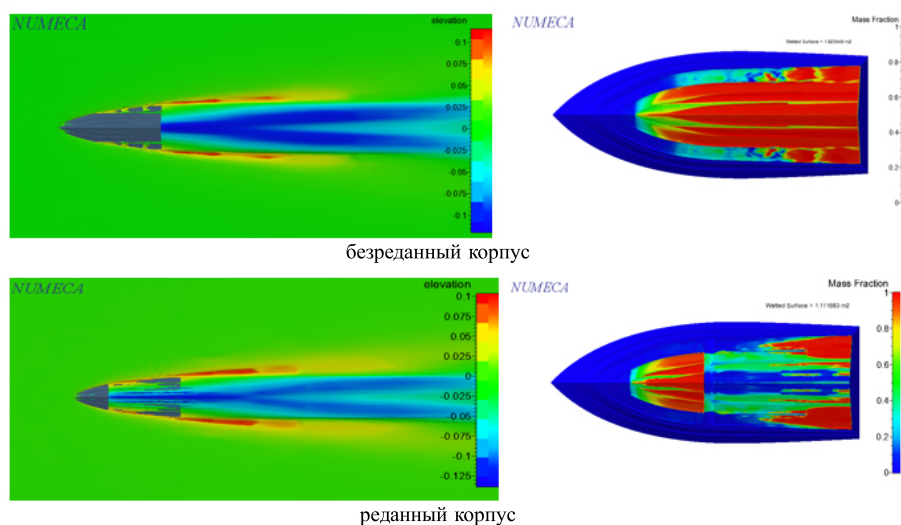


Рис. 8 Волновая и смоченная поверхность при движении реданного и безреданного катеров

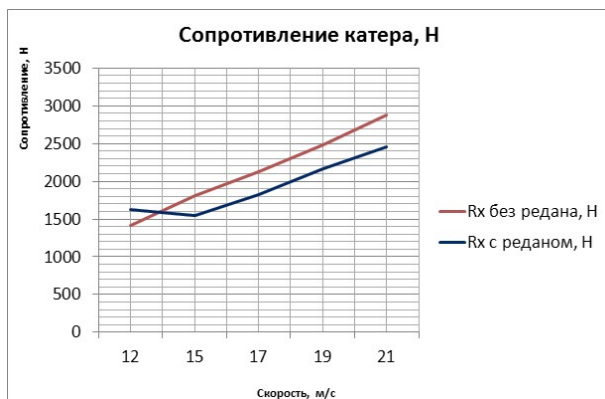


Рис. 9 Сопротивление реданного катера по сравнению с катером-прототипом



Рис. 10 Изменение осадки катера



Рис. 11 Изменение разницы в сопротивлении от скорости движения реданного катера по сравнению с прототипом

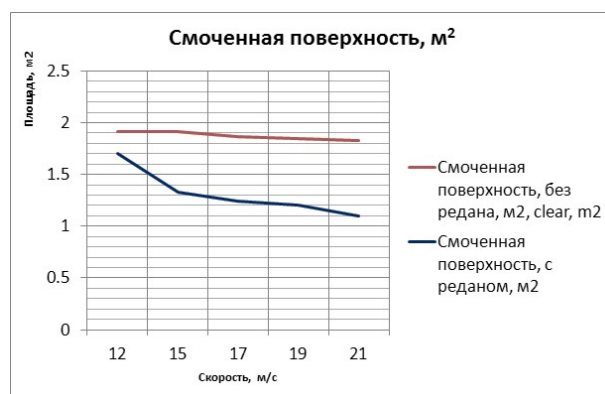


Рис. 12 Изменение смоченной поверхности двух вариантов катера

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ КАТЕРА, ОСНАЩЕННОГО ГИДРОЛЫЖЕЙ РЕДАНОМ

Задача численного моделирования катера с гидролыжей возникла в ходе проектирования новой модели катера. Использование узкой гидролыжи вдоль киля является одним из способов увеличения подъемной силы на днище, при этом оставляя корпус килеватым в тех областях, которые подвергаются воздействию волны при движении катера [23]. Расширяющаяся в корму гидролыжа придает постоянно-килеватому корпусу свойства «закрученно-килеватого», позволяя при этом выполнить его из листовых материалов [23].

При испытаниях катера, оснащенного гидролыжей, при скорости 15 м/с и более, были зафиксированы колебания корпуса с постоянно увеличивающейся амплитудой, сопровождающиеся дельфинированием, что могло привести к перевороту. Для решения этой проблемы необходимо было внести минимальные конструктивные изменения в корпус катера. Было принято решение удлинить корпус для перераспределения давлений по его несущей поверхности. После чего авторами было выполнено сравнительное численное моделирование движения исходного катера, удлиненного на 75 мм корпуса и контрольного корпуса

без гидролыжи для проверки целесообразности ее установки. Моделирование осуществлялось для полномасштабной геометрии трех вариантов корпусов (рис. 13) при скоростях 9 – 17 м/с, соответствующих скоростям эксплуатации реального катера. Расчетная сетка (табл. 4), была дополнительно уплотнена в районе гидролыжи.

Таблица 4

Параметры расчетной сетки при моделировании катера

	Исходный катер	Удлиненный	Длинный без гидролыжи
Начальная сетка	144	144	144
Адаптация геометрии			
днище	7	7	8
лыжа	8	8	8
транец	8	8	8
борт	7	7	7
продольные реданы	8	8	8
палуба	4	4	4
свободная поверхность	8	8	8
Адаптация дополнительной области	8	8	8
Вязкостный подслей	5 – 11	5 – 11	5 – 11
Общее количество ячеек	2653673	2974584	2308479

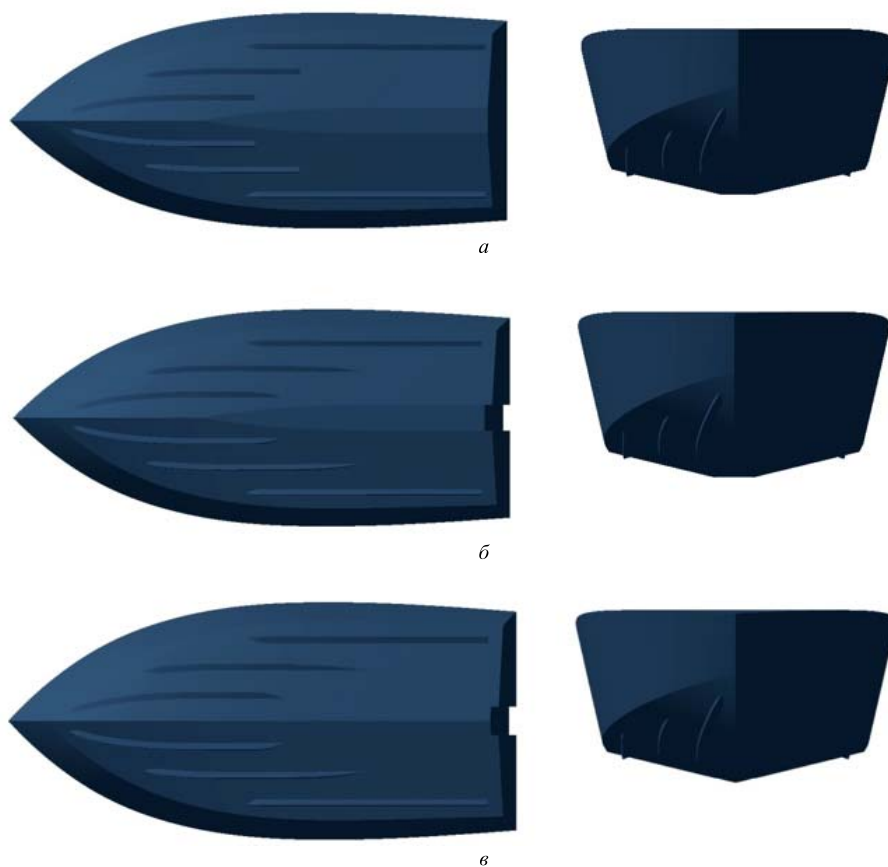


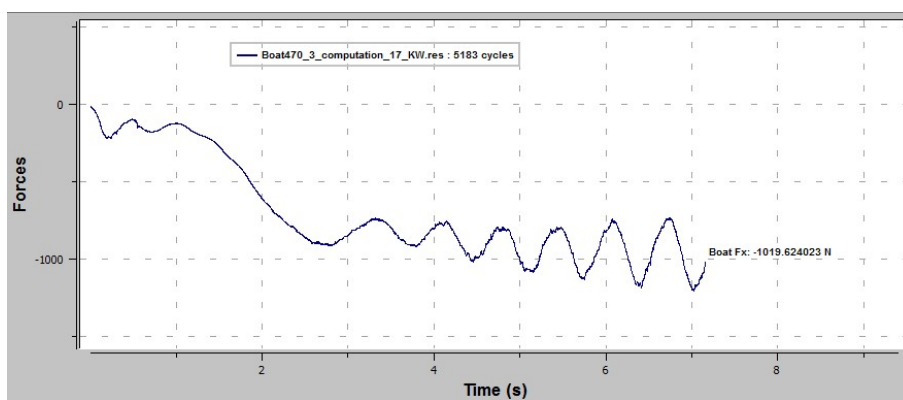
Рис. 13 Твердотельная геометрия трех вариантов катера: *a* – исходный катер; *б* – удлиненный катер; *в* – удлиненный катер без гидролыжи

Результаты моделирования показывают, что удлинение катера позволяет избежать дельфинирования (рис. 14) и приводит к нормализации поведения катера при повышении скорости до 17 м/с. Из графиков (рис. 14) видно, что сила сопротивления исходного катера изменяется с течением времени, причем амплитуда этих изменений постоянно увеличивается, в то же время для удлиненных корпусов такого не наблюдается, т.к. сопротивление, а, следовательно, и посадка, с течением времени стабилизируются.

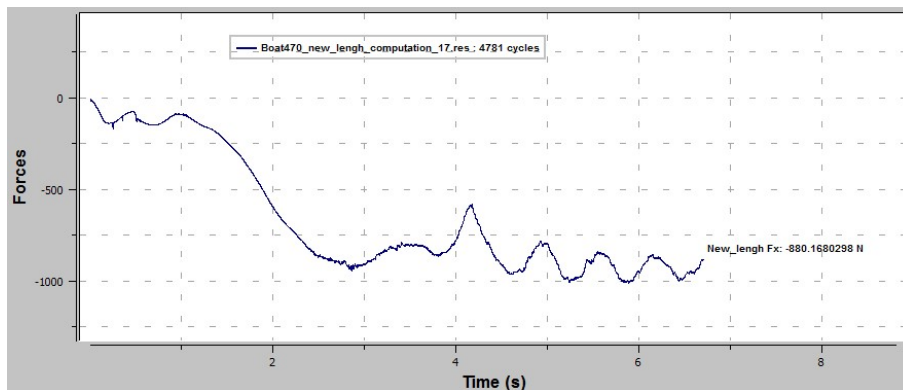
При повышенных скоростях сопротивление исходного катера оказывается выше, чем для удлиненного в обоих вариантах. Из графиков (рис. 15 и 16) видно, что снижение сопротивления для удлиненного катера без гидролыжи по сравнению с исходным

составляет 16 %, удлиненного с гидролыжей – до 21 %. Как и следовало ожидать, при скорости 9 м/с сопротивление катера без гидролыжи оказывается выше как исходного варианта, так и удлиненного с гидролыжей.

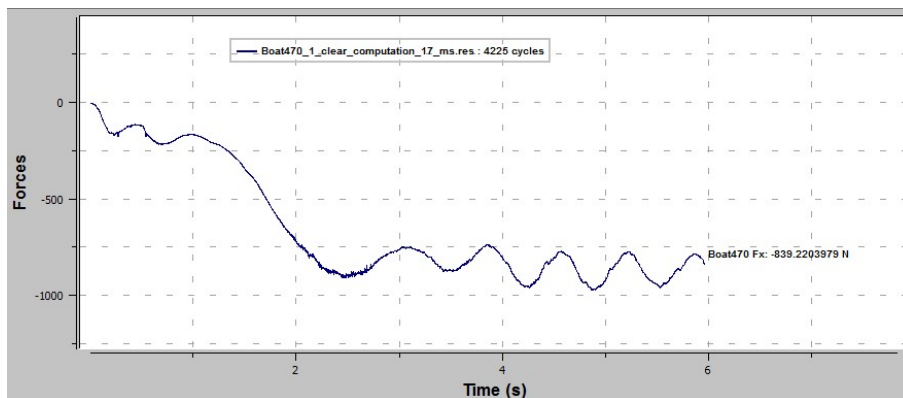
Наибольшие изменения в площади смоченной поверхности наблюдаются при скорости выхода на глиссирование – 11 м/с, а также при высоких скоростях в развитом глиссирующем режиме. Осадка исходного катера по результатам моделирования оказалась больше удлиненного, что связано в том числе, с дельфинированием исходного корпуса (рис. 18), при этом осадки удлиненных катеров изменяются мало относительно друг друга. То же самое можно сказать относительно угла дифферента (рис. 17).



исходный катер



удлиненный катер



удлиненный катер без гидролыжи

Рис. 14 Изменение силы сопротивления трех вариантов корпусов катера с течением времени

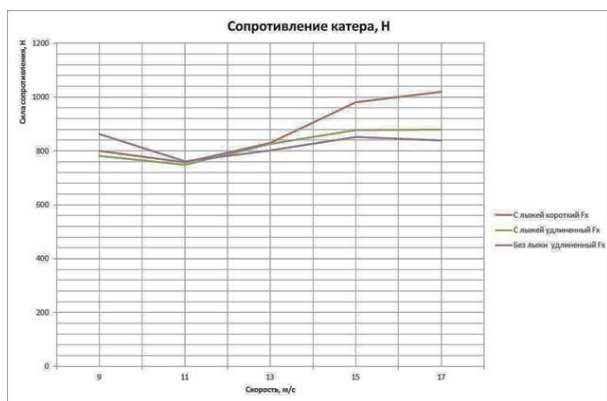


Рис. 15 Соппротивление трех вариантов корпусов катера

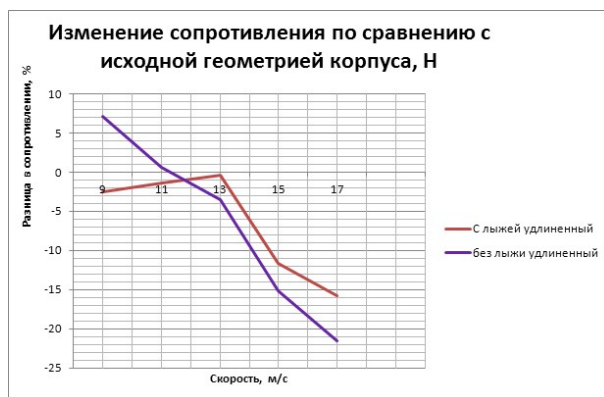


Рис. 16 Изменение разницы в сопротивлении от скорости движения трех вариантов корпусов катера

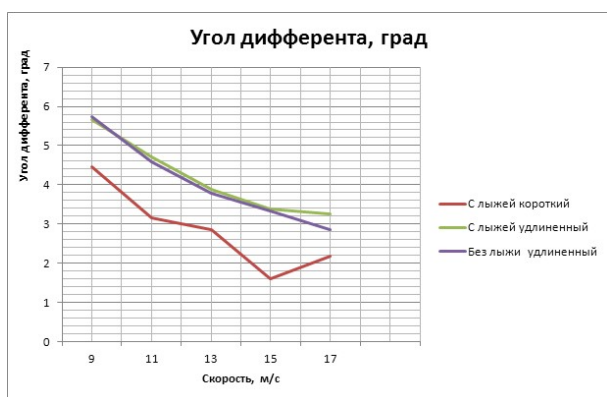


Рис. 17 Изменение угла дифферента для трех вариантов корпусов катера

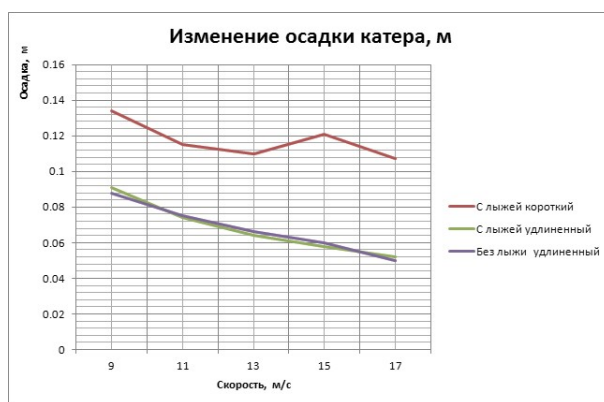


Рис. 18 Изменение осадки различных вариантов катера

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе выполнено численное исследование влияния поперечных реданов и гидролыж на гидродинамические характеристики глиссирующих маломерных судов. Результаты численного моделирования подтверждены сравнением с результатами буксировочных испытаний, которые показали хорошее согласование между собой. Также произведено исследование влияния используемых моделей турбулентности и параметров расчетных сеток на результаты моделирования. Показано, что программный комплекс NUMECA/FineMarineTM может быть использован для исследования гидродинамических характеристик скоростных маломерных судов. Полученные результаты нашли практическое применение, в том числе на этапе эскизного и технического проектов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят руководство ООО «НПП «Спиннинглайн боатс» за предоставленные результаты буксировочных испытаний и А.А. Молькова за предоставленные твердотельные модели корпусов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Baker G.S. Some Experiments in Connection with the Design of Floats for Hydro-Aeroplanes, ARC (British) R & M, № 70, 1912.
2. Sottorf W. Experiments With Planing Surfaces, NACA TM 661, 1932 and NACA TM 739, 1934.
3. Shoemaker J.M. Tank Tests of Flat and Vee-Bottom Planing Surfaces, NACA TN 509, November 1934.
4. Sambraus A. Planing Surface Tests at Large Froude Numbers-Airfoil Comparison, NACA TM №. 848, February 1938.
5. Locke Jr., F.W.S. Tests of a Flat Bottom Planing Surface to Determine the Inception of Planing, Navy Department, BuAer, [Research Division Report No. 1096], December 1948.

6. Korvin-Kroukovsky B.V., Savitsky D., Lehman W. Wetted Area and Center of Pressure of Planing Surfaces, Stevens Institute of Technology, Davidson Laboratory Report №. 360, August 1949.
7. Murray A.B. The Hydrodynamics of Planing Hulls, [Meeting of the New England Section of SNAME, February 1950], 1950.
8. Savitsky D., Neiclinger J.W. Wetted Area and Center of Pressure of Planing Surfaces at Very Low Speed Coefficients, Stevens Institute of Technology, [Davidson Laboratory Report №. 498], July 1954.
9. Clement E.P. A configuration for a stepped planning boat having minimum drag (dynaplane boat). Monograph. Second edition. 2005 (published by author), 76p.
10. Theoretical Manual ISIS-CFD v3.1 Equipe Modélisation Numérique, Laboratoire de Mécanique des Fluides, CNRS-UMR 6598, Ecole Centrale de Nantes, B.P. 92101, 44321 Nantes Cedex 3, France.
11. User Manual FINE™/Marine v3.1, Documentation v3.1a NUMECA International, 187-189, Chaussée de la Hulpe 1170 Brussels, Belgium.
12. Visonneau M., Queutey P., Deng Gan Bo, Wackers J., Guilmineau E., Leroyer A., Mallol B. Computation of Free-Surface Viscous Flows around Self-Propelled Ships with the Help of Sliding Grids, [COMPIT-2012], 2012.
13. Visonneau M., Queutey P., Deng Gan Bo, Wackers J., Mallol B. Anisotropic Grid Adaptation for Rans Simulation of a Fast Manoeuvring Catamaran, [4th High Performance Yacht Design Con-ference], 2012.
14. Garo R., Imas L. Hydrodynamic Performance of a Submerged Lifting Surface Operating at High Speed, [4th High Performance Yacht Design Conference], 2012.
15. Wackers J., Ait Said K., Deng Gan Bo, Queutey P., Visonneau M., Mizine I. Adaptive Grid Refinement Applied to RANS Ship Flow Computation, [28th Symposium on Naval Hydrodynamics], 2010.
16. Roux Y., Wackers J., Dorez L. Slamming computation on the multihull Groupama 3, [The second international conference on innovation in high performance sailing yachts, 30 June – 1 July 2010 “Innovsail 2010”], 2010.
17. Wackers J., Ait Said K., Deng GB, Queutey P., Visonneau M., Mizine I. Adaptive grid refinement applied to RANS ship flow computation. In: [28th Symposium on naval hydrodynamics]. Pasadena, California; 2010.
18. Mizine I., Karafiath G., Queutey P., Visonneau M. Interference Phenomenon in Design of Tri-maran Ship, [FAST 2009], 2009
19. Jeroen Wackers, Ganbo Deng, Alban Leroyer, Patrick Queutey, Michel Visonneau. Adaptive Grid Refinement for Hydrodynamic Flow Simulation. [Computers & Fluids]. 55. 85–100.
20. Ваганов А.М. Проектирование скоростных судов. – Л.: Изд-во «Судостроение», 1978 – 280с.
21. Мартынов А.И. Глиссеры. – М.: Речиздат, 1940. – 382с.
22. Никущенко Д.В. Исследование течений вязкой несжимаемой жидкости на основе расчетного комплекса FLUENT®. Учебное пособие. – СПб.: СПбГМТУ, 2005. 91 С.
23. Даняев А. Гидродинамика и «рюшечки» // «Катера и яхты», 2 (224), 2010, С. 44-49.
3. Shoemaker J.M. Tank Tests of Flat and Vee-Bottom Planing Surfaces, NACA TN 509, November 1934.
4. Sambraus A. Planing Surface Tests at Large Froude Numbers-Airfoil Comparison, NACA TM №. 848, February 1938.
5. Locke Jr., F.W.S. Tests of a Flat Bottom Planing Surface to Determine the Inception of Planing, Navy Department, BuAer, [Research Division Report No. 1096], December 1948.
6. Korvin-Kroukovsky B.V., Savitsky D., Lehman W. Wetted Area and Center of Pressure of Planing Surfaces, Stevens Institute of Technology, Davidson Laboratory Report №. 360, August 1949.
7. Murray A.B. The Hydrodynamics of Planing Hulls, [Meeting of the New England Section of SNAME, February 1950], 1950.
8. Savitsky D., Neiclinger J.W. Wetted Area and Center of Pressure of Planing Surfaces at Very Low Speed Coefficients, Stevens Institute of Technology, [Davidson Laboratory Report №. 498], July 1954.
9. Clement E.P. A configuration for a stepped planning boat having minimum drag (dynaplane boat). Monograph. Second edition. 2005 (published by author), 76 p.
10. Theoretical Manual ISIS-CFD v3.1 Equipe Modélisation Numérique, Laboratoire de Mécanique des Fluides, CNRS-UMR 6598, Ecole Centrale de Nantes, B.P. 92101, 44321 Nantes Cedex 3, France.
11. User Manual FINE™/Marine v3.1, Documentation v3.1a NUMECA International, 187-189, Chaussée de la Hulpe 1170 Brussels, Belgium.
12. Visonneau M., Queutey P., Deng Gan Bo, Wackers J., Guilmineau E., Leroyer A., Mallol B. Computation of Free-Surface Viscous Flows around Self-Propelled Ships with the Help of Sliding Grids, [COMPIT-2012], 2012.
13. Visonneau M., Queutey P., Deng Gan Bo, Wackers J., Mallol B. Anisotropic Grid Adaptation for Rans Simulation of a Fast Manoeuvring Catamaran, [4th High Performance Yacht Design Con-ference], 2012.
14. Garo R., Imas L. Hydrodynamic Performance of a Submerged Lifting Surface Operating at High Speed, [4th High Performance Yacht Design Conference], 2012.
15. Wackers J., Ait Said K., Deng Gan Bo, Queutey P., Visonneau M., Mizine I. Adaptive Grid Re-finement Applied to RANS Ship Flow Computation, [28th Symposium on Naval Hydrodynam-ics], 2010.
16. Roux Y., Wackers J., Dorez L. Slamming computation on the multihull Groupama 3, [The second international conference on innovation in high performance sailing yachts, 30 June - 1 July 2010 “Innovsail 2010”], 2010.
17. Wackers J., Ait Said K., Deng GB, Queutey P., Visonneau M., Mizine I. Adaptive grid refinement applied to RANS ship flow computation. In: [28th Symposium on naval hydrodynamics]. Pasadena, California; 2010.
18. Mizine I., Karafiath G., Queutey P., Visonneau M. Interference Phenomenon in Design of Tri-maran Ship, [FAST 2009], 2009
19. Jeroen Wackers, Ganbo Deng, Alban Leroyer, Patrick Queutey, Michel Visonneau. Adaptive Grid Refinement for Hydrodynamic Flow Simulation. [Computers & Fluids]. 55. 85–100.
20. Vaganov A.M. Proektirovanie skorostnykh sudov [Design of high-speed vessels]. Leningrad, "Sudostroenie" Publ., 1978, 280 p.
21. Martynov A.I. Glissery [Speedboats]. Moscow, Rechizdat Publ., 1940, 382 p.
22. Nikushhenko D.V. Issledovanie techenij vjazkoj neszzhimaemoj zhidkosti na osnove raschetnogo kompleksa FLUENT. Uchebnoe posobie [Study of viscous incompressible fluid on basis of system FLUENT. Tutorial]. St. Petersburg, CPbGMTU, 2005, 91 p.
23. Danjaev A. Gidrodinamika i «rjushechki» [Hydrodynamic and "rjushechki"]. Katera i jahty [Boats and yachts]. 2010, 2 (224), pp. 44-49.

REFERENCES

УДК 629.12.001.11

ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ НАГРУЗКИ НА СУДНО ОТ НЕРЕГУЛЯРНОГО ВЕТРА ПРИ НОРМИРОВАНИИ ОСТОЙЧИВОСТИ СУДОВ

Р.В. Борисов, д-р техн. наук, проф., ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский Государственный морской технический университет», Санкт-Петербург, e-mail: rvborisov@mail.ru

М.А. Кутейников, д-р. техн. наук, ФАУ «Российский морской регистр судоходства», Санкт-Петербург, e-mail: kuteynikov.ma@rs-class.org

А.А. Лузянин, канд. техн. наук, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский Государственный морской технический университет», Санкт-Петербург, e-mail: aaluzyanin@rambler.ru

В.Р. Самойлов, ФАУ «Российский морской регистр судоходства», Санкт-Петербург, e-mail: samoylov.vr@rs-class.org

Современные критерии погоды (в ИМО Код «Остойчивость») рассчитаны на предотвращение предельных наклонений судна при совместном действии ветра и волн. Хотя идея физически обоснована, многие из допущений, на которых основаны критерии, находятся в стадии обсуждения в ИМО в рамках пересмотра кода «Остойчивость неповрежденного судна». В действующем критерии характеры качки и ветра, в основном, детерминированные. Критерий или удовлетворяется, или не удовлетворяется и не учитывает возможные отличия в конструкциях судов и особенностей конкретного района плавания с конкретными ветроволновыми условиями. Критерий очень трудно корректировать в определенных пределах даже с использованием экспериментальных результатов: это означает, что он представляет собой «черный ящик», без возможности учета в соответствии с анализом некоторых важных особенностей судна. Определение уровня безопасности при использовании критерия тоже затруднено. Чтобы преодолеть эти проблемы, сейчас разрабатываются методологии, учитывающие совместное действие ветра и волн с учетом их нерегулярности (стохастический подход). При этом используются спектры фактического ветра и волн, в которых средняя скорость ветра является связующим звеном между спектрами ветра и волн. Предлагаемый стохастический подход позволяет, в принципе, производить оценку безопасности конкретного судна в конкретных реальных условиях эксплуатации.

Ключевые слова: *стойчивость, мореходность, критерий погоды, качка, действие ветра и волнения*

ABOUT THE DETERMINATION OF LOADING ON A SHIP FROM THE IRREGULAR WIND DURING NORMING OF SHIPS STABILITY

R.V. Borisov, DSc, professor, State Marine Technical University, St. Petersburg, e-mail: rvborisov@mail.ru

M.A. Kuteynikov, DSc, FAI "Russian Maritime Register of Shipping", St. Petersburg, e-mail: kuteynikov.ma@rs-class.org

A.A. Luzyanin, PhD, State Marine Technical University, St. Petersburg, e-mail: aaluzyanin@rambler.ru

V.R. Samoylov, FAI "Russian Maritime Register of Shipping", St. Petersburg, e-mail: samoylov.vr@rs-class.org

Modern weather criterion (2008 IS Code) is calculated to prevent a ship's heeling due to combined action of wind and waves. Although the idea behind it can be physically justified, many of the assumptions, on which the criteria are based, are currently at a discussion stage at IMO in scope of the review of 2008 IS Code. In the presently used criterion the character of roll and wind is mostly deterministic. The criterion is either fulfilled or not and does not take into account possible differences in ship designs and specific navigation areas characteristics with their specific wind and waves conditions. The criterion is very difficult to correct within certain limits even using the experimental results: it is basically a "black box" without the possibility to take into account the important characteristics of the ship in accordance with the analysis. The determination of safety level using the criterion also proves difficult. The methodologies that take into account the combined effect of wind and waves and their irregular character (stochastic approach) are currently being developed in order to overcome these problems, wherein the spectra of actual wind and waves are used, the mean wind speed being the connecting link. The proposed stochastic approach allows in principle to assess the safety of a specific ship in the specific real operational conditions.

Keywords: *stability, seaworthiness, weather criterion, roll, wind and waves action*

ВВЕДЕНИЕ

В современных Правилах РМРС [2] распространяющихся на суда, предназначенные для эксплуатации только в ограниченных районах плавания, к основному символу класса добавляется один из знаков **R1**, **R2**, **R2-RSN**, **R2-RSN(4,5)**, **R3-RSN** или **R3**, указывающих на соответствующие каждому знаку ограничения, приведенные ниже:

1. **R1** (ранее **I**) – плавание в морских районах на волнении с высотой волны 3-процентной обеспеченности 8,5 м, с удалением от места убежища не более 200 миль и с допустимым расстоянием между местами убежища не более 400 миль;

2. **R2** (ранее **II**) – плавание в морских районах на волнении с высотой волны 3-процентной обеспеченности 7,0 м, с удалением от места убежища не более 100 миль и с допустимым расстоянием между местами убежища не более 200 миль;

3. **R2-RSN** (ранее **II СП**) – смешанное (река-море) плавание на волнении с высотой волны 3-процентной обеспеченности 6,0 м, с удалением от места убежища: в открытых морях не более 50 миль и с допустимым расстоянием между местами убежища не более 100 миль; в закрытых морях не более 100 миль и с допустимым расстоянием между местами убежища не более 200 миль;

4. **R2-RSN(4,5)** (ранее не было) – смешанное (река-море) плавание на волнении с высотой волны 3-процентной обеспеченности 4,5 м, с удалением от места убежища: в открытых морях не более 50 миль и с допустимым расстоянием между местами убежища не более 100 миль; в закрытых морях не более 100 миль и с допустимым расстоянием между местами убежища не более 200 миль;

5. **R3-RSN** (ранее **III СП**) – смешанное (река-море) плавание на волнении с высотой волны 3-процентной обеспеченности 3,5 м, с учетом конкретных ограничений по району и условиям плавания, обусловленных ветроволновыми режимами бассейнов, с установлением при этом максимально допустимого удаления от места убежища, которое не должно превышать 50 миль;

6. **R3** – портовое, рейдовое и прибрежное плавание в границах, установленных Регистром в каждом случае. Конкретные ограничения для работы плавучих кранов (выполнения грузоподъемных операций и плавания с возможной перевозкой грузов на палубе и/или в трюме) устанавливаются Регистром в каждом случае;

7. **Berth-connected ship** – для стоечных судов (с указанием координат места стоянки и географического района эксплуатации согласно рис. 4.3.3.6 части IV «Остойчивость»).

Конкретные ограничения по району и условиям плавания судам смешанного (река-море) плавания **R3-RSN** устанавливаются в виде географического названия бассейнов или их частей с указанием в необходимых случаях географической границы района плавания внутри бассейна, ограничений по удалению от места убежища и ограничений эксплуатации календарными сроками, или в виде указания рейса между конечными портами. При этом, для установления ограничений, учитывающих ветроволновые режимы бассейнов, используются данные из представляемых Регистру обоснований возможности эксплуатации судна в определенном районе или рейсе, выполненные по одобренной Регистром методике.

В предлагаемой работе рассматривается метод нормирования остойчивости судна в положении лагом, который позволяет произвести обоснование возможности эксплуатации судна в определенном районе или рейсе с учетом конкретных ветроволновых условий.

1. ДЕЙСТВИЕ ПОСТОЯННО ДУЮЩЕГО ВЕТРА

Для оценки риска потери остойчивости рассчитывается основной критерий погоды $K = b/a$, определяемый в соответствии с рис. 1. K должно быть больше 1.

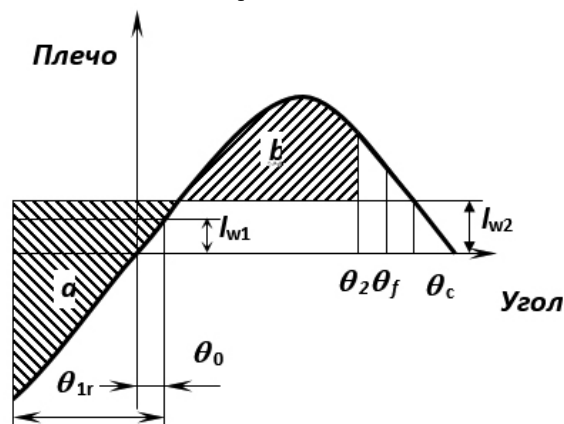


Рис. 1 Критерий погоды

Судно находится под действием ветра постоянной скорости, направленного перпендикулярно к диаметральной плоскости, которому соответствует плечо кренящего ветрового момента от постоянно дующего ветра l_{w1} .

От статического угла крена θ_{w1} , вызванного постоянным ветром и соответствующего первой точке пересечения горизонтальной прямой l_{w1} с кривой восстанавливающих плеч $l(\theta)$, под воздействием волн судно кренится на наветренный борт на угол, равный амплитуде бортовой качки θ_{1r} .

На накренное судно динамически действует порыв ветра, которому соответствует плечо кренящего момента l_{w2} .

Вычисляются и сравниваются площади a и b , заштрихованные на рис. 1. Площадь b ограничена кривой $l(\theta)$ восстанавливающих плеч, горизонтальной прямой, соответствующей кренящему плечу l_{w2} , и углом крена $\theta_2 = 50^\circ$, либо углом заливания θ_f , либо углом крена θ_c , соответствующим точке второго пересечения прямой l_{w2} с кривой восстанавливающих плеч, в зависимости от того, какой из этих углов меньше.

Давление ветра p , связанное со скоростью потока $w(t)$, будет равно

$$p = \frac{1}{2} \rho_{\text{возд.}} C_y w^2(t), \quad (1)$$

где $\rho_{\text{возд.}}$ – плотность воздуха.

Скорость ветра $w(t)$ представляется в виде суммы средней скорости ветра $\bar{w}$ и мгновенной $\delta w(t)$:

$$w(t) = \bar{w} + \delta w(t). \quad (2)$$

Если пренебречь составляющими второго порядка, на основе предположения, что коэффициент изменчивости поля ветра мал, линеаризованное выражение давления ветра получится равным

$$p(t) = p_v + \delta p(t), \quad (3)$$

где p_v – постоянное давление ветра, равное

$$p_v = \frac{1}{2} \rho_{\text{возд.}} C_y \bar{w}^2; \quad (4)$$

$\delta p(t)$ – переменное давление ветра, равное

$$\delta p(t) \approx \rho_{\text{возд.}} C_y \bar{w} \delta w(t). \quad (5)$$

Здесь C_y – коэффициент аэродинамического сопротивления, зависящий от наличия надстроек, развитости надводных конструкций и их формы и т.д.

Тогда горизонтальная сила от действия ветра будет равна

$$F_w(t) = F_{0w} + \delta F_w(t), \quad (6)$$

где F_{0w} – постоянная боковая сила (она же средняя)

$$F_{0w} = \frac{1}{2} \rho_{\text{возд.}} \bar{w}^2 C_y A_v, \quad (7)$$

а $\delta F_w(t)$ – переменная

$$F_w(t) \approx \frac{1}{2} \rho_{\text{возд.}} \bar{w}^2 \delta w(t) C_y A_v. \quad (8)$$

В выражениях (7) и (8) A_v – площадь парусности – площадь проекций всех конструкций на диаметрную плоскость.

Постоянный кренящий момент от ветра M_{w1} можно вычислить по формуле:

$$M_{w1} = F_{0w} z_v = \frac{1}{2} C_y \rho_{\text{возд.}} \bar{w}^2 A_v z_v, \quad (9)$$

где z_v – плечо парусности, м, принимаемое равным измеренному по вертикали расстоянию от центра площади парусности A_v до центра площади проекции подвод-

ной части корпуса на диаметрную плоскость, или, приближенно, до середины осадки судна.

Величина среднего ветрового момента предполагается независимой от угла крена.

При расчете критерия погоды в соответствии с существующими Правилам судно находится под действием ветра постоянной скорости, направленного перпендикулярно к его диаметральной плоскости. Ему соответствует плечо ветрового кренящего момента l_{w1} , определяемое по формуле:

$$l_{w1} = \frac{M_{w1}}{\Delta} = p_v A_v z_v / 1000 g \Delta, \text{ (м)}, \quad (10)$$

где $g = 9,81$ – ускорение свободного падения м/с^2 ;
 Δ – водоизмещение судна (т);
 p_v – давление ветра, Па, которое определяется по табл. 1 в зависимости от района плавания судна.

Таблица 1

Давление ветра согласно Правилам

Район плавания судна	Давление ветра p_v , Па
Неограниченный	504
Ограниченный R1	353
Ограниченный R2, R2-RSN, R2-RSN(4,5), R3-RSN	252

При таком подходе возникают следующие замечания:

1) давление ветра принимается одинаковым для четырех ограниченных районов плавания: **R2, R2-RSN, R2-RSN(4,5) и R3-RSN**;

2) для судов района **R3** и для стоечных судов отсутствие обоснованных ограничений, учитывающих конкретные ветроволновые условия в районе эксплуатации, может привести к завышению требований к остойчивости и к увеличению расходов на эксплуатацию.

Чтобы учесть реальные условия эксплуатации предлагается значение плеча ветрового кренящего момента l_{w1} рассчитывать по формуле (10), однако среднюю скорость определять, используя статистическую зависимость, предложенную ИМО, между средней скоростью ветра и высотой волны 3-процентной обеспеченности [5]:

$$\bar{w} = \left(\frac{h_{3\%}}{0,06717} \right)^{2/3} \text{ (м/с)}. \quad (11)$$

При рассмотрении иных условий окружающей среды по согласованию с Администрацией можно применять другие зависимости.

Высота волны $h_{3\%}$ или задается по прогнозу волнения, или определяется из таблицы балльности (табл. 2).

Выполним расчет средней скорости ветра по формуле (11) для каждого района плавания из

Таблица 2

Определение высот волн 3-процентной обеспеченности

Балл	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
Высота волны $h_{3\%}$ (м)	До 0,25	0,25-0,75	0,75-1,25	1,25-2	2-3,5	3,5-6	6-8,5	8,5-11	>11
Назначенные $h_{3\%}$ для районов плавания			1,25	3,5	3,5	4,5; 6	7	8,5	11
Район плавания				R3	R3-RSN	R2-RSN(4,5); R2-RSN	R2	R1	Неограниченный

вышеуказанных, опираясь на заданные ограничения по высоте волны 3-процентной обеспеченности, охватив ее промежуточные значения.

Рассчитав давление ветра по формуле (4), табл. 1 можно модернизировать в соответствии с ограничениями плавания каждого класса судов.

Как следует из табл. 1а, использование формулы (11) для расчета постоянной скорости ветра дает некоторое завышение значений давления ветра по сравнению с Правилами, однако хорошо видна тенденция снижения давления для ряда ограниченных районов. Поэтому предлагается, оставив для четырех районов традиционные значения давления, для остальных их подкорректировать.

Для стоечных и других типов судов (доков, крановых судов и т.д.) давление ветра можно

определять с использованием формулы (11) по реальной погоде или по шестичасовому прогнозу погоды.

2. ПЛЕЧО КРЕНЯЩЕГО МОМЕНТА ОТ ПОРЫВИСТОСТИ ВЕТРА

В действующих правилах при определении среднего плеча кренящего момента от пульсаций ветра l_{w2} заранее закладывается допущение, что для всех судов и для всех районов эксплуатации $l_{w2} = 1,5l_{w1}$.

Представим l_{w2} в виде суммы плеч от постоянно дующего ветра l_{w1} и добавки от порывистости ветра δl_{w2} :

$$l_{w2} = l_{w1} + \delta l_{w2}. \quad (12)$$

Таблица 3

$h_{3\%}$	2	3,5	4	4,5	5	6	7	8,5	11
w^-	9,607	13,951	15,25	16,495	17,696	19,983	22,145	25,206	29,933

График средней скорости от высоты волны
3% - процентной обеспеченности

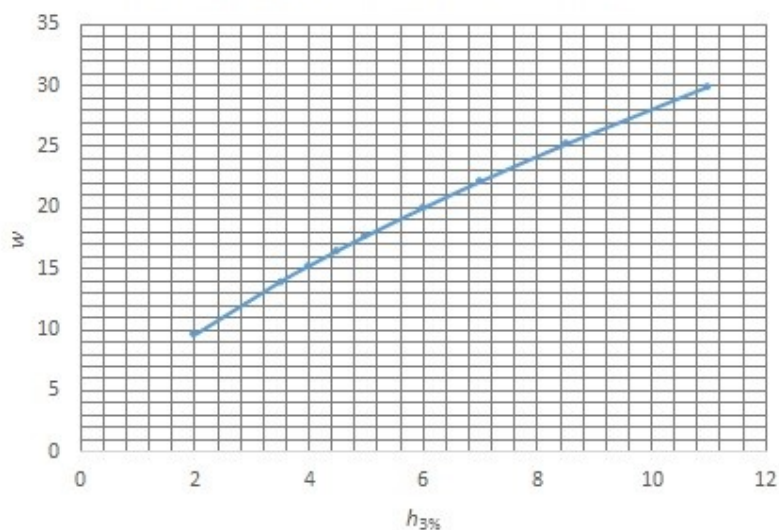


Рис. 2 Средняя скорость ветра.

Таблица 1а
Предлагаемые значения давления ветра

Район плавания судна	Давление ветра, p_v , Па согласно Правилам	Давление ветра p_v , Па по формуле (6)	Предлагаемое давление p_v , Па
Неограниченный	504	549	504
Ограниченный R1	353	388	353
Ограниченный R2	252	300	252
Ограниченный R2-RSN	252	244	252
Ограниченный R2-RSN(4,5)	252	166	166
Ограниченный R3-RSN	252	119	119
Ограниченный R3	По погоде	22,4	22,4
Berth-connected ship	По погоде	По погоде	По погоде

Переменный кренящий момент вычисляется следующим образом:

$$M_w(t) \approx \delta F_w(t) \left(z_v - \frac{d}{2}\right) = C_y \rho_{\text{возд.}} \bar{w} \delta w(t) A_v \left(z_v - \frac{d}{2}\right). \quad (13)$$

Здесь предполагается, что изменение сил от действия порывов ветра по времени происходят быстро, так что гидродинамические реакции не успевают развиться, поэтому гидродинамическая реакция сосредоточена на ватерлинии.

Порывистость ветра, т. е. колебания скорости ветра около среднего значения $\bar{w}$, является нулевым средним гауссовским процессом, который можно охарактеризовать во временной/частотной области соответствующим спектром порывов $S_{\delta w}(\omega)$. Он может принимать

различные формы в зависимости от типа ветра, от средней скорости в географической зоне, от шероховатости местности и т.д. В предложенном в [4] компактном виде он приведен в выражении

$$S_{\delta w}(\omega) = 4K^* \frac{\bar{w}^2}{\omega} \frac{X_D^2}{(1 + X_D^2)^{4/3}}, \quad (14)$$

где $K^* = 0,003$ и
 $X_D = 600 \omega / (\pi \bar{w})$ – параметры спектра:
 ω – частота колебаний.

В табличном и графическом виде спектры порывов $S_{\delta w}(\omega)$ представлен ниже (табл. 4 и рис. 3).

Максимальное значение δw_m можно определить через дисперсию порывистости

$$\delta w_m = \delta w_{0,5\%} = 3,25 \sqrt{D_{\delta w}}, \quad (15)$$

где

$$D_{\delta w} = \int_0^{+\infty} S_{\delta w}(\omega) d\omega. \quad (16)$$

Максимальный кренящий момент от порывистого ветра будет равен

$$\delta M_w \approx \delta F_w \left(z_v - \frac{d}{2}\right) = C_y \rho_{\text{возд.}} \bar{w} \delta w_m A_v \left(z_v - \frac{d}{2}\right). \quad (17)$$

Прирост плеча кренящего момента δl_{w2} будет равен

$$\delta l_{w2} = \frac{\delta M_w}{\Delta} = \frac{1}{\Delta} C_y \rho_{\text{возд.}} \bar{w} \delta w_m A_v \left(z_v - \frac{d}{2}\right) \quad (18)$$

После подстановки в (18) выражения (17) и ряда преобразований получим

$$\delta l_{w2} = \frac{0,5 \rho_{\text{возд.}} \bar{w}^2 C_y A_v z_v}{\Delta w} \frac{z_v - d/2}{z_v} 6,5 \sqrt{D_{\delta w}} \quad (19)$$

Таблица 4

Спектр порывов

w	S								
	2,402	4,996	7,023	9,607	13,951	16,495	19,983	25,206	29,933
ω									
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,1	0,17021	1,12169	2,56539	5,18569	10,711	14,084	18,424	23,901	27,755
0,2	0,05446	0,37729	0,91546	2,03333	5,0496	7,4257	11,267	17,844	24,133
0,3	0,02778	0,19437	0,47728	1,08191	2,8115	4,2675	6,7914	11,612	16,852
0,4	0,01722	0,12087	0,29806	0,68066	1,7991	2,7648	4,4862	7,9301	11,898
0,5	0,01188	0,0835	0,20632	0,47279	1,2598	1,9477	3,191	5,7359	8,7576
0,6	0,00877	0,06169	0,15259	0,35033	0,9377	1,4544	2,3954	4,3479	6,7061
0,7	0,00678	0,04774	0,11817	0,27163	0,729	1,133	1,8722	3,4185	5,3063
0,8	0,00543	0,03823	0,09468	0,21778	0,5855	0,9112	1,5089	2,766	4,3118
0,9	0,00446	0,03143	0,07785	0,17916	0,4823	0,7512	1,2456	2,29	3,5802
1	0,00374	0,02637	0,06534	0,15043	0,4053	0,6317	1,0488	1,9315	3,0262
1,1	0,00319	0,0225	0,05576	0,12841	0,3462	0,5399	0,897	1,6544	2,5961
1,2	0,00276	0,01947	0,04824	0,11112	0,2997	0,4676	0,7774	1,4354	2,2552
1,3	0,00242	0,01704	0,04223	0,09728	0,2625	0,41	0,6813	1,2591	1,9801
1,4	0,00214	0,01506	0,03733	0,086	0,2321	0,3623	0,6029	1,1149	1,7547
1,5	0,00191	0,01342	0,03328	0,07667	0,207	0,3232	0,5379	0,9953	1,5674
1,6	0,00171	0,01206	0,02988	0,06887	0,186	0,2904	0,4834	0,8949	1,41
1,7	0,00155	0,0109	0,02701	0,06226	0,1681	0,2626	0,4372	0,81	1,2764
1,8	0,00141	0,00991	0,02456	0,05661	0,1529	0,2388	0,3977	0,7368	1,1618
1,9	0,00129	0,00905	0,02245	0,05174	0,1398	0,2183	0,3636	0,6738	1,0628
2	0,00118	0,00831	0,02061	0,0475	0,1283	0,2005	0,334	0,619	0,9765

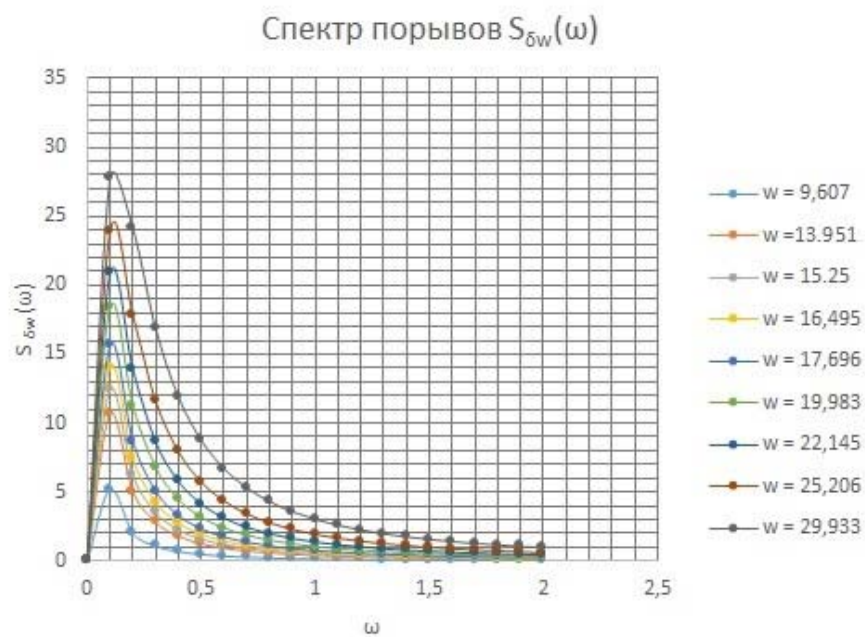


Рис. 3 Спектральные плотности ветра

С учетом выражений (9) (10) окончательно получим

$$\delta l_{w2} = \frac{(z_v - d/2)}{z_v} \frac{6,5\sqrt{D_{\delta w}}}{\bar{w}} l_{w1} \quad (20)$$

и

$$l_{w2} = l_{w1} + l_{w2} = l_{w1} + \frac{z_v - d/2}{z_v} \frac{6,5\sqrt{D_{\delta w}}}{\bar{w}} l_{w1} = l_{w1} \left[1 + \frac{z_v - d/2}{z_v} \frac{6,5\sqrt{D_{\delta w}}}{\bar{w}} \right]. \quad (21)$$

Интересным является отношение

$$\frac{\delta l_{w2}}{l_{w1}} = \frac{(z_v - d/2)}{z_v} \frac{6,5\sqrt{D_{\delta w}}}{\bar{w}}. \quad (22)$$

Ниже представлена таблица и график соотношения (22) для двух значений $\frac{(z_v - d/2)}{z_v}$, приближенно взятых 0,5 и 0,75, когда $z_v = d$ и $z_v = 2d$ соответственно:

Таким образом можно выбирать значение кренящего плеча от порыва ветра l_{w2} в зависимости от значения плеча парусности z_v , интерполируя значения рис. 4 между $z_v = d$ и $z_v = 2d$.

Таблица 5
Прибавка от порывистости ветра

w	$D_{\delta w}$	$\frac{\delta l_{w2}}{l_{w1}}$	$\frac{\delta l_{w2}}{l_{w1}}$
		$z_v = d$	$z_v = 2d$
9,607	1,141015	0,361361	0,542041
13,951	2,689351	0,382034	0,573051
15,25	3,268014	0,385261	0,577892
16,495	3,868409	0,387523	0,581284
17,696	4,4883	0,389089	0,583634
19,983	5,774288	0,390816	0,586223
22,145	7,111502	0,391371	0,587056
25,206	9,196862	0,39102	0,58653
29,933	12,83664	0,389008	0,583512

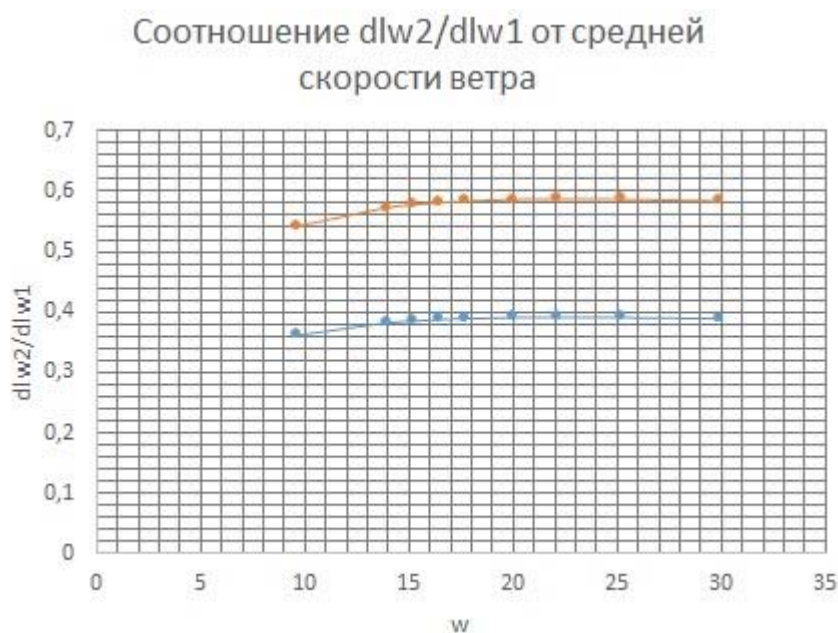


Рис. 4 Добавка к плечу кренящего момента от действия порыва ветра

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Луговский В.В. Теоретические основы нормирования остойчивости морских судов. Ленинград. «Судостроение», 1971.
2. Правила постройки классификации морских судов, часть IV, РМРС, СПб, 2017
3. Francescutto A., Serra A., Scarpa S. "A Critical Analysis of Weather Criterion for Intact Stability of Large Passenger Vessels", Proc. 20th Int. Conf. OMAE.01, Rio de Janeiro, 3-8 June 2001.
4. Davenport A. G. Spectrum of Horizontal Gustiness near the Ground in Strong Winds., Journal of the Royal Meteorological Society, Vol. 87, April 1961, pp. 194-211.
5. Vassalos D., Jasionowski A., Cichowicz J. Weather Criterion. Questions and Answers. Proc. STAB2003, Madrid, 2003, pp. 695-705.

REFERENCES

1. Lugovskiy V. V. Teoreticheskie osnovy normirovaniya ostoichivosti morskikh sudov [Theoretical basics of norming the stability of the sea-going ships]. Leningrad, "Shipbuilding" Publ., 1971.
2. Pravila postrojki klassifikacii morskikh sudov, chast' IV [Rules for the Classification and Construction of Sea-Going Ships, Part IV]. RMRS. St. Petersburg, 2017.
3. Francescutto A., Serra A., Scarpa S. "A Critical Analysis of Weather Criterion for Intact Stability of Large Passenger Vessels", Proc. 20th Int. Conf. OMAE.01, Rio de Janeiro, 3-8 June 2001.
4. Davenport A. G. Spectrum of Horizontal Gustiness near the Ground in Strong Winds., Journal of the Royal Meteorological Society, Vol. 87, April 1961, pp. 194-211.
5. Vassalos D., Jasionowski A., Cichowicz J. Weather Criterion. Questions and Answers. Proc. STAB2003, Madrid, 2003, pp. 695-705.



МАТЕРИАЛЫ И СВАРКА

УДК 629.5:656.6

ПРИМЕНЕНИЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ РЕМОНТЕ КОРПУСОВ МОРСКИХ СУДОВ

М.Д. Емельянов, канд. техн. наук, АО «Центральный научно-исследовательский институт морского флота», Санкт-Петербург, тел.: +7 (812) 275-89-45, e-mail: emelyanov@cniimf.ru

Э.В. Соминская, канд. техн. наук, АО «ЦНИИМФ», Санкт-Петербург

В статье представлены примеры использования полимерных и композитных материалов при ремонте конструкций надстройки судна. Приведены современные эпоксидные материалы, позволяющие получать композиты с широким спектром регулируемых свойств, таких как: вязкость, эластичность, жизнеспособность, адгезия и т.п. Представлены результаты испытаний перспективных ингибиторов коррозии и пассивирующих составов на основе ортофосфорной кислоты. Даны рекомендации по их применению. Приведена информация о разработке новых требований Российского морского регистра судоходства.

Ключевые слова: полимерные и цементные покрытия, эпоксидные композиции, ингибиторы коррозии, преобразователи ржавчины.

APPLICATION OF COMPOSITE MATERIALS IN THE REPAIR OF STRUCTURES OF SEA-GOING SHIPS

M.D. Emelyanov, PhD, JSC "Central Scientific Research Institute of Marine Fleet", St. Petersburg, tel.: +7 (812) 275-89-45, e-mail: emelyanov@cniimf.ru

E.V. Sominskaya, PhD, JSC "Central Scientific Research Institute of Marine Fleet", St. Petersburg

This article presents examples of the use of polymeric and composite materials during the repair of a ship's superstructure. Modern epoxy materials, which allow to obtain a wide range of composites with controlled properties, such as viscosity, elasticity, adhesion, viability etc, are discussed. The results of tests for perspective corrosion inhibitors and passivating compounds based on phosphoric acid are also presented. The article provides recommendations on their application, as well as the information related to the development of new requirements for the Rules of Russian Maritime Register of Shipping.

Keywords: polymer and cement coatings, epoxy composition, corrosion inhibitors, rust converters

Применение полимерных и композиционных материалов существенно уменьшает затраты и сроки ремонта судна. В ряде случаев из соображений пожарной безопасности выполнение сварки запрещено, например, в машинном отделении при хранении в нем запасов топлива.

При ремонте конструкций надстройки использование полимерных материалов позволяет отказаться от огневых и сопутствующих им работ (зашивка помещений, перекладка кабельных трасс и т.п.), в результате чего стоимость ремонта снижается в 2 – 3 раза.

Наиболее подходящими для судоремонта являются эпоксидные композиции ввиду их слабой восприимчивости к внешним условиям, а именно: к высокой влажности и низкой температуре. Однако эпоксидные композиции первого поколения, такие как эпоксидные диановые смолы ЭД-16 и ЭД-20, отверждаемые полиэтиленполиамином (ПЭПА), имели ряд недостатков, среди которых – высокая вязкость связующего и хрупкость полимеризованного компаунда. Введение для снижения вязкости в смолу ЭД-20 органических растворителей приемлемо только в случае нанесения тонкослойных покрытий. В толстых слоях растворитель остается в полимерной матрице, резко снижая все ее прочностные характеристики, а также теплостойкость, водостойкость и химостойкость.

В настоящее время появились низковязкие модифицированные эпоксидные композиции и отвердители, позволяющие получать полимеры с широким спектром регулируемых свойств, таких как: вязкость, эластичность, жизнеспособность, адгезия и т.п.

Широкое применение полимерных клеев в технике в 70-х годах прошлого столетия привело к мысли о том, что стеклопластиковые покрытия смогут восстановить начальную прочность изношенных металлических корпусных конструкций при минимальных издержках. Однако расчеты показали, что стеклопластиковое покрытие из-за низкого модуля нормальной упругости малоэффективно для этой цели.

На рис. 1 представлены зависимости, построенные при следующих исходных данных:

- металлический настил: предел текучести $R_{eH} = 235$ МПа; модуль нормальной упругости $E_M = 2,1 \cdot 10^5$ МПа; допускаемые напряжения $[\sigma]_M = 0,65 \cdot R_{eH} = 153$ МПа;

- стеклопластиковое покрытие: предел прочности при изгибе $\sigma_{if} = 170$ МПа; модуль нормальной упругости $E_{ст} = 1,2 \cdot 10^4$ МПа; допускаемые напряжения $[\sigma]_{ст} = 0,45 \cdot \sigma_{if} = 76,5$ МПа.

При изгибе от поперечной нагрузки первыми допустимых значений достигают напряжения в металлическом настиле.

При толщине покрытия, равном толщине настила, изгибающий момент для настила M_M возрастает в 1,54 раза по отношению к неподкрепленному настилу M_0 , что соответствует увеличению толщины металлического настила $\Delta t_M/t_M$ на 24 % (рис. 1а). При этом стеклопластиковое покрытие не реализует полностью свою несущую способность, так как в данном случае напряжения в покрытии составляют около 30 % от допускаемых (рис. 1б).

На практике выявился еще один недостаток стеклопластиковых покрытий – это внутренние напряжения, возникающие из-за разных коэффициентов температурного расширения стали и стеклопластика и вызванные усадкой связующего. Причем первые играют основную роль при изменении температуры окружающей среды. Эти напряжения в толстом покрытии, суммируясь по толщине, могут привести к появлению значительных сдвиговых усилия по границе «металл-покрытие», способных отслоить его от настила палубы.

Поэтому в настоящее время стеклопластиковые заделки и наформовки применяются на небольших участках, где необходимо восстановить форму отдельных корродированных элементов судовых конструкций (рис. 2).

В настоящее время полимерные покрытия палуб выполняются путем нанесения на них эпоксидных

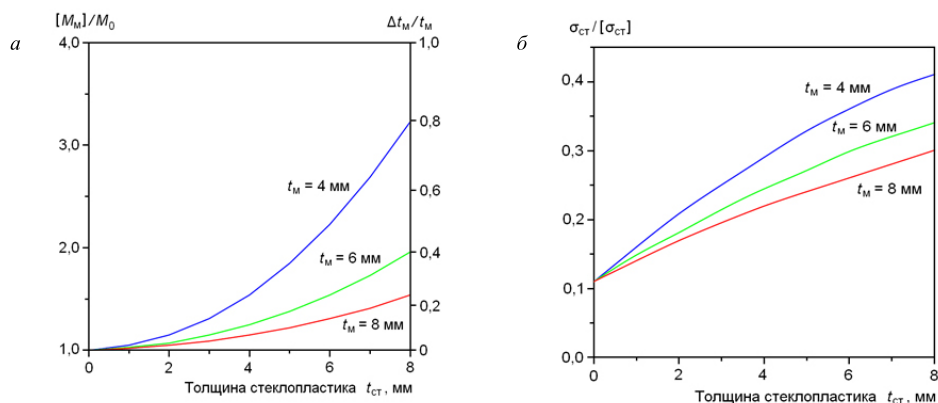


Рис. 1 Подкрепление металлического настила палубы стеклопластиковым покрытием
а – увеличение несущей способности настила со стеклопластиковым покрытием
б – напряжения в стеклопластиковом покрытии

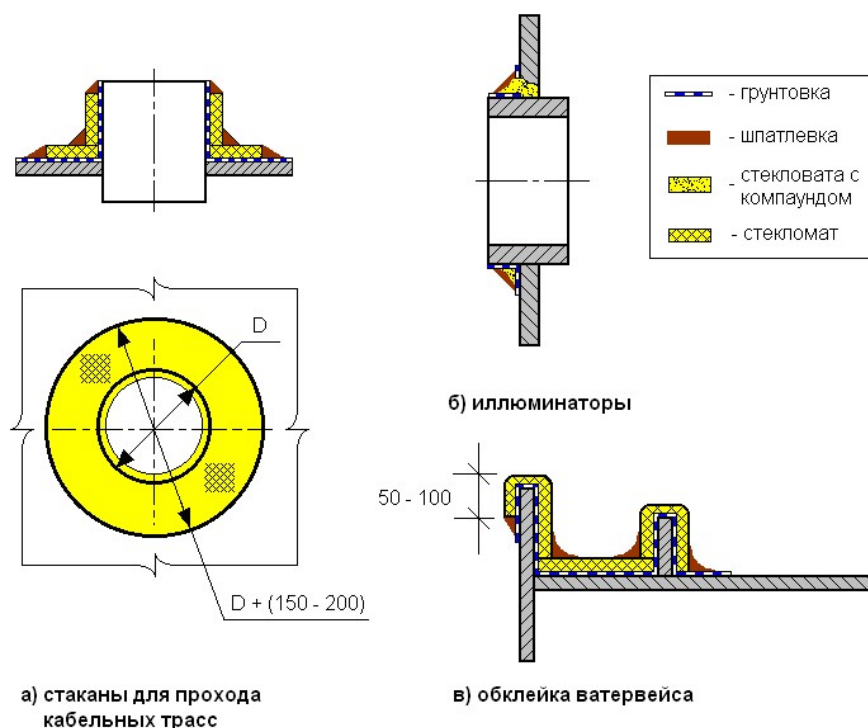


Рис. 2 Примеры стеклопластиковых заделок и наформовок

мастик [1]. Мasticные покрытия палубы предназначены для защиты от коррозии настила палуб, имеющего обширные язвенные повреждения, и предотвращения появления сквозной коррозии. Толщина покрытия может колебаться в пределах 0,5 – 3,0 мм. В случае нанесения толстых мasticных покрытий их рекомендуется армировать стеклянной или полимерной сеткой с размером ячеек от 2,5 × 2,5 мм до 6 × 6 мм для предотвращения растрескивания.

Покрытие состоит из слоя грунтровки, грунт-шпатлевки, мастики и несмывающегося окрасочного слоя (рис. 3).

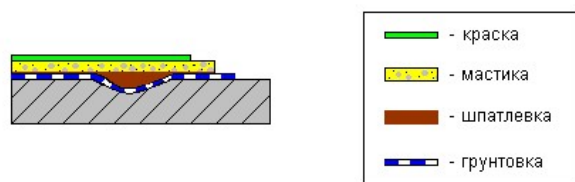


Рис. 3 Мasticное покрытие металлической палубы

Шпатлевка служит для сглаживания локальных неровностей. Мастика предназначена для окончательного общего выравнивания поверхности палубы и в качестве барьера на пути проникновения воды.

Мастики приготавливают из эпоксидного компаунда, в который с целью уменьшения расхода дорогостоящего связующего добавляют мелкий кварцевый песок с модулем крупности $M_k = 0,5 - 1,0$ мм и мелкодисперсный твердый наполнитель, остающийся во взвешенном состоянии в процессе полимеризации, например, маршалит (кварц молотый пылевидный) по ГОСТ 9077-82 или фарфоровая мука.

Поскольку эпоксидные покрытия имеют низкий коэффициент трения, особенно при попадании на него воды, то на палубе мasticный слой следует окрасить палубной эмалью, например, ПФ-1145.

Альтернативой мasticному покрытию палубы является армоцементное покрытие [2, 3]. Бетон и металл являются хорошим сочетанием для конструкции, что подтверждает опыт эксплуатации железобетонных доков. Цементный раствор имеет щелочную среду ($pH = 11 - 12$), в которой коррозионные процессы не развиваются. Поэтому и через 50 лет стальная арматура в железобетоне находится в удовлетворительном состоянии, если не был поврежден защитный цементный слой. У бетона есть еще одно положительное свойство – практически одинаковый со сталью коэффициент температурного расширения, что исключает в нем появление внутренних напряжений.

Настилы палуб надстроек у судов, долго находящихся в эксплуатации, как правило, имеют

вмятины, бухтины и гофрировку, которые невозможно получить при заливании водой, и являются следствием воздействия нерасчетных нагрузок.

Следует отметить, что при проектировании корпуса судна толщину настила палуб надстройки выбирают из условия удовлетворения двух требований: к прочности и к минимальной построечной толщине. При этом возникновение в эксплуатации массовых повреждений палубы как правило связано с воздействием так называемых нерасчетных нагрузок, таких как временная установка груза, оборудования или снабжения на палубу и т.п. Поэтому схему приложения нагрузки для нерасчетных случаев можно принять как действие сосредоточенного усилия или распределенной поперечной нагрузки в пределах одного пролета пластины (т.е. балку-полоску пластины настила можно рассматривать шарнирно опертой по концам). В этих условиях цементное покрытие испытывает сжатие, а металлический настил находится в растянутой зоне сечения.

Как показала практика, в армоцементном покрытии палубы не возникают трещины, если его толщина не менее 30 мм. При такой толщине вклад покрытия в увеличение несущей способности настила палубы оказывается существенным.

На рис. 4 представлена зависимость несущей способности балки-полоски подкрепленного настила при следующих исходных данных цементного покрытия: прочность при сжатии $\sigma_{сж} = 32,5$ МПа; модуль нормальной упругости $E_{ц} = 2,6 \cdot 10^4$ МПа; допускаемые напряжения $[\sigma_{ц}] = 0,6 \cdot \sigma_{сж} = 19,5$ МПа.

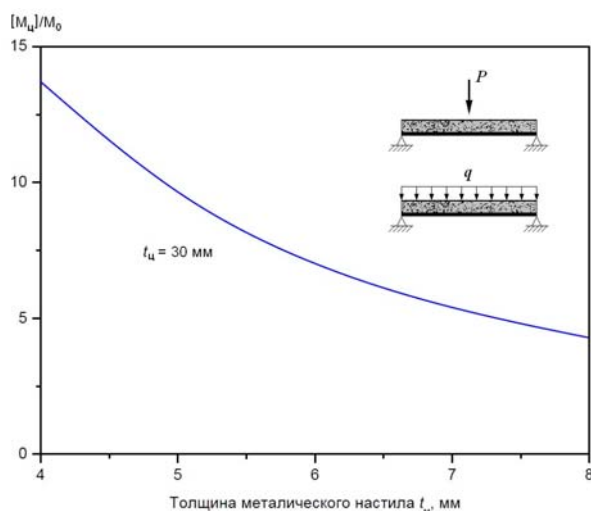


Рис. 4 Увеличение несущей способности настила, подкрепленного армоцементным покрытием толщиной 30 мм

Здесь, в отличие от мастичного покрытия «слабым звеном» является цементный слой. Как следует из представленной зависимости, допусти-

мые напряжения в цементном слое даже при толщине металлического настила равном 8 мм возникают при нагрузке более чем 4 раза выше, чем у неподкрепленного настила, что соответствует утолщению последнего более чем 2 раза.

Армоцементная стяжка состоит из слоя грунтовки, клеевого компаунда, присыпанного крупным строительным песком; нижнего и верхнего слоев цементной стяжки, между которыми уложена армированная металлическая сетка, пропиточного состава для стяжки, мастичного и окрасочного слоев (рис. 5а). Для армирования обычно используется металлическая сетка с размером ячеек 10×10 мм и диаметром проволоки 1,0 мм или 8×8 мм и диаметром проволоки 0,8 мм.

Верхний слой цементной стяжки может изготавливаться из самовыравнивающейся смеси типа «Ветонит», армированный штукатурной пластиковой или щелочеустойчивой стеклянной сеткой с размером ячеек от 5×5 мм до 20×20 мм. В этом варианте мастичный слой не наносится (рис. 5б).

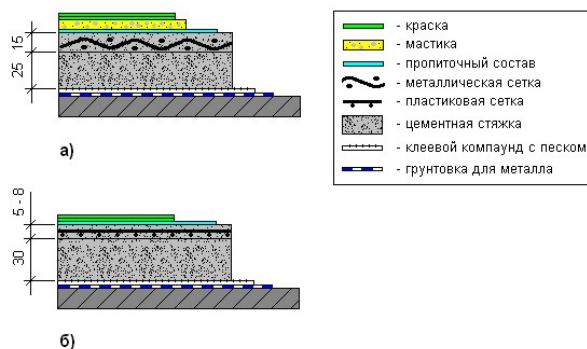


Рис. 5 Армоцементные стяжки с металлической сеткой (а), с пластиковой сеткой и слоем Ветонита (б)

Недостатками армоцементного покрытия являются длительность работ по его устройству и большой вес покрытия.

Сроки нанесения покрытия во многом определяются временем созревания цементной стяжки и ее сушки перед нанесением финишных слоев. В среднем, на выполнение ремонтных работ с устройством цементной стяжки требуется не менее 2-х недель, что в 2 – 3 раза больше, чем при нанесении мастичного покрытия.

Плотность цементной стяжки составляет $2,2 - 2,4$ г/см³. Для крупнотоннажных судов эта дополнительная весовая нагрузка малозначима. Так как армоцементное покрытие повышает аппликату центра тяжести судна, то при устройстве покрытия на палубах верхних ярусов надстройки необходим расчетный контроль остойчивости.

Сравнение мастичного и армоцементного покрытия показывает, что при ограничении в

сроках ремонта и на маломерных судах предпочтительно применять мастичные покрытия палубы, в остальных случаях – армоцементные покрытия.

При наличии сквозной коррозии в настиле или в обшивке судовых конструкций ремонт может осуществляться наформовкой стеклопластиковых заделок или путем установки металлических пластин толщиной 2 – 3 мм [4]. Первый способ допустим при использовании мастичного или армоцементного покрытия. Ремонт с установкой металлических пластин обладает более высокой надежностью и может быть рекомендован для любых конструкций. На рис. 6 приведен пример коррозионного повреждения стенок надстройки и способ их ремонта путем установки металлической пластины.



Рис. 6 Ремонт стенок надстройки установкой металлических пластин

а – сквозная коррозия в стенке надстройки
б – способ ремонта

При использовании металлических пластин их крепление к поврежденному участку осуществляется с помощью клея и резьбы, которая в ремонтируемой конструкции выполняется шурупами-саморезами. Преимущество комбинированного соединения заключается в том, что достоинства одного вида соединения компенсируют недостатки другого: в клеевом соединении нагрузка распределена равномерно, но клеевой слой плохо сопротивляется распространению трещин; в резьбовом соединении нагрузка воспринимается только в точках крепления. В комбинированном соединении нагрузка воспринимается клеевым слоем и шурупами, причем последние эффективно тормозят рост трещин и обеспечивают прижатие пластины при склеивании. В результате такое соединение по прочности незначительно уступает сварному шву.

Ни одно полимерное покрытие не является абсолютной защитой от проникновения воды и кислорода воздуха к поверхности металла и развитию коррозионных процессов. В покрытии могут быть микротрещины, капилляры и каналы, образованные после выхода пузырьков воздуха на поверхность.

Для снижения скорости коррозионных процессов используют два подхода: утолщение полимерного покрытия и использование ингибиторов коррозии, наносимых на металлическую поверхность. В первом подходе удлиняется путь проникновения молекул воды к металлу. Во втором – металлическая поверхность защищается пленкой, предотвращающей контакт металла с водой.

Для защиты новых металлических листов или ремонтируемой поверхности после абразивно-струйной обработки до степени Sa 2½ (ИСО 8501-01-1988) предпочтительно использовать ингибитор ФМТ (ТУ 24-003-48938796-2003).

Ингибитор атмосферной коррозии ФМТ представляет собой жидкий растительный продукт на основе жирных кислот таллового масла, модифицированных производными хлорофилла. Совместим с органическими растворителями, особенно с углеводородами. Не растворим в воде. Ингибирующий эффект заключается в том, что при нанесении на металлическую поверхность он образует нанослой, обладающий гидрофобными свойствами, который изолирует металл от воды и тем самым препятствует протеканию коррозионных процессов (рис. 7). Наносится тонким слоем без подтеков в виде 3 – 4 % раствора в уайт-спирите методом распыления. (Толстый слой ингибитора существенно ухудшает адгезию лакокрасочного покрытия). Перед нанесением последующих полимерных слоев на поверхность следует нанести межоперационную грунтовку ВЛ-023 или ЭП-063, которые из-за высокого содержания в них растворителя обеспечивают проникновение грунтовки через ингибитор ФМТ к поверхности металла.

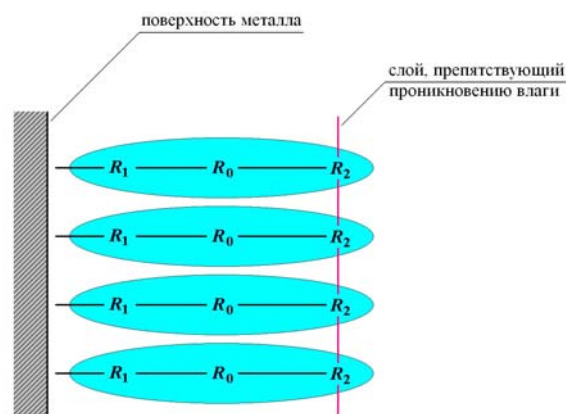


Рис. 7 Механизм защитного действия органических ингибиторов коррозии

R_1 – функциональная группа, обеспечивающая адсорбцию молекулы ингибитора на поверхности металла; R_0 – ядро молекулы ингибитора; R_2 – гидрофобная функциональная группа, препятствующая проникновению воды к поверхности металла

Эффективность действия ингибиторов коррозии обычно оценивают по коэффициенту торможения коррозии γ (защитный или «барьерный» эффект ингибитора). Коэффициент торможения показывает, во сколько раз под действием ингибитора уменьшается скорость коррозии.

Об эффективности ингибитора ФМТ можно судить по рис. 8, на котором приведены результаты коррозионных испытаний различных ингибиторов коррозии и представлены значения коэффициента торможения (барьерного эффекта) γ [5].

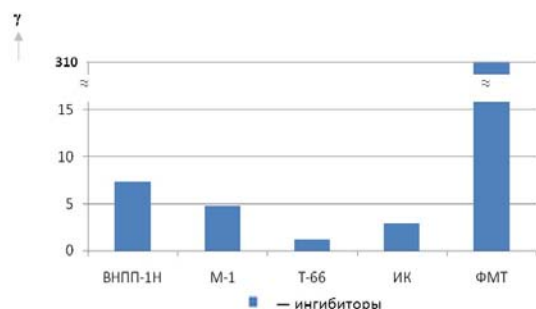


Рис 8. «Барьерный» эффект γ при адсорбции на стали ингибиторов коррозии в дистиллированной (ДТ), 1 %

Испытания, проведенные на образцах, покрытых ингибитором ФМТ и лакокрасочным покрытием, показали, что даже при наличии глубокой царапины в покрытии подпленочная коррозия эффективно тормозится.

Для оценки степени сцепления полимерных покрытий с металлической поверхностью, обработанной ингибитором ФМТ, в АО «ЦНИИМФ» были проведены испытания на адгезию методом решет-

чатых надрезов по ГОСТ 31149-2014 и Х-образного надреза по ГОСТ 32702.2-2014.

Для исследования были изготовлены образцы из углеродистой стали Ст3 размером $150 \times 100 \times 2$ мм. Образцы не имели коррозионных повреждений, необходимая шероховатость была создана механическим способом абразивным инструментом и наждачной (соответствует степени очистки St 3 по ИСО 8501-1:1988). На образцы были последовательно с межоперационной сушкой нанесены: 5 % раствор ингибитора ФМТ в уайт-спирите, грунтовка ВЛ-023, грунт-шпатлевка ЭП-0010. После высыхания образцов в соответствии с рекомендованными сроками сушки было выполнено исследование на адгезию.

Испытания показали, что адгезия не превышала 1 балл, о чем свидетельствует рис. 9.

Результаты испытаний показали, что хорошая адгезия обеспечивается только при нанесении тонкого слоя ингибитора методом распыления без образования подтеков.

По-видимому, хорошие показатели сцепления межоперационной грунтовки ВЛ-023 связаны с высоким содержанием в ней растворителя, который обеспечивал проникновение грунтовки через ингибитор ФМТ к поверхности металла.

Если очистка ремонтируемой поверхности конструкции осуществлялась механическим инструментом до степени St 2 (ISO 8503-1) и в язвинах остались не удаленные продукты коррозии, то ее поверхность необходимо обработать преобразователем ржавчины, содержащим ортофосфорную кислоту. Ортофосфорная кислота преобразует окислы железа в плотную хорошо держащуюся на поверхности фосфатную пленку, имеющую необходимую



а)



б)

Рис. 9 Образцы с решетчатыми и Х-образным надрезами
а – решетчатые надрезы покрытия толщиной до 250 мкм (ГОСТ 31149-2014)
б – Х-образный надрез покрытия толщиной свыше 250 мкм (ГОСТ 32702.2-2014)

шероховатость для нанесения на нее грунтовочного слоя. Эта фосфатная пленка выполняет функцию дополнительного барьера на пути проникновения воды к металлической поверхности.

В качестве преобразователя ржавчины с ингибирующим эффектом в СПб ГМТУ под руководством профессора В.И. Трусова был разработан состав NOTEX (ТУ 21-02-48938798), дополнительно содержащий в своем составе ингибитор коррозии анодного типа.

Механизм действия ингибитора коррозии анодного типа состоит в том, что он способен поглощать электроны, и тем самым переводит поверхность металла в пассивное, стабильное состояние.

Испытания ингибирующего преобразователя ржавчины NOTEX, проведенные сотрудниками ФГУП «ЦНИИ КМ «Прометей» в 2000 г. на образцах, очищенных до степени Sa 2½, показали следующее:

1) адгезия грунтовки ЭФ-065 как к чистому металлу, так и обработанному составом NOTEX до и после испытаний имела балл 1;

2) значение распространения коррозии под пленкой покрытия от надреза на образцах, обработанных составом NOTEX существенно ниже.

Аналогичные результаты были получены в АО «ЦНИИМФ» при испытании образцов из стали Ст3, очищенных до степени St 2, обработанных составом NOTEX и покрытых ЛКМ: грунтовкой ЭФ-065, эмалью ЭП-1236 и эмалью ХС-436.

Защитный эффект от ортофосфорной кислоты усиливается при введении в состав ингибитора коррозии, солей цинка и марганца. При этом цинк подавляет возникающую коррозию, а марганец создает эффект легирования, укрепляя защитный слой.

К этой группе преобразователей ржавчины относятся составы марок «Цинкар» (ТУ 2384-111-27994253-02), содержащий ортофосфорную кислоту, соли марганца и цинка; «Анкор-1» (ТУ РБ 00981781.014-98), представляющий собой водный раствор ортофосфорной кислоты с оксидом цинка, бихроматом натрия (или калия) и солью тринатрий-фосфата.

Учитывая вышеуказанную информацию, с целью совершенствования требований нормативных документов по заказу Российского морского регистра судоходства в 2017 году выполнена научно-исследовательская работа на тему «Разработка проекта требований Регистра к ремонту судовых металлических конструкций, узлов судовых механизмов и устройств, гребных винтов с применением композитных и полимерных материалов, включая типовые технологические процессы».

В рамках проведенной научно-исследовательской работы подготовлен проект новых требований

Регистра к ремонту судовых металлических конструкций с применением композитных (композиционных) и полимерных материалов ("Инструкция по определению технического состояния, обновлению и ремонту корпусов морских судов"). Предложены требования к нанесению эпоксидных и армоцементных покрытий, установка металлических и наформовка стеклопластиковых накладок в качестве метода ремонта надстройки судна. Эти методы позволяют устранить водотечность конструкции без замены ее элементов при условии, что их прочность (средняя остаточная толщина) обеспечена.

Методические рекомендации по техническому наблюдению за ремонтом морских судов (НД № 2-039901-005) в рамках результатов проведенной научной работы предлагается дополнить Приложением 6 «Применение полимерных материалов при ремонте морских судов», в котором приведена гамма современных эпоксидных компаундов, обладающих рядом ценных свойств по сравнению с традиционными полимерными материалами, а именно:

- отсутствием в своем составе растворителей и химически не связанных пластификаторов, ухудшающих механические характеристики материала;
- возможность выполнять ремонт при температуре окружающей среды от +10 °С (вместо +18 °С);
- регулирование скорости отверждения за счет использования отвердителей с разной степенью активности.

Впервые введены рекомендации по использованию наносимых на поверхность металла ингибиторов коррозии, увеличивающих срок службы полимерного покрытия в 1,5 – 2,0 раза.

Правила технического наблюдения за постройкой судов и изготовлением материалов и изделий для судов» (НД 2-020101-040) предлагается дополнить требованиями, предъявляемыми к предприятиям, осуществляющим деятельность в области ремонта объектов технического наблюдения с применением композитных и полимерных материалов.

Также в рамках проведенной научной работы обобщен опыт применения полимерных и композиционных материалов в судоремонте обобщен в стандарте организации СТО ЯКУТ.21.52-2017 «Руководство по ремонту судовых металлических конструкций, узлов судовых механизмов и устройств, гребных винтов с применением композитных и полимерных материалов. Типовые технологические процессы», разработанном в АО «ЦНИИМФ». В Руководстве приведены как хорошо зарекомендовавшие себя на практике эпоксидные композиции, так и перспективные современные материалы.

Таким образом, проект новых требований Регистра к ремонту судовых металлических конструкций с применением композитных (компози-

ционных) и полимерных материалов позволяет существенно снизить затраты на ремонт корпуса при обеспечении высокой долговечности отремонтированных конструкций.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 РД ЯКУТ.017-2001. Руководство по ремонту судовых конструкций, узлов судовых машин, механизмов и устройств, гребных винтов и спасательных шлюпок с применением композитных материалов.
- 2 РД ЯКУТ.019-2004. Ремонт судовых корпусных конструкций с применением полимерных материалов. Типовые технологические процессы.
- 3 Емельянов М.Д. Ремонт палуб судов с использованием армированных композитных покрытий. //В кн.: Техническая эксплуатация морского флота. – М., Транспорт, 1990, – С. 20 – 27.
- 4 Емельянов М.Д., Маркозов Г.В. Восстановительные технологии ремонта корпусов судов // Морской флот. – 2009, № 1. – С. 46-49.
- 5 Трусов В.И., Крымская Р.С., Бать Тхи Ми Хьен. Новые консервационные составы с безопасным ингибитором коррозии. // Экспозиция Нефть Газ. №6(31) октябрь 2013, С. 76-78.

REFERENCES

- 1 RD YaKUT.017-2001. Rukovodstvo po remontu sudovykh konstruktсий, uzlov sudovykh mashin, mekhanizmov i ustroystv, grebnykh vintov i spasatel'nykh shlyupok s primeneniem kompozitnykh materialov [RD YaKUT.017-2001. Repair manual for ship structures, machine structures, machinery, propellers and lifeboat with application of composite materials].
- 2 RD YaKUT.019-2004. Remont sudovykh korpusnykh konstruktсий s primeneniem polimernykh materialov. Tipovye tekhnologicheskie protsessy [Repair of ship structures with application of polymer materials. Standard technological process].
- 3 Emel'yanov M.D. Remont palub sudov s ispol'zovaniem armirovannykh kompozitnykh pokrytiy [Repair of ship decks with application of reinforced polymer coatings]. In book: Tekhnicheskaya ekspluatatsiya morskogo flota [Maintenance of shipping]. Moscow, Transport Publ., 1990, pp. 20-27.
- 4 Emel'yanov M.D., Markozov G.V. Vosstanovitel'nye tekhnologii remonta korpusov sudov [Reconstructive technologies of ship repair]. Morskoy flot [Marine fleet]. 2009, № 1, pp. 46-49.
- 5 Trusov V.I., Krymskaya R.S., Bat' Tkh'i Mi Kh'en. Novye konservatsionnye sostavy s bezopasnym ingibitorom korrozii [New conservation compositions with safe corrosion inhibitor]. Ekspozitsiya Neft' Gaz [Exposition Oil Gas]. 2013, № 6(31) Oktober, pp. 76-78.

УДК 004.925.84:629.5

ПРИМЕНЕНИЕ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ РЕШЕНИИ КОНСТРУКТОРСКИХ ЗАДАЧ В СУДОСТРОЕНИИ

А.Е. Киселева, АО «ПО «Севмаш», Северодвинск, e-mail: aekiseleva@bk.ru

Аддитивное формообразование, как процесс послойного формирования геометрии объектов, является быстрорастущей технологической отраслью, которой уделяется особое внимание как исследовательскими центрами, так и ведущими мировыми промышленными компаниями. Повышенный интерес к ней обусловлен потенциальными возможностями AF-технологий (Additive Fabrication), которые недостижимы субтрактивным формообразованием, например, обработкой резанием. AF-технологии практически не имеют ограничений на форму создаваемых конструктивов, позволяя создавать разнообразные внутренние структуры печатаемых объектов, а также использовать различные композиционные материалы, что приводит к возникновению новых физико-технических и эксплуатационных свойств таких изделий. В статье приведен краткий обзор наиболее распространенных видов аддитивных технологий в соответствии с терминологией стандарта ASTM F2792-10, разработанного международной организацией ASTM International. Проведен анализ возможностей использования AF-технологий в судостроительной индустрии. Приведены примеры использования функционального прототипирования при конструкторско-технологической подготовке производства, а также опытных работ в области аддитивного формообразования в АО «ПО «Севмаш». Представлена оценка перспектив аддитивных технологий в судостроительной отрасли.

Ключевые слова: аддитивные технологии, AF-технологии, 3D-печать, прототипирование, технология PolyJet, 3D-модель, судостроение

APPLICATION OF ADDITIVE TECHNOLOGIES IN SOLVING SHIPBUILDING DESIGN PROBLEMS

А.Е. Kiseleva, JSC "PO "Sevmash", Severodvinsk, e-mail: aekiseleva@bk.ru

Additive shaping as a process of layer-by-layer formation of objects' geometry is a fast-growing technology sector, attracting special attention of both research centers and world's leading industrial companies. This intense interest is due to the potential of Additive Fabrication, which are unattainable by subtractive shaping, for example, by cutting. AF-technologies have practically no restrictions on the shape of constructs under creation, they allow developing various internal structures of printed objects as well as using various composite materials resulting in new physical, technical and operational properties of such products. The article gives a brief summary of the most wide-spread types of additive technologies in accordance with terminology of ASTM F2792-10, developed by ASTM International organization. Applicability of AF-technologies in shipbuilding

is analyzed. Examples of functional prototyping use in design and preproduction engineering are given, as well as examples of experimental work in the field of additive shaping in JSC "PO "Sevmash". Opportunities for additive technologies in shipbuilding industry are assessed.

Keywords: additive technology, AF-technology, 3D-printing, prototyping, PolyJet technology, 3D-model, shipbuilding

ВВЕДЕНИЕ

Аддитивное формообразование, как процесс послойного формирования геометрии объектов, является быстрорастущей технологической отраслью, которой уделяется серьезное внимание как ведущими исследовательскими центрами, так промышленными компаниями в области энергетики, автомобилестроения, аэрокосмической отрасли, медицины [1, 2, 3, 4]. Повышенный интерес исследователей обусловлен потенциальными возможностями АФ-технологий (от англ. Additive Fabrication, add – добавлять), которые недостижимы субтрактивным формообразованием, например, обработкой резанием. АФ-технологии практически не имеют ограничений на форму создаваемых конструктивов, позволяют создавать разнообразные внутренние структуры печатаемых объектов, а главное, использовать различные композиционные материалы, что приводит к возникновению новых физико-технических и эксплуатационных свойств таких изделий.

Активное развитие аддитивной технологии началось с 80-х годов прошлого столетия [5, 6]. Ее появление было обусловлено быстрыми темпами развития вычислительной техники, математического и программного обеспечения систем трехмерной геометрии, разработкой новых материалов. Аддитивные технологии представляют собой технологию формирования изделия по данным цифровой геометрической модели методом послойного нанесения материала. Прямым подтверждением широкого распространения аддитивных технологий формообразования является тот факт, что международной организацией ASTM International в области стандартизации был разработан стандарт ASTM F2792-10 [7], содержащий описание основных физических и технологических принципов послойного формирования геометрии трехмерных объектов. В соответствии с терминологией этого стандарта, в отраслях машиностроения к наиболее распространенным видам АФ технологий можно отнести:

- SLA (Stereolithography Apparatus) – отверждение слоя фото-полимера происходит посредством лазерного луча;
- SLS (Selective Laser Sintering) – послойное лазерное спекание порошкового полимера;
- DMF (Direct Metal Fabrication) и SLM (Selective Laser Melting) – послойное лазерное спекание/плавление металлопорошковых композиций;

- DLP (Digital Light Procession) – засветка цифровым прожектором слоя фото-полимера;
- PolyJet – нанесение слоя фото-полимера через головку и его отверждение посредством засветки ультрафиолетовой лампой;
- FDM (Fused Deposition Modeling) – послойное наложение расплавляемых нитевидных полимеров;
- InkJet – отверждение слоя порошкового материала путем нанесения связующего состава через головку [8].

Несмотря на то, что в настоящее время они не находят широкого применения в отечественной промышленности ввиду дороговизны оборудования и материалов, отсутствия подготовленного персонала и несовершенства самой технологии 3D-печати, есть основания полагать, что в ближайшей перспективе данная ситуация будет претерпевать существенные изменения в положительную сторону. Аддитивные технологии представляются в настоящее время наиболее применимыми в традиционно технологически продвинутых отраслях, таких как медицина, космос, авиация, но не стоит недооценивать их перспективы в такой консервативной отрасли, как судостроение.

ПРИМЕНЕНИЕ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В СУДОСТРОЕНИИ

В настоящий момент первопроходцем в использовании аддитивной технологии в судостроительной отрасли является немецкая компания HanseYachts AG по выпуску моторных лодок и яхт [9]. Британской компанией CJR Propulsion аддитивные технологии были использованы для прототипирования гребных винтов и рулевого оборудования [9]. На печатных опытных образцах проводятся гидродинамические испытания и отработка конструкции винта.

Нельзя не упомянуть тот факт, что повсеместно применяемые на отечественных судостроительных заводах технологии формования корпуса предвещают развитие цифрового производства на верфях, так как они близки по своей технологической цепочке к АФ технологиям. В настоящее время на нескольких российских судостроительных предприятиях, входящих в АО «Объединенная судостроительная корпорация», применяется технология наложения стеклопластика для создания надстроек тральщиков,

Эта проблема была решена при помощи 3D печати путем пересмотра требований к конструкции и ее материалу.

Кроме проверки устройств на собираемость, следует признать успешным опыт по воссозданию уникальных полимерных деталей оборудования, поврежденных в ходе эксплуатации. Типичная последовательность при восстановлении утраченных деталей представлена на рис. 2.

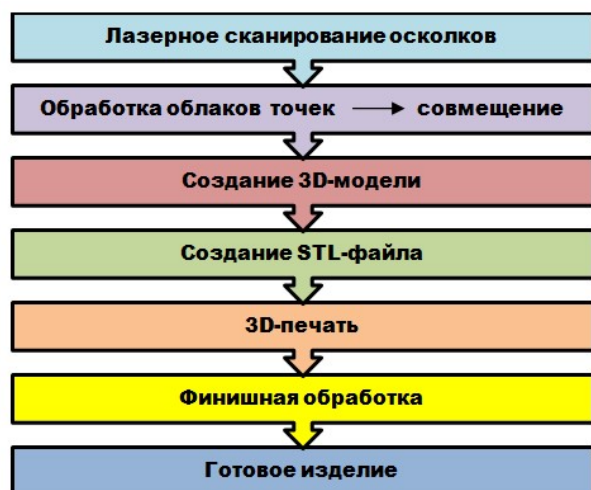


Рис. 2 Технологическая цепочка операций при воссоздании полимерных деталей оборудования

По результатам лазерного сканирования, проводимого с использованием оборудования SURPHASER 100HSX и HandySCAN700, образуются облака точек, которые с помощью системы автоматизированного проектирования CATIA проходят обработку и совмещаются в единую модель, на базе которой формируется трехмерный цифровой макет изделия и физически воссоздается в процессе 3D-печати.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подводя итог, можно сказать, что внедрение аддитивных технологий в отечественном судостроении находится на начальном этапе своего развития. Толчком для их активного развития должны стать такие факторы как: снижение стоимости оборудования, совершенствование существующих и создание новых материалов, подготовка квалифицированного персонала, формирование новых стандартов и нормативных документов. С уверенностью можно сказать, что аддитивные технологии прочно войдут в судостроительную индустрию и будут способствовать появлению изделий нового качества, позволяя при этом на порядок ускорить

НИОКР и решение задач по подготовке производства.

В заключении следует также отметить, что по имеющимся данным [10] на первый план начинают выходить АФ-технологии, связанные с созданием металлических изделий методами лазерного спекания. Получаемые при этом изделия сложной формы из труднообрабатываемых сплавов с особыми свойствами, существенным образом позволяют сократить общее количество сборочных операций, таких как, например, сварка или пайка. Повышенный интерес машиностроительного сектора к этому виду АФ-технологий подтверждается увеличением продаж оборудования для послойного спекания металлических порошков за последние пять лет более, чем в 5 раз.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Breltinger, F. Rapid Tooling for Simultaneous Product and Process Development: Part II, RapidNEWS, Vol. 5, No. 6, pp. 52–57, 1997.
2. Kruth J P, Vandenbroucke B, Vaerenbergh J V, Mercelis P. Benchmarking of different SLS/SLM processes as rapid manufacturing techniques. In: Proceedings of International Conference Polymers & Moulds Innovations (PMI). Gent, Belgium, 2005.
3. Levy G N, Schindel R, Kruth J P. Rapid manufacturing and rapid tooling with layer manufacturing (LM) technologies, state of the art and future perspectives. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2003, 52(2): 589–609.
4. Lewis G K, Schlienger E. Practical considerations and capabilities for laser assisted direct metal deposition. Materials & Design, 2000, 21(4): 417–423.
5. Jacobs, P.F. Rapid Prototyping and Manufacturing, Society of Manufacturing Engineers, pp. 1–23, 153–220, 1992.
6. Jacobs P.F. Rapid Prototyping & Manufacturing: Fundamentals of StereoLithography. USA: SME, 1992. – 434 p.
7. ASTM. ASTM F 2792–10 standard terminology for additive manufacturing technologies.
8. Баева Л.С., Маринин А.А. Современные технологии аддитивного изготовления объектов. Вестник МГТУ, 2014, том 17, №1, стр. 7–12.
9. Аддитивные технологии в судостроении: настоящее и будущее: [Электронный ресурс]. URL: <http://integral-russia.ru/2017/04/03/additivnye-tehnologii-v-sudostroenie-nastoyashhee-i-budushhee>. (Дата обращения 24.03.2017)
10. Introduction to Additive Manufacturing Technology. European Powder Metallurgy Association, 2015. – 42 p.

REFERENCES

1. Breltinger, F. Rapid Tooling for Simultaneous Product and Process Development: Part II, RapidNEWS, vol. 5, № 6, pp. 52–57, 1997.
2. Kruth J P, Vandenbroucke B, Vaerenbergh J V, Mercelis P. Benchmarking of different SLS/SLM processes as rapid manufacturing techniques. In: Proceedings of International Conference Polymers & Moulds Innovations (PMI). Gent, Belgium, 2005.
3. Levy G N, Schindel R, Kruth J P. Rapid manufacturing and rapid tooling with layer manufacturing (LM) technologies, state of the art and future perspectives. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2003, 52(2): 589–609.

4. Lewis G K, Schlienger E. Practical considerations and capabilities for laser assisted direct metal deposition. *Materials & Design*, 2000, 21(4): 417–423.
5. Jacobs, P.F. *Rapid Prototyping and Manufacturing*, Society of Manufacturing Engineers, pp. 1–23, 153–220, 1992.
6. Jacobs P.F. *Rapid Prototyping & Manufacturing: Fundamentals of StereoLithography*. USA: SME, 1992, 434 p.
7. ASTM. ASTM F 2792–10 standard terminology for additive manufacturing technologies.
8. Baeva L.S., Marinin A.A. *Sovremennye tekhnologii additivnogo izgotovleniya ob'ektov* [Modern technologies of additive manufacturing of objects]. *Vestnik MGTU* [Bulletin of MSTU]. 2014, vol. 17, № 1, pp. 7–12 (In Russian)
9. Additive technology in the shipbuilding industry: present and future. Available at: <http://integral-russia.ru/2017/04/03/additivnyie-tehnologii-v-sudostroenie-nastoyashhee-i-budushhee>. (accessed 24.03.2017) (In Russian)
10. *Introduction to Additive Manufacturing Technology*. European Powder Metallurgy Association, 2015, 42 p.

ОБОЗРЕНИЕ: ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ РС С МОРСКИМИ ВУЗАМИ

СТУДЕНЧЕСКАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ



21 ноября в Актовом зале Главного управления РС прошла студенческая научно-техническая конференция при участии специалистов Регистра. Тематика конференции была посвящена проектированию и эксплуатации судов и морских сооружений, безопасности мореплавания и охране окружающей среды.

Мероприятие состоялось в рамках развития сотрудничества российского классификационного общества с морскими вузами. Студенты Санкт-Петербургского государственного морского технического университета и Государственного университета морского и речного флота им. С.О. Макарова представили свои доклады, темы которых были связаны с анализом международных требований и Правил РС, мировых тенденций судостроения. В спектре исследовательской работы будущих морских специалистов также находятся управление рисками, снижение металлоемкости конструкций ледовых усилений, вопросы навигации и методы расчета нагрузок на конструкции корпуса судна.

КОНКУРС СТУДЕНЧЕСКИХ ДИПЛОМНЫХ РАБОТ

В 2017 г. Российский морской регистр судоходств провел традиционный конкурс студенческих дипломных работ. Для участия в конкурсе принимались работы, темы которых связаны с проектированием и конструкцией судов и морских нефтегазовых сооружений, безопасностью мореплавания и защитой окружающей среды, в том числе в сложных климатических условиях Арктики.

На конкурс было представлено 24 работы из Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова, Государственного морского университета имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, Санкт-Петербургского государственного морского технического университета, Дальневосточного федерального университета, Омского института водного транспорта, Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого и Московской государственной академии водного транспорта.

Победителями стали:

1. *Афонин Олег* – «Использование систем массового обслуживания и методов имитационного моделирования для расчета буксирного обеспечения в порту Новороссийск», Государственный морской университет им. адмирала Ф.Ф. Ушакова

2. *Бессонова Татьяна* – «Проектирование передаточного плавучего дока для ОАО Центра Судоремонта «Дальзавод»», Дальневосточный федеральный университет

3. *Барзаковская Анастасия* – «Безопасность в процессе эксплуатации рейдового перегрузочного комплекса», Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

4. *Смирнов Илья* – «Моделирование на тренажере процесса расхождения судов по информации от различных типов САРП», Государственный университет морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова

5. *Туктаров Рашид* – «Моделирование системы газораспределительного механизма с изменяемыми фазами для судового дизеля 6ЧН18/22», Омский институт водного транспорта – филиал Сибирского государственного университета водного транспорта

6. *Идрисова Сабина* – «Использование метода конечных элементов при проектировании объектов освоения шельфа», Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

Конкурс дипломных работ РС проводится ежегодно с 2013 года. Основная цель - стимулировать молодых специалистов морского профиля для проведения научных работ по темам, имеющим прикладное значение для развития нормативной базы РС и обеспечения высоких стандартов безопасности для объектов морского транспорта.

Содействие подготовке специалистов для морской индустрии – одно из приоритетных направлений деятельности РС. Для решения этой задачи Регистр реализует комплексный подход, позволяющий вузам использовать опыт и компетенции РС при организации учебного процесса.





МЕХАНИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ДВИЖИТЕЛИ

УДК 621.431.74:621.431.3

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СОПРЯЖЕНИЯ «ПОРШНЕВОЕ КОЛЬЦО – ПОРШНЕВАЯ КАНАВКА» ГОЛОВЕК ПОРШНЕЙ СУДОВЫХ МАЛОБОРОТНЫХ ДИЗЕЛЕЙ

И.И. Кулешов, ФАУ «Российский морской регистр судоходства», Владивосток, тел.: +7 (423) 230-12-51, e-mail: kuleshov.ii@rs-class.org.

В.М. Ходаковский, канд. техн. наук, доцент, профессор МГУ им. адм. Г. И. Невельского, Владивосток, тел.: +7 (423) 230-12-51, e-mail: khodprim@mail.ru.

В статье рассмотрены основные результаты определения напряженно-деформированного состояния сопряжения «поршневое кольцо – поршневая канавка» применительно к головке поршня судового малооборотного дизеля. В качестве прототипа принята головка поршня дизеля типа L35MC. Данная головка поршня представляет собой конструкцию поршня с опертым днищем. В процессе работы головки поршней малооборотных двигателей, ввиду особенности протекания рабочего процесса, подвержены наибольшему износу в области опорных поверхностей поршневых канавок. Конструктивно, головка поршня рассчитывается таким образом, что зазор в сопряжении «поршневое кольцо – поршневая канавка» обеспечивает исправное состояние деталей. Тем не менее, анализ существующих работ, посвященных исследованию процесса изнашивания и восстановления поршней, показал, что во время работы опорные поверхности поршневых канавок, вследствие тепловых деформаций, приобретают некоторую конусообразность. В работе определено следующее: деформации поршневых канавок головки поршня меньше для случая установленных противоизносных колец; зазор по высоте между поршневой канавкой и кольцом больше для случая с установленными противоизносными кольцами; вследствие особенностей материалов деталей, у головок поршней без противоизносных колец будет наиболее выражена конусообразность торцов канавок; приобретение конусообразности торцами канавок ведет к увеличению интенсивности изнашивания данных поверхностей.

Ключевые слова: головка поршня, напряженно-деформированное состояние, метод конечных элементов, поршневое кольцо, поршневая канавка, противоизносное кольцо, конусообразность, малооборотный дизель

DETERMINATION OF STRESS-STRAIN STATE PAIRING "PISTON RING – PISTON GROOVE" IN PISTON CROWNS OF MARINE LOW SPEED DIESELS

I.I. Kuleshov, FAI "Russian Maritime Register of Shipping", Vladivostok, tel. + 7 (423) 230-12-51, e-mail: kuleshov.ii@rs-class.org.

V.M. Khodakovsky, PhD, associate professor, professor, G. I. Nevelskoy Maritime State University, Vladivostok, tel. + 7 (423) 230-12-51, e-mail: khodprim@mail.ru.

The article describes the main results of determining the stress-strain state pairing, "piston ring – piston groove", in relation to the piston crown of a marine low speed diesel. The piston crown of a diesel engine type L35MC has been adopted as a prototype. This piston crown is a piston design with a simply supported plate. In the process, the crown of the piston of low speed diesel engines, due to the peculiarities of working process, are subject to the greatest wear in the area of the piston grooves bearing surfaces. Structurally, the piston crown is calculated so that the gap in the pair "piston ring - piston groove" ensures the good condition of the parts. However, analysis of existing work dedicated to the study of the pistons wear and restoration processes has shown that during the work bearing surfaces of the piston grooves, due to thermal deformation, become tapered. The present article describes the following: deformation of the piston head

grooves is less when there are wear rings installed; the gap height between the piston groove and the ring is larger when there are wear rings installed; due to the material wear characteristics, in piston heads without wear rings tapering of groove ends is more pronounced; tapering of grooves ends leads to more intensive wear of these surfaces.

Keywords: piston crown, the stress-strain state, finite element method, piston ring, piston groove, wear ring, tapering, low speed diesel

ВВЕДЕНИЕ

В процессе работы судового малооборотного двигателя (МОД) наибольшие напряжения испытывает головка поршня. Являясь наиболее нагруженным составляющим элементом деталей цилиндропоршневой группы (ЦПГ), головка поршня нуждается в охлаждении для снятия действующих на нее внешних тепловых и механических воздействий. Так существуют головки поршней с охлаждением водой или маслом [1]. Для снижения тепловых и механических нагрузок применены различные конструктивные решения. Так, различают головки поршня следующих конструкций: головки с опертым (дизели типа KZ, MC, LMC), с неопертым днищем (дизели типа VTBF), головки с глухими сверлениями (дизели типа RLA, RLB, RTA) [1, 2].

Известно, что сильный нагрев головки поршня снижает ее прочность, а значительные перепады температур вызывают в днище поршня высокие термические напряжения, вследствие чего головка деформируется [1]. Существуют методы, которые позволяют определить температурное расширение и напряженность головки [3, 4, 5], а также напряженность головки вследствие механического воздействия [6, 7]. Также существуют методы, позволяющие учесть действие тепловых и механических нагрузок на головку поршня в совокупности [2, 8].

В работах [1, 2, 8, 9, 10] определено, что в процессе изнашивания нижняя опорная поверхность поршневых канавок приобретает некоторую конусообразность. При этом работами [2, 8, 9] установлено, что приобретение конусообразной формы нижних торцов обуславливается следующими факторами:

- изгиб кольца в сечении от действия рабочего давления (при этом опорной поверхностью будет служить не весь нижний торец, а только тонкая дорожка) [10];

- неравномерное сужение поршневой канавки с уменьшением ее высоты от основания к периферии.

Совокупное действие вышеприведенных факторов ведет к активному износу как поршневых канавок, так и поршневых колец.

Важно отметить, что от действия теплового поля на сопряжение «кольцо-канавка» происходит уменьшение теплового зазора в сопряжении. Если учесть тот факт, что поршневая канавка от действия тепловых нагрузок уменьшается по высоте с

приобретением конусообразности, то можно сделать вывод, что зазор в сопряжении будет меньше номинального.

Для того чтобы восстановить исправное состояние головки поршня при износе канавок, возможно применение следующих методов [11]:

- восстановление наплавкой износостойкими материалами;
- установкой чугунных противоизносных колец.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Целью данной работы является установление напряженно-деформированного состояния (НДС) сопряжения «поршневое кольцо – поршневая канавка» для следующих случаев:

- канавка – поршневое кольцо;
- канавка – противоизносное кольцо – поршневое кольцо.

Исследования выполнялись применительно к головке поршня судовых МОД серии L35MC с опертым днищем, как наиболее распространенной для современных длинноходовых МОД и проводились с использованием программного комплекса (Solidworks 2016. Лицензия № 9710-0044-1186-4231, правообладатель ФГБОУ ВО МГУ им. адм. Г.И. Невельского) в несколько этапов:

- определение НДС сопряжения канавка – поршневое кольцо;
- определение НДС сопряжения канавка – противоизносное кольцо – поршневая канавка.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НДС КАНАВКИ И КОЛЬЦА НОМИНАЛЬНЫХ РАЗМЕРОВ

Данная часть исследования выполнялась в следующей последовательности:

- построение твердотельной модели головки поршня и поршневых колец;
- создание сборки;
- расчет НДС сборки методом конечных элементов (МКЭ).

Построение твердотельной модели головки поршня и колец выполнялось на основании технических условий УР 31-452-648-84. После построения моделей выполнялось создание сборки (рис. 1).

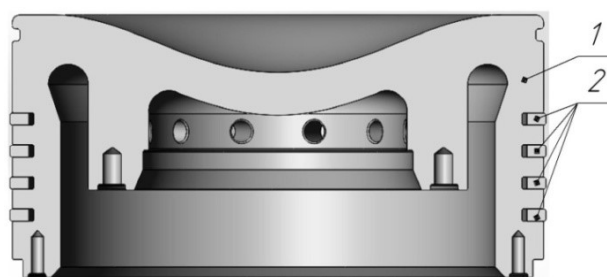


Рис. 1 Сборка головки поршня судового МОД типа L35MC и колец:

1 – головка поршня; 2 – поршневые кольца

После создания сборки выполнялась разбивка модели на сетку конечных элементов (КЭ). Как отмечено в работах [2, 8], выбор размера КЭ при соответствующем расчете является наиболее ответственным моментом. Выбор размера КЭ в дальнейшем повлияет на выходные данные рассматриваемой модели. Таким образом, руководствуясь проведенными в работах [2, 8] исследованиями, для наиболее точного расчета следует в качестве размера стороны КЭ принять размер, полученный из следующего выражения:

$$h = \frac{H}{3} - \frac{H}{3} \cdot \varepsilon.$$

где: h – размер стороны КЭ, мм;
 H – размер значимого элемента объекта расчета, мм;
 ε – допустимая погрешность дискретизации модели, % (10 %)

В качестве значимого элемента при проведении данного исследования принято поршневое кольцо. Размеры поперечного сечения поршневого кольца приведены на рис. 2.

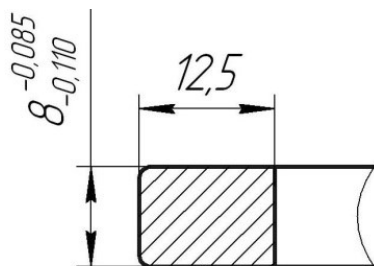


Рис. 2 Размеры сечения поршневого кольца

Наименьшим линейным размером кольцо обладает по высоте. Следовательно, $H = 7,9$ мм.

Таким образом необходимый для выполнения данного исследования размер КЭ будет равен $h = 2$ мм. Отметим также, что высота канавки принята равной 8,24 мм.

После разбивки модели на сетку КЭ были заданы следующие граничные условия, соответствующие номинальному режиму работы:

- материал головки поршня сталь 30ХМ, материал колец чугун с шаровидным графитом ВЧ40.
- давление на днище: $P_i = 12,5$ МПа;
- давление на верхние поверхности колец: первое кольцо: $0,75P_i = 9,375$ МПа; второе кольцо: $0,20P_i = 2,5$ МПа; третье кольцо: $0,08P_i = 1$ МПа; четвертое кольцо: принято 0,5 МПа;
- распределение температуры приведено на рис. 3.

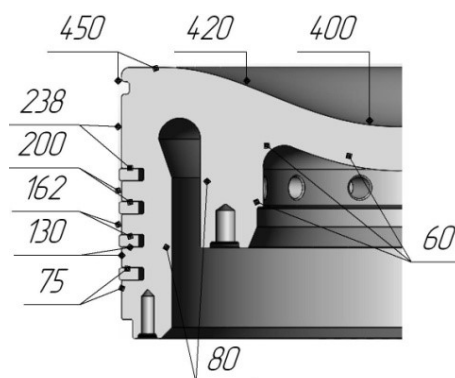


Рис. 3 Распределение температур головки поршня, °С

После задания граничных условий выполнялся анализ напряженно-деформированного состояния модели. Целью анализа являлось определение деформаций поршневой канавки и поршневого кольца. Схема измерения перемещений при деформации головки поршня приведена на рис. 4. Значения соответствующих замеров приведены в табл. 1.

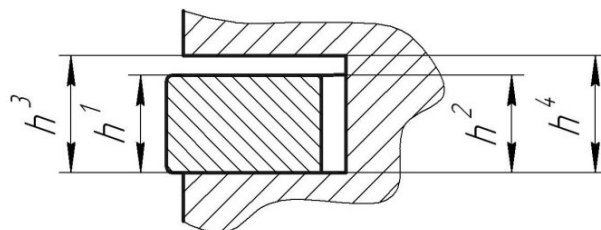


Рис. 4 Схема измерения

Таблица 1

Значения измеренных величин

№ канавки	h^1 , мм	h^2 , мм	h^3 , мм	h^4 , мм	Зазор, мм	
					h^3/h^1	h^4/h^2
1	7,98	7,95	8,18	8,21	0,2	0,26
2	7,95	7,94	8,19	8,22	0,24	0,28
3	7,93	7,92	8,22	8,23	0,29	0,31
4	7,91	7,90	8,24	8,24	0,33	0,34

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НДС КАНАВКИ И КОЛЬЦА С УСТАНОВЛЕННЫМИ ПРОТВОИЗНОСНЫМИ КОЛЬЦАМИ

Аналогично проведенному выше опыту, на данном этапе исследования проводился анализ изменения зазора между кольцом и канавкой для случая, когда в канавке установлено чугунное протвоизносное кольцо. Последовательность сохранилась также, за исключением того, что в сборку вводились следующие изменения:

- добавление в эскиз головки поршня проточки под протвоизносные кольца;
- создание модели протвоизносного кольца (материал кольца серый чугун);
- добавление в сборку протвоизносных колец (рис. 5);

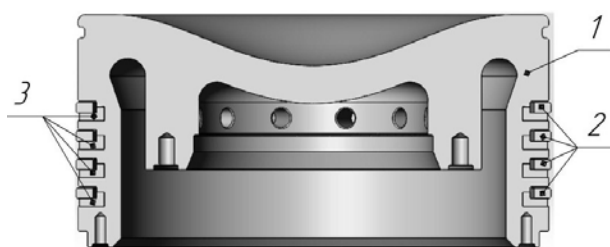


Рис. 5. Сборка головки поршня судового МОД типа L35MC: 1 – головка поршня; 2 – поршневые кольца; 3 – протвоизносные кольца

- расчет НДС сборки МКЭ.

В качестве граничных условий приняты те же условия, что и в предыдущем опыте. После выполнения расчета контролировались величины деформаций верхних опорных поверхностей протвоизносных колец, верхних торцов канавок и поршневых колец. Схема выполнения замеров приведена на рис. 4. Значения соответствующих замеров приведены в табл. 2.

Таблица 2

Значения измеренных величин

№ канавки	h^1 , мм	h^2 , мм	h^3 , мм	h^4 , мм	Зазор, мм	
					h^3/h^1	h^4/h^2
1	7,98	7,95	8,23	8,23	0,25	0,28
2	7,95	7,94	8,23	8,24	0,28	0,3
3	7,93	7,92	8,24	8,24	0,31	0,32
4	7,91	7,90	8,24	8,24	0,33	0,34

ОБСУЖДЕНИЕ ОСНОВНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

В ходе данного исследования путем моделирования НДС сопряжения «поршневое кольцо – поршневая канавка» определены величины зазоров между кольцом и канавкой. При этом величина зазоров между канавкой и кольцом для случая, когда канавки и кольца номинального размера меньше допустимого, чем для случая, когда в канавки установлены протвоизносные кольца. Номинальные размеры канавки, кольца и допуски на зазор в сопряжении представлены на рис. 6.

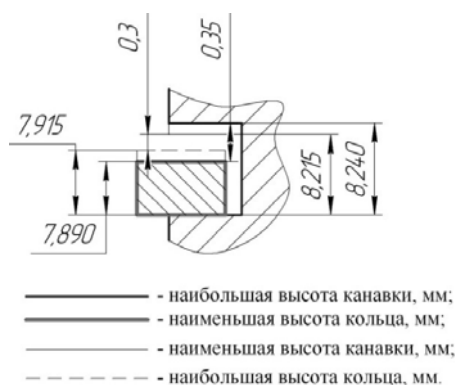


Рис. 6. Номинальные размеры сопряжения

Сравнительный визуальный анализ изменения величины размеров сопряжения приведен в табл. 3.

Исходя из анализа, приведенного в табл. 3 можно заключить, что при НДС головки поршня с установленными протвоизносными кольцами меньше, чем при НДС головки поршня без них. Это объясняется разницей в коэффициентах температурного расширения материалов. Так серый чугун СЧ30, из которого выполнены протвоизносные кольца, имеют коэффициент теплового расширения $10,5-6\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$, в то время как сталь 30ХМ, из которой выполнена головка поршня, имеет коэффициент теплового расширения $12,6-6\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$.

Важно отметить и то, что, как описано в работах [2, 8, 9], а также установлено в данной работе, поршневые канавки от действия температурного поля приобретают конусообразность. Канавка приобретает такую форму вследствие неравномерного прогрева и отвода теплоты в объеме поршня. Таким образом, та часть перемычки, которая находится ближе к основанию поршня, сопровождается

Таблица 3

Размеры элементов сопряжения

Деформации сопряжения номинального размера			
№ канавки			
1	2	3	4
Деформации сопряжения с противоизносными кольцами			
1	2	3	4

теплоотводом в охлаждающую среду (в данном случае в масло), в то время как периферийная часть перемычки может свободно расширяться, так как не имеет сопротивления объема поршня, а также в качестве охлаждающей среды выступает воздух.

Вследствие того, что происходит уменьшение зазора в сопряжении, соответственно, происходит уменьшение проходного сечения для рабочих газов. Следствием снижения давления газов в над- и закольцевом пространстве будет являться уменьшение силы прижатия колец к стенке цилиндра и, как следствие, возникает возможность прорыва газов в подпоршневое пространство [1]. Соответственно, следует, что необходимо выдерживать зазор в сопряжении в пределах допустимого (рис. 6). Наибольшего приближения к допустимому зазору можно достичь путем установки противоизносных колец в головку поршня.

Помимо того, что вследствие уменьшения зазора будет происходить уменьшение силы прижатия колец к стенке втулки цилиндра, будет уменьшаться площадь контактирующих площадей кольца и канавки. Это объясняется тем, что в процессе работы на поршневое кольцо действует рабочее давление газов (P_i), которое создает на кольце некоторый опрокидывающий момент. В результате

такого воздействия поршневое кольцо прижимается своей нижней опорной поверхностью к канавке не полностью, а к торцу канавки (рис. 7). Уменьшение опорной поверхности приводит к тому, что возрас-

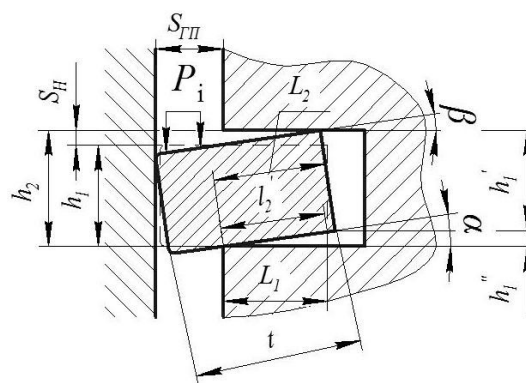


Рис. 7 Схема опрокидывания кольца в канавке от действия давления P_i

L_1 – путь трения поршневой канавки, мм; L_2 – путь трения поршневого кольца, мм; L'_2 – фактический путь трения поршневого кольца, мм; t – ширина поршневого кольца, мм; h_1 – высота поршневого кольца, мм; h_2 – высота поршневой канавки, мм; h'_1 – длина проекции внутренней стенки кольца при наклоне в канавке, мм; h''_1 – высота подъема нижней кромки кольца в канавке, мм; a – угол горизонтального наклона кольца, β – угол вертикального наклона кольца, град; S_H – зазор между кольцом и канавкой, мм; $S_{ГП}$ – зазор между втулкой и поршнем, мм

тает удельное давление на площадь, а также уменьшается путь трения сопряжения «кольцо-канавка» [12]. Результатом данного процесса будет износ с приобретением конусообразности нижней опорной поверхности поршневой канавки.

Вследствие того, что происходит уменьшение площади контактирования, будет увеличиваться степень изнашивания торца канавки, то есть образование конусообразности, к периферии [10].

ВЫВОДЫ

В ходе определения НДС сопряжения «поршневое кольцо – поршневая канавка» установлено следующее:

- деформации поршневых канавок головки поршня меньше для случая установленных противоизносных колец;
- зазор по высоте между поршневой канавкой и кольцом больше для случая с установленными противоизносными кольцами;
- вследствие особенностей материалов деталей, у головок поршней без противоизносных колец будет наиболее выражена конусообразность торцов канавок;
- приобретение конусообразности торцами канавок ведет к увеличению интенсивности изнашивания данных поверхностей;
- необходимы дальнейшие исследования для определения НДС головок поршней других конструкций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Возницкий И.В., Пунда А.С. Судовые двигатели внутреннего сгорания // М: Моркнига – 2007. – 284 с.
2. Кулешов И.И., Ходаковский В.М. Экспериментальное обоснование выбора размера конечного элемента при расчете головок поршней // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. – 2017. – №3(43). – С. 603-611.
3. Дьяченко Н. Х. Конструирование и расчет двигателей внутреннего сгорания: Учебник для вузов / Н.Х. Дьяченко, Б.А. Харитонов, В. М. Петров и др.; под ред. Н.Х. Дьяченко. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние. – 1979. – 392 с.
4. Ваншейдт В.А. Конструирование и расчеты прочности судовых дизелей //Л.: Судостроение. – 1969. – 600 с.
5. Орлин А.С. и др. Двигатели внутреннего сгорания. – 1957. – 289 с.
6. Овсянников М. К., Давыдов Г.А. Тепловая напряженность судовых дизелей //Л. Судостроение. – 1975. – 260 с.
7. Танатар Д.Б. Дизели, компоновка и расчет, изд. // Морской транспорт, 1956. – 439 с.
8. Кулешов И.И., Ходаковский В.М. Исследование влияния тепловых и механических нагрузок на деформацию головок поршней судовых малооборотных дизелей // Морские интеллектуальные технологии. – 2017. №1 (35) Т.1. с. 43-54.
9. Кулешов И.И. Методы увеличения ресурса головок поршней малооборотных дизелей // Материалы II международной научно-практической очно-заочной конференции «Современные проблемы развития техники, экономики и общества». Казань. – 2017. С. 78-81.
10. Слободянюк И.М., Молодцов Н.С., Голобородько В.Н. Влияние износа сопряженных деталей ЦПГ на долговечность судовых дизелей после ремонта // Судовые энергетические установки. – 2010. – №26. С. 136-144.
11. Кулешов И.И., Ходаковский В.М. Повышение работоспособности поршневых канавок головок поршней судовых малооборотных двигателей // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. – 2016. – №6 (40). – с. 155-168.
12. Марьин Д.М., Хохлов А.Л., Глушенко А.А. Теоретическое обоснование снижения износа деталей сопряжения «поршневая канавка – поршневое кольцо» //Вестник ульяновской государственной сельскохозяйственной академии имени П.А. Столыпина. – 2015. – №4 (32). – с. 178-182.

REFERENCES

1. Voznitskiy I.V., Punda A.S. Sudovye dvigateli vnutrennego sgoraniya [Ship internal-combustion engines]. Moscow, Morkniga Publ., 2007, 284 p.
2. Kuleshov I.I., Khodakovskiy V.M. Eksperimental'noe obosnovanie vybora razmera konechnogo elementa pri raschete golovok porshney [Experimental rationale for the election size of the finite element in the calculation of the piston crowns]. Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova [The scientific journal "Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova"]. 2017, 3 (43), pp. 603-611.
3. D'yachenko, N.Kh., B.A. Kharitonov, V.M. Petrov, et al. Konstruirovaniye i raschet dvigatelei vnutrennego sgoraniya: uchebnyk dlya vuzov. Edited by N.Kh. D'yachenko [Design and calculation of internal-combustion engines: textbook for institute of higher education]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., Leningr. ot-dnie, 1979, 392 p.
4. Vansheydt, V.A. Konstruirovaniye i raschjot dvigatelej vnutrennego sgoraniya [Design and calculation of internal-combustion engines]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1969, 600 p.
5. Orlin A. S. and others. Dvigateli vnutrennego sgoraniya [Internal-combustion engines]. 1957, 289 p.
6. Ovsyannikov M.K., Davydov G.A. Teplovaya napryazhennost' sudovykh dizeley. [Thermal tension of ship diesel engine]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1975, 260 p.
7. Tanatar, D.B. Dizeli. Komponovka i raschet [Design and calculation]. Leningrad, Morskoi transport Publ., 1956, 439 p.
8. Kuleshov I.I., Khodakovskiy V.M. Issledovanie vliyaniya teplovykh i me-khanicheskikh nagruzok na deformatsiyu golovok porshney sudovykh malooborotnykh dizeley [Investigation of thermal and mechanical capacity on pistons crowns of low speed propulsion marine diesel engine]. Morskie intellektual'nye tekhnologii [Marine Intellectual Technologies]. 2017, 1 (35), pp. 43-54.
9. Kuleshov I.I. Metody uvelicheniya resursa golovok porshney maloobo-rotnykh dizeley. Materialy II mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy ochno-zaochnoy konferentsii "Sovremennye problemy razvitiya tekhniki, ekonomiki i obshchestva" [Methods of resource increase of pistons crowns of low-speed diesel engine. Materials of II International Theoretical and Practical Conference "Current problems of technic, economic and society development"], Kazan, 2017, pp. 78-81.
10. Slobodyanyuk I.M., Molodtsov N.S., Goloborod'ko V.N. Vliyanie iznosa sopryazhennykh detaley TsPG na dolgovechnost' sudovykh dizeley posle remonta [Influence of damaged TsPG mating parts on

- durability of ship diesel engines after repair]. Sudovye energeticheskie ustanovki [Ship power plants]. 2010, № 26, pp. 136-144.
11. Kuleshov I.I., Khodakovskiy V.M. Povyshenie rabotosposobnosti porshnevnykh kanavok golovok porshney sudovykh malooborotnykh dvigateley [Improving the operability of the piston's crown rings grooves of low speed propulsion marine diesel engine]. Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova [The scientific journal "Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova"]. 2016, 6 (40), pp. 155-168.
12. Maryin D.M., Khokhlov A.L., Glushchenko A.A. Teoreticheskoe obosnovanie snizheniya iznosa detaley sopryazheniya "porshnevaya kanavka – porshnevoe kol'tso" [The theoretical justification for reduced wear details of the pair "piston groove piston ring". Vestnik ul'yanovskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii imeni P.A. Stolypina [Scientific-theoretical journal "Vestnik of Ulyanovsk state agricultural academy"]. 2015, 4 (32), pp. 178-182.

УДК 629.541 – 546; 629.5.021; 629.12.06-7

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ОСНОВНЫХ СУДОВЫХ СИСТЕМ НА ПОКАЗАТЕЛИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ СУДНА

В.К. Шурпьяк, канд. техн. наук, ФАУ «Российский морской регистр судоходства», Санкт-Петербург, тел.: +7 (812) 314-39-85, факс: +7 (812) 314-10-87, e-mail: shurpyak.vk@rs-class.org

А.А. Серов, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики» (ИТМО), Санкт-Петербург, e-mail: serov_sasha@bk.ru

Цель данной статьи можно сформулировать как определение дополнительных факторов и особенностей устройства судовых систем, которые следует учитывать при проведении оценки энергетической эффективности судна и разработке мер по энергосбережению на судах. В статье дана классификация судовых систем по степени влияния на показатели энергетической эффективности судна на различных режимах эксплуатации судна. Определены направления повышения энергоэффективности судовых систем и резервы повышения конструктивного коэффициента энергетической эффективности судна за счет применения известных в настоящее время способов сокращения потребления энергии.

Ключевые слова: энергетическая эффективность судна, конструктивный коэффициент энергетической эффективности, судовые системы

EVALUATION OF INFLUENCE OF MAIN SHIP SYSTEMS ON THE SHIP ENERGY EFFICIENCY INDICES

V.K. Shurpyak, PhD, FAI "Russian Maritime Register of Shipping", St. Petersburg, tel.: +7 (812) 314-39-85, fax: +7 (812) 314-10-87, e-mail: shurpyak.vk@rs-class.org

A.A. Serov, St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics (ITMO), St. Petersburg, e-mail: serov_sasha@bk.ru

The purpose of this article can be summed up as the identification of additional factors and ship system characteristics, which should be considered when assessing the energy efficiency of the ship and developing energy-saving measures on ships. The article provides a classification of ship systems based on the degree of influence on the ship's energy efficiency indices in different operating modes. It identifies the ways of increasing the energy efficiency of ship systems and the opportunities for improving the ship's energy efficiency design index through the use of currently known methods of reducing energy consumption.

Keywords: ship's energy efficiency, energy efficiency design index, ship systems

Основной целью требований Приложения VI к Международной Конвенции (МК) МАРПОЛ является сокращение выбросов парниковых газов с судов за счет повышения энергоэффективности морских судов. То есть, в отличие от 261-ФЗ [1] для МК МАРПОЛ энергоэффективность является не целью, а только инструментом, способствующим уменьшению вредных выбросов с судов в атмо-

сферу. Критерием энергоэффективности для МК МАРПОЛ выбрано отношение количество CO₂, отнесенное к единице транспортной работы, что выражается в виде коэффициента, который называют Конструктивным коэффициентом энергетической эффективности (EEDI) с размерностью грамм CO₂, деленный на тонно-милю. Авторы хотели бы обратить внимание на особенности

расчета EEDI, принципиально отличающие его от требований 261-ФЗ[1]:

- при расчетах EEDI не учитываются операции (в том числе весьма энергозатратные) в ходе которых судном не совершается транспортная работа, например, не учитывается энергопотребление при разгрузке танкера или работа генератора инертного газа при проведении грузовых операций;

- под требования о расчетах EEDI не попадают суда, не перевозящие груз, например, все рыболовецкие суда или суда технического флота, так как они формально не совершают транспортной работы.

В соответствии с требованиями Приложения VI для каждого нового судна, построенного после 01.01.2013, должны быть определены требуемый (нормативный) и достигнутый (расчетный) Конструктивные коэффициенты энергетической эффективности (EEDI), при этом достигнутый EEDI должен быть меньше требуемого. Достигнутый EEDI характеризует энергетическую эффективность каждого нового судна конкретного типа и размера с точки зрения выбросов им парниковых газов и сокращения потребления топлива. Он рассчитывается в соответствии с Руководством ИМО [2], при проектировании судна и подтверждается при сдаче его судовладельцу судостроительной компанией. В соответствии с Правилем 20 Приложения VI этот коэффициент должен быть рассчитан для каждого нового судна, которое подпадает под одну или более категорий судов, которые перечислены в правиле 2 «Определения» этого Приложения.

Помимо конструктивных мер по повышению энергоэффективности судов ИМО разработан эксплуатационный показатель EEOI (Операционный показатель энергоэффективности), который применим не только к вновь строящимся судам, но и к существующим. В отличие от EEDI, который высчитывается один раз в период строительства судна, EEOI должен рассчитываться в эксплуатации постоянно, фиксироваться в судовом плане управления энергоэффективностью судна (SEEMP) и периодически анализироваться компанией. SEEMP разрабатывается компанией в соответствии с МЕРС.282 (70) [4] для каждого судна с использованием коэффициента EEOI.

Коэффициенты EEDI и EEOI имеют несколько разных физических смыслов. Если EEDI это отношение к величине транспортной работы судна, производимой судном, идущим с максимальной загрузкой с мощностью на валу, равной 75 % максимальной мощности главного двигателя, то EEOI это количество произведенного CO₂ за определенный период времени (рейс, год и т.д.), отнесенное к величине транспортной работы судна за тот же период.

План SEEMP представляет собой документ, разработанный в соответствии с требованиями

резолюции ИМО МЕРС.282(70) [4] и предусматривающий разработку мероприятий по повышению энергоэффективности эксплуатации конкретного судна. В качестве таких мероприятий указанной резолюцией предлагается использование более качественного топлива, ограничение времени простоя в портах за счет более четкого планирования рейсов, правильная балластировка судна, своевременное обслуживание корпуса и двигателя и т.д. Касательно главного двигателя в Руководстве ИМО справедливо говорится, что коэффициент полезного действия современных судовых дизелей крайне высок (~50 %) и возможность дальнейшего его повышения без привлечения принципиально новых технологий (например, топливных элементов) вызывает сомнения. Но во вспомогательных системах и механизмах резервы оптимизации энергопотребления есть, поэтому далее рассмотрим резервы повышения энергоэффективности судов за счет оптимизации судовых систем.

Можно предложить классификацию судовых систем по влиянию на энергетическую эффективность судна:

- системы, задействованные на ходу судна;
- системы, обеспечивающие грузовые операции; и
- системы, не потребляющие энергию.

К последним можно отнести так же системы, имеющие потребители, но крайне редко задействованные, например, только в аварийных ситуациях.

1. Системы, задействованные на ходу судна. Потребляемая ими энергия учитывается при расчете конструктивного коэффициента энергетической эффективности, то есть системы участвуют в производстве транспортной работы, и потребляемая ими энергия учитывается при расчете EEDI. К таким системам следует отнести:

- системы, обслуживающие главный двигатель (охлаждения, топлива, масла, вентиляции МО, система подогрева топлива);

- системы, обслуживающие груз в процессе перевозки (вентиляция грузовых трюмов, холодильная установка, обслуживающая рефтрюмы, системы охлаждения груза);

- системы, обеспечивающие общесудовые нужды (бытовые, холодильная установка провизионной кладовой, вентиляция и кондиционирование жилых и служебных помещений, балластная и осушительная системы при их использовании на ходу судна).

2. Системы, задействованные для проведения грузовых операций. К таким системам следует отнести:

- системы, обеспечивающие разгрузку (грузовая, балластная, инертных газов, вентиляция трюмов судов РО-РО, заморозки груза в рефтрюмах, система подогрева груза на танкерах).

3. К системам, не потребляющим энергию, можно отнести газоотводную, систему шпигатов с

открытых палуб, а также редко задействованные системы – пожарные, обогрев балластных танков и т.п.

Далее рассмотрим специфику энергопотребления различных судовых систем с целью определения дополнительных факторов и особенностей, которые следует учесть для более полного и адекватного определения энергетической эффективности судна, а также для выявления потенциальных возможностей энергосбережения. Для этого при рассмотрении попробуем ответить на следующие вопросы:

- какова величина энергопотребления системой;
- учитывается ли это энергопотребление в действующей методике расчета EEDI и EEOI;
- какие существуют способы понизить энергопотребление и насколько они эффективны.

Для оценки величины энергопотребления каждой системой воспользуемся данными по требуемой мощности различных судовых потребителей, собранные ЦНИИМФ для разработки Технико-эксплуатационных требований по оптимальной комплектации электростанций морских транспортных судов РД31.03.41-90 [5]. В рамках этой работы были использованы данные по судам морского флота СССР, которыми тогда располагал ЦНИИМФ. Кроме того, был использован документ РД5Р.6168-92 Методы расчетов электрических нагрузок и определение необходимой мощности генераторов электростанций [6].

В настоящей статье далее рассмотрим только системы, отнесенные к первой группе, то есть системы, задействованные на ходу судна и непосредственно влияющие на действующие в настоящее время критерии энергоэффективности EEDI и EEOI. В отличие от первой группы систем, оценка влияния на энергоэффективность второй группы, задействованной при грузовых операциях, не может использовать EEDI и требует разработки специального нового критерия для оценки энергоэффективности грузовых операций. При разработке такого критерия следует учитывать различия в энергетических затратах на обработку различных грузов и это представляется отдельной задачей, к которой можно вернуться в будущем.

Согласно резолюции МЕРС 245(66) [3], если на судне нет дополнительных потребителей энергии, связанных с сохранением груза на ходу судна или другими существенными потребителями, продиктованными особенностями конструкции и назначения судна, энергопотребление на ходовом режиме принимается равным 5 % от мощности главного двигателя. Это соответствует РД31.03.41-90 [5], где потребители электрической мощности на судне делят на две группы:

- потребители, обеспечивающие работу на ходовом режиме, которые называют интегральной мощностью стандартных потребителей, качественно

одинаковыми для любого типа судна с дизельной СЭУ и

- добавочные потребители мощности, характерные для специализированных судов.

В РД31.03.41-90 [5] интегральную мощность стандартных потребителей определяют как 4,6 % от мощности главного двигателя, что вполне соотносится с требуемым МЕРС 245(66) [3] 5 %.

ОСУШИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА

Осушительная система служит для удаления за борт трюмной воды, то есть воды, которая постепенно накапливается в трюмных помещениях судна – машинно-котельном отделении, грузовых трюмах и других. Причины скопления такой воды могут быть разными: отпотевание металлических частей корпуса, возможные протечки в трубопроводах и наружной обшивке, продувание механизмов, мытье настилов и т.п. Параметры осушительных насосов регламентируются Правилами Российского морского регистра судоходства (Правилами РС) и МК СОЛАС в зависимости от размеров судна. Хотя приводы осушительных насосов обладают довольно существенной мощностью, но коэффициент использования осушительных насосов можно считать пренебрежимо малым и поэтому как-либо повлиять на их энергопотребление будет сложно и малоэффективно. Использование осушительных насосов для откачки льяльных вод допускается только в аварийном режиме. При нормальной эксплуатации льяльные воды накапливаются в специальном танке для сдачи или сбрасываются после прохождения через установку обработки льяльных вод. Энергопотребление при этом можно считать незначительным и на ходовом режиме потребляемая мощность входит в «интегральную мощность».

Наиболее эффективным способом повышения энергоэффективности осушительной системы следует считать мероприятия по уменьшению образования льяльных вод на судне: уменьшение влажности воздуха приточной машинной вентиляции, изоляция холодных поверхностей в машинном отделении, отслеживание протечек через разъемные соединения.

БАЛЛАСТНАЯ СИСТЕМА

Балластная система служит для приема, перекачки по судну и удаления за борт водяного балласта. Балласт (забортную воду) принимают на судно для увеличения осадки при порожнем рейсе с целью улучшения работы гребных винтов, для выравнивания крена или дифферента, изменения остойчи-

ности судна по мере расхода топлива. На ходу судна балластная система практически не используется и незначительное потребление электроэнергии на судне на ходовом режиме входит в «интегральную мощность».

СИСТЕМА ВЕНТИЛЯЦИИ

Система вентиляции служит для поддержания нормальной воздушной атмосферы в судовых помещениях путем замены загрязненного воздуха свежим. Машинная вентиляция должна обеспечивать температуру в машинном отделении в пределах, требуемых Правилами РС (45°C) и комфортное нахождение людей. Суммарная номинальная мощность электроприводов (ЭП) вентиляторов согласно [5] определяется в зависимости от суммарной максимальной длительной мощности ГД по формуле

$$P_{ВМО} = 0,025 N^{0,6} \text{ (МВт)}, \quad (1)$$

где N – мощность главного двигателя, МВт.

Мощность, потребляемая электроприводом вентиляторов машинных отделений, определяется по формулам в режиме стоянки в умеренной и арктической зонах и составляет четверть от указанной мощности, а в режиме стоянки в тропической зоне – половину этой величины.

В ходовом режиме судна вентиляция машинных отделений, как правило, постоянно работает с полной загрузкой и входит в интегральную мощность. Анализ формулы (1) показывает, что доля электроэнергии, затрачиваемой на вентиляцию машинного помещения, составляет 20 – 30 % от всей электроэнергии, потребляемой на ходу судна, что весьма существенно. Это, например, увеличивает затраты на привод насосов охлаждения главного двигателя. Для проверки адекватности применения формулы (1) авторы провели тепловой расчет вентиляции машинного отделения с исходными данными при повышении температуры уходящего воздуха на 15°C и выделении двигателями тепла в воздух машинного отделения 1,2 % от мощности двигателя. Результаты расчета совпали с предложенной формулой.

Расчетное количество приточного воздуха в машинных отделениях определяется по расчету на ассимиляцию избыточных тепловыделений исходя из расчетного значения температуры наружного воздуха, которая выбирается хотя и с учетом предполагаемого района плавания судна, но с большим запасом для наиболее жаркого времени года. Регулирование подачи воздуха в машинное отделение в зависимости от температуры можно рассматривать как способ уменьшения энергозатрат на вентиляцию. Если регулировать подачу воздуха

изменением частоты вращения вентилятора, то экономия может составить половину и более затрат энергии на привод вентилятора, а экономия топлива на ходу судна составит около 0,5 %.

ВЕНТИЛЯЦИЯ ГРУЗОВЫХ ПОМЕЩЕНИЙ

Система вентиляции трюмов для перевозки автотранспорта с топливом в баках на ролкерах и судах многоцелевого назначения рассчитывается исходя из самого напряженного режима эксплуатации для этой системы – режима стоянки с грузовыми операциями при заданном двадцатикратном обмене воздуха в час, когда требуется интенсивное проветривание для удаления выхлопных газов автомобилей и погрузчиков.

Суммарная номинальная мощность вентиляторов грузовых помещений, предназначенных для перевозки транспортных средств с топливом в баках на ролкерах и судах многоцелевого назначения, определяется по формуле (2) в зависимости от объема указанных помещений.

$$P_{ВЕП} = 0,0036 \times V^{1,4} \text{ (МВт)}, \quad (2)$$

где V – объем трюмов для автотранспорта, тыс. м³.

В режимах хода, маневров и стоянки без проведения грузовых операций требуется подача воздуха исходя из требований Правил РС: шестикратный обмен воздуха в час для грузовых судов и десятикратный для пассажирских. Таким образом имеется существенный резерв для экономии электроэнергии если система позволяет отключать часть вентиляторов при условии, что остающиеся в работе вентиляторы будут обеспечивать вентиляцию без локальных застойных зон.

Мощности на вентиляцию грузовых трюмов не включены в интегральную мощность и относятся к добавочным потребителям мощности специализированных судов, то есть при расчете EEDI их можно учесть только при расчете нагрузок судовой электростанции.

ВЕНТИЛЯЦИЯ ЖИЛЫХ И СЛУЖЕБНЫХ ПОМЕЩЕНИЙ

Расход электроэнергии на вентиляцию в жилых и служебных помещениях правильнее оценивать совместно с системами отопления и кондиционирования воздуха, так как от кратности вентиляции в таких помещениях зависит потребление энергии системой отопления и электронагревательными приборами для обогрева служебных помещений и неработающего оборудования.

Средства электрообогрева служебных помещений устанавливаются практически на всех типах судов, поэтому потребляемая ими мощность входит в интегральную мощность судна и учитывается при расчетах EEDI в тех 5 % от мощности главного двигателя, равным которым принимается энергопотребление на ходовом режиме.

Различные способы экономии тепла, холода и электроэнергии в судовых системах вентиляции описаны в работе [6], где приводятся схемы различных рекуператоров, которые могут найти применение на судах. Основной характеристикой рекуператоров является коэффициент эффективности рекуперации. Это отношение между максимально возможным полученным теплом и теплом, полученным в действительности. Коэффициент зависит от типа рекуператора, меняется в пределах от 30 до 90 %. Таким образом, по оценкам автора при их применении можно экономить до 70 % потребляемой электроэнергии на обогрев и кондиционирование.

Можно сформулировать основные направления по обеспечению энергоэффективности систем вентиляции и кондиционирования:

- оснащение приводов вентиляторов многоскоростными двигателями или частотными регуляторами;
- устройство рекуператоров на комбинированных приточно-вытяжных установках с утилизаторами теплоты вытяжного воздуха для нагрева приточного.

РЕФРИЖЕРАТОРНЫЕ СИСТЕМЫ

Рефрижераторные системы служат для охлаждения воздуха в грузовых рефрижераторных трюмах и провизионных камерах. Работа таких систем обеспечивается специальной холодильной установкой. В зависимости от того, какое вещество используется для охлаждения помещений, различают рефрижераторные системы с непосредственным, рассольным и воздушным охлаждением.

Согласно [5] максимальная мощность, потребляемая главной холодильной установкой на рефрижераторных судах определяется в зависимости от объема рефрижераторных трюмов

$$P_{\text{РЕФ}} = 31 \times V^{1,7} \text{ (кВт)}, \quad (3)$$

где V – объем рефрижераторных трюмов в тысячах м³.

При этом говорится, что $P_{\text{РЕФ}}$ – это потребляемая мощность установки в режиме максимального использования, который соответствует первоначальному охлаждению груза после погрузки, на ходовом режиме и режиме стоянки потребляемая мощность

уменьшается на 25 %, во время грузовых операций потребляемая мощность уменьшается на 50 %.

Для рефустановок существенным снижением энергозатрат может стать оптимизация системы охлаждения забортной водой путем применения частотных регуляторов для приводов насосов охлаждения. Использование преобразователей частоты для управления скоростью вращения компрессора способствует росту коэффициента полезного действия холодильной машины и снижению энергопотребления. Особенно заметным снижение энергопотребления становится на долевых нагрузках – до 30 %. Кроме частотного регулирования компрессоров существенную экономию приносит применение частотного регулирования для насосов охлаждения рефустановок.

СИСТЕМЫ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ

К системам энергетической установки, эксплуатация которых требует оценки на предмет возможности повышения энергоэффективности следует отнести:

- системы охлаждения (2 контура);
- масляная система;
- топливная система;
- подогрева топлива.

Основные направления и идеи реализации резервов для систем этой группы можно сформулировать следующим образом (в порядке эффективности):

1. отказ от насосов и соответствующих энергозатрат на их привод;
2. использование навешанных на двигатель насосов;
3. регулировка работы насосов по частоте.

В полном объеме отказ от насосов может быть реализован в системах охлаждения забортной водой путем применения забортных охладителей. Существенно уменьшается потребление электроэнергии в процессе эксплуатации судна, так как исключаются затраты на работу насосов охлаждения забортной водой. На работу насосов охлаждения забортной водой приходится приблизительно 20 % всей вырабатываемой на ходу судна электроэнергии или примерно 0,4 – 1,0 % мощности главного двигателя (меньшее значение для двигателей большей мощности), т.е. для среднетоннажного судна мощность привода насоса охлаждения забортной водой составляет 15 – 20 кВт. Если учесть, что для привода насоса мощностью 15 кВт требуется приблизительно 3 литра топлива в час, то можно подсчитать, что годовая экономия топлива для судна с коэффициентом ходового времени 0,5 составит 13 – 15 т. В работе [7] дается подробный анализ способов уменьшения энергопотребления за счет применения забортных

охлаждателей и навешенных насосов, то есть экономии при отказе от применения электроприводных насосов. Но за пределами рассмотрения указанной статьи оказались системы с навешанными насосами и насосами с электроприводом.

Хотя использование навешанных на главный двигатель насосов приводит к уменьшению электропотребления на ходу судна, но нельзя считать это экономией, так как работа насоса в любом случае производится, но только производится главным двигателем. Экономия энергии при этом сводится к учету разницы в удельном расходе топлива главного двигателя и дизель-генераторов и учету потерь на два преобразования энергии: генератора и электродвигателя. Таким образом при использовании навешенных насосов можно говорить об экономии до 20 % энергии, затрачиваемой на приведение в действие таких насосов.

Согласно РД31.03.41-90 [5], мощность, потребляемая навешенными на главный двигатель насосами смазочного масла и охлаждающей пресной воды, что определяется по формулам (4) и (5) соответственно: по формуле

$$P_{НСМ} = 0,0063 N \text{ (МВт)}, \quad (4)$$

$$P_{НОП} = 0,0046 N \text{ (МВт)}, \quad (5)$$

где N – мощность главного двигателя, МВт.

В сумме это составляет около одного процента от мощности главного двигателя, но реальная экономия энергии значительно меньше, не более 0,2 %.

Мощность, потребляемая навешенными на главный двигатель насосами охлаждающей заборной воды, может быть рассчитана по формуле

$$P_{НОЗ} = 0,078 N^{0,6} \text{ (МВт)}, \quad (6)$$

где N – мощность главного двигателя, МВт.

Таким образом, всего за счет применения навешенных насосов можно уменьшить потребление топлива и, соответственно выбросов CO_2 не более чем на 0,3 %.

Для систем охлаждения заборной водой наиболее привлекательным, но пока редко применяемым на судах способом энергосбережения является применение преобразователей частоты, дающих существенную экономию электроэнергии на долевых режимах.

При проектировании систем охлаждения насосы заборной воды выбираются исходя из внешних условий, данных в Правилах РС и Унифицированных требованиях МАКО, то есть система должна обеспечивать работу со стопроцентной нагрузкой при температуре 32°C для заборной воды. В реальной эксплуатации судно работает в таких условиях довольно редко и расход воды на охлаждение чаще всего оказывается избыточным.

Особенно это актуально для средних широт, в которых эксплуатируется большинство российских судов. Кроме того, конструктор при подборе насоса обычно выбирает насос с некоторым запасом подачи.

Избыток охлаждающей воды обычно регулируется дросселированием путем увеличения гидравлических потерь в трубопроводе или частичной рециркуляцией и перепуском воды охлаждения. Оба способа связаны с постоянными безвозвратными потерями энергии на перекачку воды при рециркуляции или идут на турбулизацию потока при дросселировании. Но кроме регулирования подачи путем изменения сопротивления трубопровода, возможно обеспечение его работы в требуемой точке путем изменения характеристики насоса. При применении преобразователей частоты вращения подача насоса изменяется пропорционально частоте вращения, напор насоса изменяется пропорционально квадрату частоты вращения центробежного насоса, а мощность пропорционально третьей степени. На рис. 1 показана диаграмма с двумя способами регулирования подачи. Сплошной линией показана насосная характеристика при номинальной частоте вращения насоса, красной пунктирной линией показана насосная характеристика при пониженной частоте вращения насоса, синей сплошной линией показана естественная характеристика трубопровода с полностью открытой задвижкой, синей пунктирной линией напорная характеристика трубопровода при частично закрытой задвижке. Так как потребляемая насосом мощность равна произведению напора и подачи с делением на КПД насоса, то построенные на рисунке прямоугольники будут пропорциональны требуемой мощности, так как КПД центробежного насоса при изменении частоты вращения изменяется незначительно. Из рисунка видно, что затраты энергии на привод насосов на долевых режимах уменьшаются в 3 – 4 раза. При этом за счет уменьшения скорости в

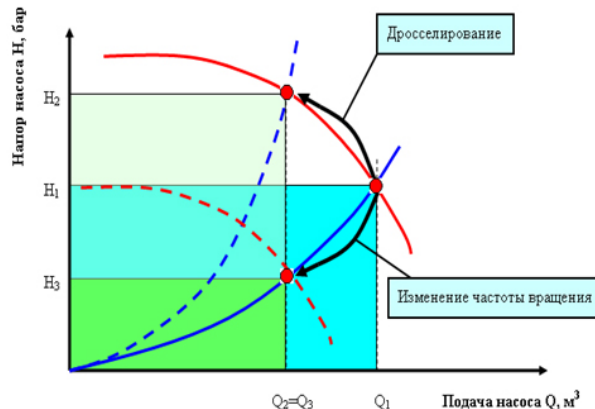


Рис. 1 Два способа регулирования расхода. Сравнение потребляемой мощности насосом при дроссельном и частотном регулировании подачи центробежного насоса

системе уменьшается коррозионный износ труб и арматуры забортной воды.

Однако при уменьшении подачи снижается КПД насоса, хотя и незначительно. Гораздо существеннее на долевых нагрузках изменяется КПД асинхронных электродвигателей и $\cos\phi$. Несмотря на то, что согласно данным [6] потери КПД электродвигателей составляют до 40 %, сокращение потребления энергии насосом при уменьшении подачи в два раза будет также не менее чем вдвое.

В работе [8] были сделаны предложения по учету в расчетах EEDI экономии энергии за счет применения забортных охладителей. В продолжение можно дополнить это предложение и предусмотреть возможности экономии энергии за счет применения частотного регулирования:

- в случае, если на судне отсутствуют насосы охлаждения ГД забортной водой с электроприводом, а используются забортные и килевые охладители или насосы охлаждения забортной водой с приводом от ГД, мощность P_{AE} , потребляемая в ходовом режиме, может быть уменьшена на величину $P_{PSW} = n \cdot 0,0046 P_{ME}$, где n – число главных двигателей, а P_{ME} – их мощность;

- в случае, если на судне используются насосы охлаждения ГД забортной водой с частотным регулированием электропривода, мощность P_{AE} , потребляемая в ходовом режиме, может быть уменьшена на величину $P_{PSW} = n \cdot 0,0023 P_{ME}$, где n – число главных двигателей, а P_{ME} – их мощность.

ПОДОГРЕВ ТОПЛИВА

В методике расчета EEDI [3] не учитываются затраты энергии на подогрев тяжелых сортов топлива. Работа на высоковязком дизельном топливе отличается от работы на легком топливе тем, что высоковязкое топливо не может быть успешно прокачено плунжерным насосом высокого давления и очень маленькие отверстия распылителя форсунки. Для обеспечения работы на высоковязком топливе его вязкость нужно снизить до 8 – 10 сСт, что достигается только нагревом его до соответствующей высокой температуры (часто более 100 °С). Для оценки затрат энергии следует учитывать, что подогрев топлива состоит из нескольких этапов, на каждом из которых преследуются определенные функциональные цели. Топливо, находящееся в цистернах основного запаса, должно иметь температуру, предотвращающую образование в нем кристаллов парафина, то есть не менее чем на 5 – 8 °С выше температуры помутнения. Кроме того, необходимо обеспечить вязкость, при которой возможна работа топливопокачивающего насоса, не превышающую

обычно 800 – 900 сСт и это обеспечивается для различных сортов топлива в диапазоне температур 30 – 45 °С.

Далее топливо попадает в отстойную цистерну, где для лучшего отделения воды поддерживается температура 50 – 70 °С и ограничением здесь является температура вспышки топлива, так как максимальная допустимая температура подогрева в цистерне должна быть ниже температуры вспышки на 10 °С. Температура в расходных топливных цистернах обычно на 10 – 20 °С меньше требуемой конечной температуры перед форсунками. Температура перед форсунками должна обеспечивать качественное распыление, обычно требуется 10 – 20 сСт для чего необходимо нагреть мазут до 100 – 120 °С.

Авторы произвели оценку суммарного количества тепла, необходимого для подогрева 1 тонны высоковязкого мазута (приняв нагрев на 100 °С и среднюю теплоемкость мазута). При сопоставлении полученного количества тепла, необходимого для нагрева с теплотой сгорания мазута, получено отношение, равное 0,005, то есть для использования высоковязких топлив необходимо затратить не менее 0,5 % топлива на его нагрев. Можно констатировать, что использование мазута на судне требует специальных затрат, которые не учитываются в настоящее время в расчетах EEDI.

Для подогрева топлива на судах используются паровые и электрические теплообменники, паровые змеевики (для подогрева топлива в цистернах), паровые и электрические спутники (для подогрева топлива в трубопроводах). Исходя из этого затраты топлива на обогрев паром и затраты топлива на обогрев электрическим током, полученным в судовой электростанции, будут существенно различаться, так потери при этих процессах будут весьма разные. При обогреве паром необходимое для нагрева тепло следует разделить на КПД котла и учесть потери в трубопроводах, что в сумме составит около 20 %. При обогреве электрическим током необходимое для нагрева мазута тепло существенно увеличивается, так как его следует разделить на КПД дизель-генератора, который для настоящей оценки можно принять равным 0,4.

Таким образом можно предложить корректировку методики расчета EEDI МЕРС 245(66) [3] и ввести специальный коэффициент, учитывающий способ нагрева тяжелого топлива. По предварительной оценке он может быть принят равным 1,00 при обогреве мазута паром утилизационного котла, 1,006 при обогреве мазута паром вспомогательного котла и 1,0125 при обогреве электрическим током. Если на разных стадиях нагрева используется различные способы, то эти коэффициенты можно пересчитать пропорционально расходуемой на каждой стадии энергии. В настоящее время в методике расчета EEDI [3] возможность энергосбе-

режения за счет применения на судне утилизационных котлов присутствует только в варианте выработки электроэнергии в утилизационных турбогенераторах, что не находит в настоящее время применения на судах. Применение предложенных коэффициентов будет стимулировать применение на судах утилизационных котлов и использование для подогрева топлива не электрической, а тепловой энергии.

ВЫВОДЫ

1. В результате анализа энергопотребления судовых систем определены основные способы экономии за счет оптимизации работы судовых систем:

- применение забортных охладителей и частотного регулирования насосов охлаждения забортной водой;
- оснащение приводов вентиляторов машинных помещений и грузовых трюмов частотными регуляторами;
- устройство рекуператоров с утилизацией теплоты вытяжного воздуха для нагрева приточного в системах вентиляции и кондиционирования жилых и служебных помещений;
- использование утилизационных котлов для подогрева тяжелого топлива и бытовых нужд.

2. На основе произведенного анализа сформулированы предложения по корректировке МЕРС 245(66) [3] для учета в методике расчета EEDI мероприятий по экономии затрат энергии на функционирование судовых систем. Поправки могут быть предложены в рамках работы действующей в настоящее время рабочей группы ИМО по изменению требований по энергоэффективности.

3. В действующей в настоящее время методике расчета EEDI учитываются только выбросы CO₂ на ходу судна. Недостатком оценки энергоэффективности судна, предложенной ИМО является то, что EEDI не может быть применен к судам, не производящим транспортную работу: рыболовным судам, ледоколам, буксирам и т.д. Оценка энергоэффективности на таких судах требует разработки нового критерия эффективности не связанного с количеством перевозимого груза, а учитывающим только пройденный путь и размеры судна.

4. На транспортных судах, к которым EEDI применим, не учитываются затраты энергии связанные с производством грузовых операций: на обработку груза в портах, подогрев жидких грузов перед выгрузкой на танкерах, расходы энергии на производство инертного газа, балластные операции, заморозку груза на рефрижераторных судах и т.д. Задача учета затрат энергии, связанных с работой в

портах, также требует разработки специального критерия эффективности, не связанного с пройденным расстоянием, а учитывающего только дедвейт судна.

5. Разработке упомянутых дополнительных критериев энергоэффективности судов, которые требуются согласно 261-ФЗ[1], могут быть посвящены дальнейшие исследования в области оценки энергоэффективности судовых систем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федеральный закон «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» № 261-ФЗ от 23.11.2009.
2. Second IMO GHG Study 2009, International Maritime Organization (IMO), London, UK, April 2009.
3. MEPC 245(66). 2014 Guidelines on the method of calculation of the attained Energy Efficiency Design Index (EEDI) for new ships.
4. MEPC.282 (70) 2016 Guidelines for the development of a ship energy efficiency management plan (SEEMP).
5. РД31.03.41-90 Техничко-эксплуатационные требования по оптимальной комплектации электростанций морских транспортных судов / Министерство морского флота. ЦНИИМФ. - Л., 1990.
6. РД 5.6168-92 Судовые электроэнергетические системы. Методы расчетов электрических нагрузок и определения необходимой мощности генераторов электростанций. НИИ «Лот» . - Л., 1995.
7. Дуболазова Л.В. Энергосберегающее оборудование в системах кондиционирования и вентиляции воздуха // Научные труды Дальрыбвтуза: в 2 ч. – Владивосток: Дальрыбвтуз, 2010. Вып. 22. Ч. 1. - с. 208 – 216.
8. Шурпак В.К. Учет особенностей систем охлаждения при оценке энергетической эффективности судов// Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – Вып. 37.– 2014.- с. 51 – 55.

REFERENCES

1. Federal'nyy zakon «Ob energosberezhenii i o povyshenii energeticheskoy effektivnosti i o vnesenii izmeneniy v otdel'nyye zakonodatel'nyye akty Rossiyskoy Federatsii» [Federal Law "On Energy Saving and on Improving Energy Efficiency and on Amending Certain Legislative Acts of the Russian Federation"], № 261-FZ of 23.11.2009.
2. Second IMO GHG Study 2009, International Maritime Organization (IMO), London, UK, April 2009.
3. MEPC 245(66). 2014 Guidelines on the method of calculation of the attained Energy Efficiency Design Index (EEDI) for new ships.
4. MEPC.282 (70) 2016 Guidelines for the development of a ship energy efficiency management plan (SEEMP).
5. PD31.03.41-90 Tekhniko-ekspluatatsionnyye trebovaniya po optimal'noy komplektatsii elektrostantsiy morskikh transportnykh sudov / Ministerstvo morskogo flota. TSNIIMF. [PD31.03.41-90 Technical and operational requirements for the optimal configuration of power plants of marine transport vessels / Ministry of the Navy. CNII MF.]. L., 1990.
6. RD 5.6168-92 Sudovyye elektroenergeticheskiye sistemy. Metody rascheta elektricheskikh nagruzok i opredeleniy neobkhodimoy moshchnosti generatorov elektrostantsiy. NII «Lob». [RD 5.6168-92 Ship power systems. Methods for calculating electrical loads and

- determining the required power of power plant generators. Research Institute "Lot".]. L., 1995.
7. Dubolazova L.V. Energoberegayushcheye oborudovaniye v sistemakh konditsionirovaniya i ventilyatsii vozdukha [Energy-saving equipment in air conditioning and ventilation systems]. Scientific works of Dalrybvtuz in two parts. Vladivostok, Dalrybvtuz, 2010, issue 22, Part 1, pp. 208 – 216.
 8. Shurpyak V.K. Uchot osobennostey sistem okhlazhdeniya pri otsenke energeticheskoy effektivnosti sudov [Accounting for the peculiarities of cooling systems in assessing the energy efficiency of ships]. Nauchno-tekhnicheskii sbornik Rossiyskogo morskogo registra sudokhodstva [Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping]. 2014, № 37, pp. 51 – 55.



ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ

УДК 621.315:621.3.025

ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТОВ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ В СУДОВЫХ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ С РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ПОСТОЯННОМ ТОКЕ

А.В. Григорьев, канд. техн. наук, доцент, ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова,
АО «НПЦ «Электродвижение судов», Санкт-Петербург, e-mail: a.grigorev@eds-marine.ru

А.Ю. Васильев, АО «НПЦ «Электродвижение судов», Санкт-Петербург

С.М. Малышев, АО «НПЦ «Электродвижение судов», ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова,
Санкт-Петербург

В статье проведен анализ расчета токов короткого замыкания в традиционных электроэнергетических системах с распределением электроэнергии на переменном токе. Рассмотрены особенности протекания и расчет токов короткого замыкания в судовых электроэнергетических системах с распределением электроэнергии на постоянном токе. В данных системах генератор работает с переменной частотой вращения, а гребной электродвигатель может подпитывать ток место возникновения короткого замыкания на шинах главного распределительного щита постоянного тока через автономные инверторы. Значительное влияние на токи короткого замыкания оказывают конденсаторы, расположенные на входе полупроводниковых инверторов. В связи с этим традиционные методы расчета токов короткого замыкания для судовых электроэнергетических систем с распределением на постоянном токе не подходят. В статье сформулированы рекомендации по расчету токов короткого замыкания в системах с распределением электроэнергии на постоянном токе.

Ключевые слова: короткое замыкание, электрический ток, электроэнергетические системы, распределение электроэнергии на постоянном токе, полупроводниковые преобразователи частоты, гребные электрические установки, выпрямители, инверторы

CALCULATION FEATURES FOR SHORT CIRCUIT CURRENTS IN SHIPBOARD ELECTRIC POWER SYSTEMS WITH ELECTRICAL POWER DISTRIBUTION ON DIRECT CURRENT

A.V. Grigoryev, PhD, associate professor, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, JSC "RPC "Ship electric propulsion", St. Petersburg, e-mail: a.grigorev@eds-marine.ru

A.Yu. Vasilyev, JSC "RPC "Ship electric propulsion", St. Petersburg

S.M. Malyshev, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, JSC "RPC "Ship electric propulsion", St. Petersburg

The article contains the analysis of calculation of short-circuit currents in traditional electric power systems with distribution of electrical power on an alternating current. The features of flow and calculation of short-circuit currents in ship electric power systems with the distribution of electrical power on direct current are also considered. In these systems, the generator operates at a variable rotation speed, and the electric propulsion motor can feed the location of a short circuit occurrence on the buses of the main direct current switchboard

via autonomous inverters. Short-circuit currents are significantly impacted by capacitors located at the input of semiconductor inverters. In this regard, the traditional methods of calculating short-circuit currents for ship electric power systems with distribution on direct current are not suitable. The article formulates recommendations for the calculation of short-circuit currents in systems with direct current electrical power distribution.

Keywords: short circuit, electric current, electric power systems, distribution of electrical power on direct current, semiconductor frequency converters, electric propulsion plants, rectifiers, inverters

В настоящее время в Российской Федерации вводятся в эксплуатацию суда с единой электроэнергетической системой (ЕЭЭС) и распределением электроэнергии на постоянном токе. В качестве генераторов в ЕЭЭС применяются трехфазные синхронные генераторы, а основными судовыми приемниками являются системы электродвижения с гребными электродвигателями переменного тока.

Расчет токов короткого замыкания (КЗ) с целью выбора защитно-коммутационной аппаратуры и проверки динамической устойчивости сборных шин главных распределительных щитов (ГРЩ) производится на стадии технического проектирования с использованием известных нормативных документов.

Применение традиционных методик расчетов токов КЗ в судовых электроэнергетических системах (СЭЭС) с распределением на постоянном токе использоваться не может.

Традиционная СЭЭС с автономными генераторными агрегатами (ГА) представлена на рис. 1.

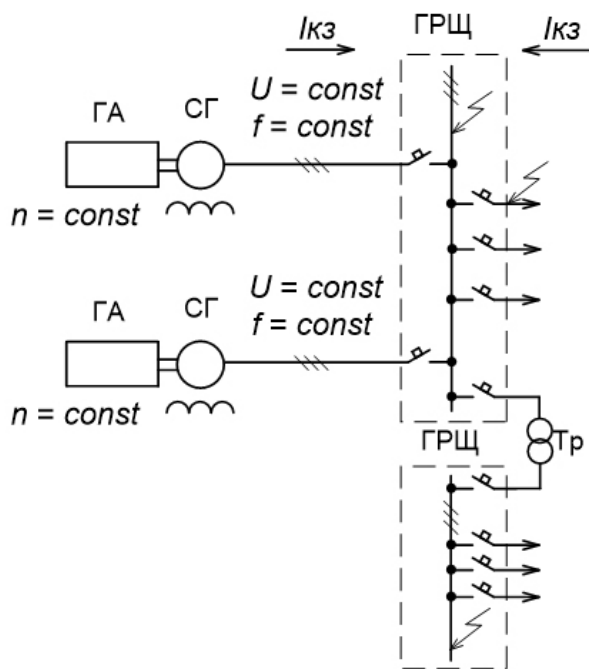


Рис. 1 Судовая электроэнергетическая система

В состав СЭЭС входят два или более ГА, как правило дизель-генераторы, ГРЩ, понижающие трансформаторы. Расчет токов КЗ производится по известным методикам при одиночной и параллельной работе ГА. При расчете токов КЗ учитывается ток подпитки от судовых приемников электроэнергии в виде эквивалентного асинхронного электродвигателя.

Появление единых электроэнергетических систем (ЕЭЭС) не изменило подход к расчету токов КЗ. Традиционная ЕЭЭС на базе системы электродвижения (СЭД) приведена на рис. 2.

В состав ЕЭЭС с СЭД входит судовая электростанция с главными ГА, ГРЩ. СЭД состоит из двух или более гребных электроприводов. В составе современных гребных электроустановок (ГЭУ) входят согласующие трансформаторы, как правило трехобмоточные, полупроводниковые преобразователи частоты (ППЧ) со звеном постоянного тока, гребные трехфазные электродвигатели переменного тока синхронного или асинхронного типа.

Впервые данное схемотехническое решение ЕЭЭС с СЭД на судах, построенных в Российской Федерации, было применено на малом гидрографическом судне проекта 19910 «Вайгач». В дальнейшем по такой же схеме ЕЭЭС с СЭД были построены дизель-электрические ледоколы проекта 21900, 21900 М. В постройке находятся атомные ледоколы проекта 22220 и дизель-электрический электроход проекта 22600.

В связи с тем, что на данных судах применяется необратимые ППЧ со звеном постоянного тока, построенные на базе неуправляемых выпрямителей и автономных инверторов, ток короткого замыкания от гребных электродвигателей (ГЭД) не протекает к точке КЗ на ГРЩ. Расчет токов КЗ в данных ЕЭЭС с СЭД производится аналогично расчету для автономных СЭЭС.

Структурная схема ЕЭЭС с СЭД и распределением электроэнергии на постоянном токе приведена на рис. 3.

Построение ЕЭЭС с СЭД с распределением электроэнергии на постоянном токе имеют ряд особенностей, оказывающих принципиальное влияние на подходы к расчету токов КЗ.

В данных ЕЭЭС трехфазные ГА переменного тока вырабатывают электроэнергию, которая через выпрямители поступает на шины ГРЩ. От ГРЩ

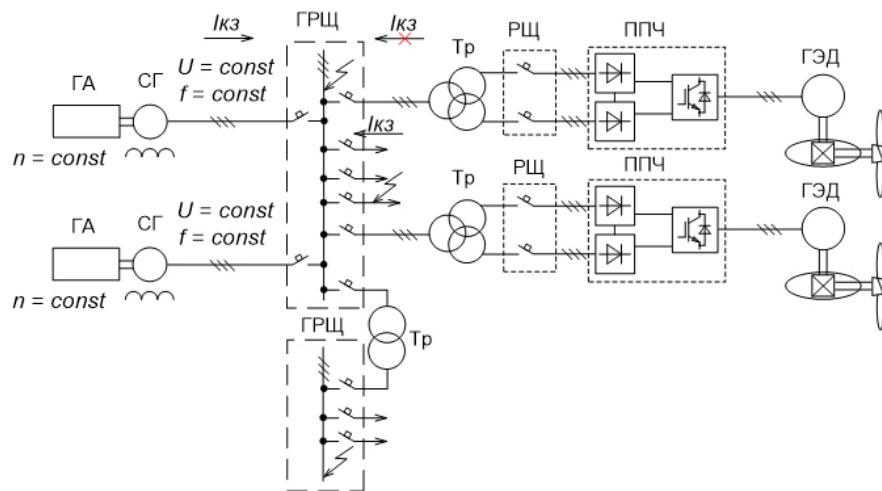


Рис. 2 Единая судовая электроэнергетическая система с СЭД

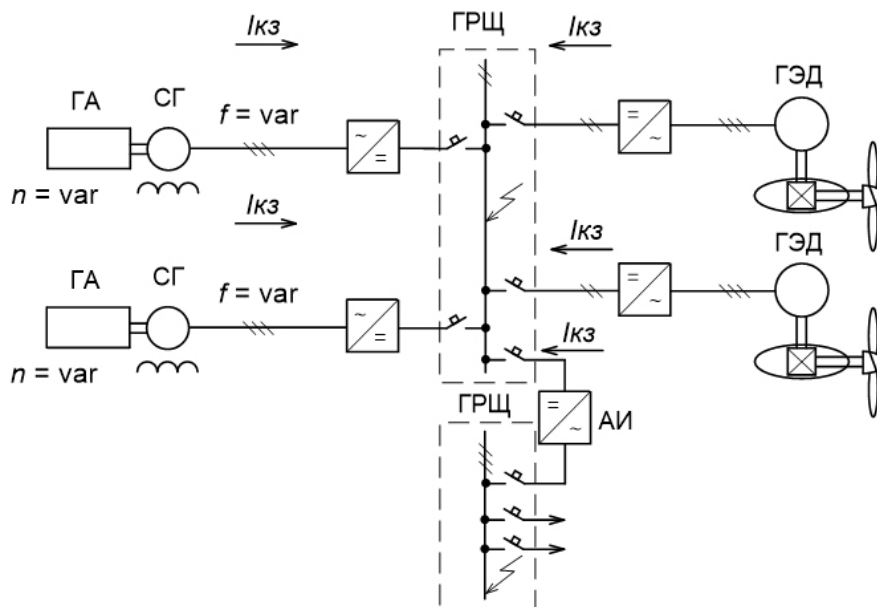


Рис. 3 Структурная схема ЕЭЭС с СЭД и распределением электроэнергии на постоянном токе

постоянного тока посредством автономных инверторов напряжения преобразуется обратно в переменный род тока и питает гребной электропривод и общесудовые приемники электроэнергии.

Использование вентильных ГА, в состав которых входит приводной двигатель, генератор переменного тока и полупроводниковый выпрямитель позволяет добиться существенной экономии топлива. Это достигается за счет снижения эксплуатационной частоты вращения ГА при работе на долевой нагрузки или нагрузки близкой к холостому ходу. В традиционных СЭЭС ГА работают с номинальной частотой вращения, при которой и происходит расчет

токов КЗ. При снижении частоты вращения, а, следовательно, и частоты электрического тока уменьшаются индуктивные сопротивления трехфазного генератора и возрастают токи КЗ. Следовательно, при работе ГА с переменной частотой вращения расчет токов КЗ необходимо производить при минимальной эксплуатационной частоте вращения приводного двигателя.

Значение внутренних сопротивлений полупроводникового выпрямителя значительно меньше сопротивлений генератора. В связи с этим при возникновении КЗ выпрямитель оказывает минимальное токоограничивающее действие и значениями

сопротивлений полупроводниковых вентилях (диоды, тиристоры, транзисторы) можно пренебречь.

От ГРЩ постоянного тока получают питание автономные инверторы, которые являются обратимыми и проводят электрический ток в обоих направлениях. Это обстоятельство является принципиально важным и оказывает существенное значение на величину тока КЗ на шинах ГРЩ. Добавляется существенная составляющая тока КЗ, протекающего от ГЭД через инвертор к точке КЗ. При этом в данных ГЭУ отсутствуют согласующие трансформаторы, оказывающие токоограничивающее действие на токи КЗ в традиционных ЕЭЭС.

Необходимо отметить, что мощность ГЭД в ЕЭЭС соизмерима, а зачастую и больше мощности главных генераторов. При этом в каждой СЭД применяется, как правило, не менее двух ГЭУ.

ГЭД эксплуатируется с переменной частотой вращения. Момент возникновения аварийного режима КЗ может произойти при любой частоте вращения ГЭД. Если на выходе вентильных генераторов напряжение имеет постоянное значение, то на выходе автономного инвертора напряжение, а, следовательно, и противо-ЭДС ГЭД может отличаться от номинальной величины. В связи с этим рекомендуется для каждого конкретного судна расчет токов КЗ производить для разных режимов эксплуатации ГЭУ.

На входе автономных инверторов установлены конденсаторы. При возникновении токов КЗ в звене постоянного тока необходимо учитывать протекание токов подпитки точки КЗ от конденсаторов. При этом разряд конденсаторов происходит практически мгновенно с протеканием значительных токов КЗ.

Подпитка токами КЗ от общесудовых приемников электроэнергии так же происходит через полупроводниковые инверторы, на входе которых установлены конденсаторы.

ВЫВОДЫ

1. Расчет токов КЗ в ЕЭЭС с СЭД и распределением электроэнергии на постоянном токе имеет ряд особенностей и не может быть проведен с использованием традиционных известных методов и методик.

2. Расчет токов КЗ в ЕЭЭС с СЭД и распределением электроэнергии на постоянном токе должен производиться при минимальной частоте вращения вентильного ГА. Внутренним сопротивлением полупроводниковых вентилях выпрямителей в связи с их малыми значениями можно пренебречь.

3. При расчетах необходимо учитывать ток подпитки места КЗ от ГЭД через полупроводни-

ковые инверторы. Расчет токов подпитки точки КЗ на ГРЩ необходимо производить при разных режимах эксплуатации ГЭУ.

4. При расчетах токов КЗ необходим учитывать токи от конденсаторов, расположенных на входе полупроводниковых инверторов напряжения, питающих как ГЭД, так и общесудовые приемники электроэнергии.

5. При расчетах необходимо учитывать ток подпитки точки КЗ от общесудовых приемников переменного тока через обратные диоды инверторов напряжения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила классификации и постройки морских судов. Часть XI. – СПб: Российский морской регистр судоходства, 2017.
2. ОСТ5Р.6181-81. Стандарт отрасли «Судовые электроэнергетические системы. Метод расчета переходных процессов», 1981.
3. ОСТ.6126-77. Стандарт отрасли «Судовые электроэнергетические системы постоянного тока. Метод расчета токов короткого замыкания», 1977.
4. Григорьев А.В., Зайнуллин Р.Р., Малышев С.М. Перспективы внедрения вентильных газотурбогенераторов на морском флоте. // Вестник Государственного университета морского и речного флота им. адм. С.О. Макарова, СПб.: ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова, вып. № 1 (35), 2016, с. 165 – 169.
5. Григорьев А.В. Гребная электрическая установка ледокола проекта 21900 М. //Морской флот, № 4, 2012, с. 30 - 33.
6. Григорьев А.В., Лившиц А.И., Глеклер Е.А., Улитовский Д.И. Опыт эксплуатации электроэнергетической установки гидрографического судна «Вайгач». // Судостроение, №6, 2010 г., с. 29-31.
7. Григорьев А.В. Единая электроэнергетическая установка малого гидрографического судна «Вайгач»: опыт проектирования и результаты испытаний. // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. Вып. 31, 2008 г., с. 271-278.

REFERENCES

1. Rules for the Classification and Construction of Sea-Going Ships. Part XI. St. Petersburg, Russian Maritime Register of Shipping, 2017. (In Russian).
2. OST 5R.6181-81. Standart otrasli "Sudovyye elektroenergeticheskiye sistemy. Metod rascheta perekhodnykh protsessov" [OST 5R.6181-81. Ship electric systems. Calculation method of transient process]. 1981.
3. OST.6126-77. Standart otrasli "Sudovyye elektroenergeticheskiye sistemy postoyannogo toka. Metod rascheta tokov korotkogo zamykaniya" [OST.6126-77. Ship electric direct current systems. Calculation method of short-circuit currents]. 1977.
4. Grigoryev A.V., Zaynullin R.R., Malyshev S.M. Perspektivy vnedreniya ventil'nykh gazoturbogeneratorov na morskoy flote [Opportunities of introduction of ship valve gas turbogenerators in marine fleet]. The scientific journal "Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova". 2016, St. Petersburg, GUMRF im. adm. S.O. Makarova, № 1 (35), 2016, pp. 165 – 169. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-1-165-169

5. Grigoryev A.V. Grebnaya elektricheskaya ustanovka ledokola proyekta 21900 M [Electric propulsion plant of icebreaker 21900 M]. *Morskoy flot* [Marine fleet]. 2012, № 4, pp. 30 - 33.
6. Grigoryev A. V., Glekler E. A., Livshyts A. I., Ulitovsky D. I. Opyt ekspluatatsii elektroenergeticheskoy ustanovki gidrograficheskogo sudna "Vaygach" [Surveying ship "Vaygach" powerplant operational experience]. *Sudostroyeniye* [Shipbuilding]. 2010, №6, pp. 29-31.
7. Grigoryev A.V. Edinaya elektroenergeticheskaya ustanovka malogo gidrograficheskogo sudna "Vaygach": opyt proyektirovaniya i rezul'taty ispytaniy [Unified Electric Power Plant Installed on Board the Small Hydrographic Ship Vaigach: Design Experience and Test Results]. *Nauchno-tehnicheskiy sbornik Rossiyskogo morskogo registra sudokhodstva* [Research Bulletin by Russian maritime register of shipping]. 2008, № 31, pp. 271-278.

УДК 05.08.00

МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРЕДЕЛА ОГНЕСТОЙКОСТИ КАБЕЛЬНЫХ ПРОХОДОВ ПРИ ТРАНЗИТЕ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ И ЭЛЕКТРОПРОВОДОВ В ОТСЕКАХ СУДОВ

А.А. Варламкин, ФГБУ ВНИИПО МЧС России, Московская область, г. Балашиха

Проведен анализ нормативно-технической документации в части методов определения пределов огнестойкости проходов кабелей в конструкциях судов. Приведена аналогия между методами определения пределов огнестойкости кабельных проходов в зданиях и сооружениях согласно требованиям Федерального закона «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности», по отношению к требованиям «Международного кодекса 2010 года по применению процедур испытания на огнестойкость (Кодекса ПИО 2010)». Рассмотрена возможность определения пределов огнестойкости проходов кабелей в конструкциях судов путем численного моделирования процесса огневых испытаний с учетом марок применяемых кабелей, их расположения в материале заделки в соответствии с проектной документацией. Сформулирована концепция по обязательному внесению изменений в разрабатываемую математическую модель подтверждения соответствия требованиям пожарной безопасности кабельных проходов, применяемых в зданиях и сооружениях, касательно тепловых режимов при проведении испытаний согласно Кодекса ПИО 2010, а также необходимости проведения сравнительных испытаний с целью апробации предлагаемого метода численного моделирования.

Ключевые слова: сооружение, судно, кабель, отсек, пожар, опасные факторы пожара.

METHODS FOR DETERMINING THE FIRE RESISTANCE OF CABLE PENETRATIONS IN TRANSIT CABLE LINES AND ELECTRICAL WIRING IN SHIP COMPARTMENTS

А.А. Varlamkin, FGU VNIPO of EMERCOM of Russia, Balashikha

The article provides the analysis of normative technical documentation on the methodology determining the fire resistance of cable penetrations in ship structures, which has been conducted with correspondence given between the methods of determining the fire resistance limits for cable penetrations in buildings and structures in accordance with the requirements of the Federal Law "Technical regulations for fire safety requirements" and those of International code for application of fire test procedures, 2010 (2010 FTP code). The possibility of determining the fire resistance limits of the cable penetrations in ship structures using the numerical simulation of fire test procedures in ship structures taking into account the brands of cables and their location in the stopping, in accordance with the design documentation, has been discussed, together with the concept of mandatory changes in the developed mathematical model for the confirmation of the fire safety compliance of cable penetrations used in buildings and structures as to the thermal conditions when carrying out the tests in accordance with 2010 FTP Code. The necessity of conducting comparative tests aiming at the approbation of the proposed numerical simulation has been also considered.

Keywords: structure, ship, cable, compartment, fire, fire hazard factors

Первостепенно судно является плавучим сооружением, которое, как и здания, расположенные на суше, оснащено всевозможными инженерными сетями (коммуникациями).

Согласно Федеральному закону [1], внутреннее пространство здания подразумевается разделять противопожарными стенами, перекрытиями и перегородками, формируя пожарные отсеки, с целью предотвращения распространения опасных

факторов пожара [2] из одной части здания/сооружения в другую или между зданиями, сооружениями, зелеными насаждениями. В то же время, в судостроении принято применять переборки и палубы с целью предотвращения распространения пожара и его опасных факторов из аварийного отсека в смежный.

В целях обеспечения безопасности в местах прохождения кабельных каналов, коробов, кабелей

и проводов через строительные конструкции с нормируемым пределом огнестойкости предусматриваются кабельные проходки с пределом огнестойкости не ниже предела огнестойкости пересекаемых конструкций, подтверждение соответствия которых производится согласно [3] в рамках Федерального закона [1]. В то же время аналогичное требование имеет место по отношению к плавучим сооружениям, подтверждение соответствия которых производится в соответствии частью 3 Кодекса [4].

При проведении анализа требований части А. IV «Проходы кабелей» Кодекса [4] установлено, что:

- проходы кабелей должны быть испытаны в горизонтальном и вертикальном положении, что аналогично требованиям к универсальным кабельным проходкам зданий, согласно Стандарту [3];
- при проведении испытаний на огнестойкость, согласно Кодексу [4], применяются различные конструкции, цифровое обозначение которых соответствует времени огневого воздействия, к примеру «А-60», что соответствует ЕИТ 60 в условиях стандартной кривой «время – температура». Так же при проведении испытаний применяются конструкции имеющих классификацию «Н-60», что соответствует ЕИТ 60 в условиях углеводородного температурного режима, согласно Стандарту [5], характеризуемого следующей зависимостью:

$$T = 1080(1 - 0,325 \cdot e^{-0,167t} - 0,675 \cdot e^{-2,5t}) + 20$$

Конструкции переборки, в которых проводится монтаж прохода кабелей, должна обладать размерами $2,42 \times 2,48$ м, а палубы должны обладать размерами $2,44 \times 3,04$ м, с толщиной листов стали либо алюминия согласно Кодексу [4]. При этом толщина внутреннего слоя теплоизоляции, в зависимости от конструкции, устанавливается индивидуально, в техническом задании для каждого судна.

Кодекс [4] предусматривает несколько видов проходов кабелей, таких как:

- неизолированный проход (проход без изоляции);
- частично изолированный проход (проход кабелей изолирован в местах сопряжения с пересекаемой конструкцией (палубного покрытия), за исключением кабелей);
- полностью изолированный проход (проход кабелей изолирован в местах сопряжения с пересекаемой конструкцией (палубного покрытия), в том числе в местах прохода кабелей).

Среди проходов кабелей на судах конструктивно наиболее схожим с кабельными проходками, предусматриваемыми в зданиях, представляются неизолированные проходы кабелей (проходы без изоляции). Данные проходы на противоположной от огневого воздействия стороне лишены палубного покрытия согласно рис. А.2, представленному в Кодексе [4].

Основными местами установки проходов кабелей на судах являются:

- палуба;
- переборка.

Предположим, что имеется некое судно, в котором палуба и переборка выполнены идентично друг другу:

- толщина листов стали 1 и 2 (выделен синим цветом) – 0,0045 м;
- толщина утеплителя (каменная вата – выделена коричневым цветом) – 0.1 м, что представлено на рис. 1.

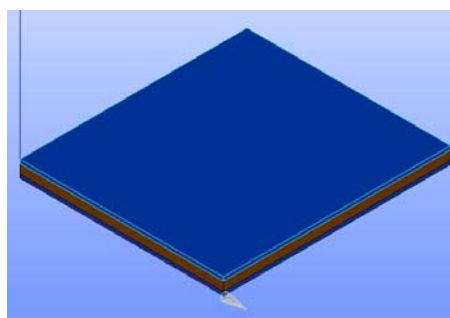


Рис. 1 Фрагмент палубы судна размерами $2,44 \times 3,04 \times 0,109$ м

В центр палубы судна интегрирован неизолированный проход кабеля, что представлено на рис. 2.

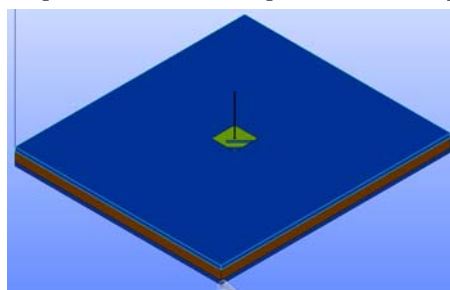


Рис. 2 Интегрированный неизолированный проход кабеля (проход без изоляции) в палубе судна с глубиной заделки, равной толщине конструкции

Также, учитывая специфику судостроения, необходимо предусматривать, что проход кабелей должен быть герметичен. Для удовлетворения данного критерия применяются «закладные детали», выполненные преимущественно из вулканизированной резины. Данное техническое решение позволяет выполнить герметизацию различных кабельных изделий, а также трубопроводов, что показано в каркасной модели на рис. 3.

В результате анализа требований к образцам проходов кабелей, в рамках Кодекса [4], и образцами, используемыми при огневых испыта-

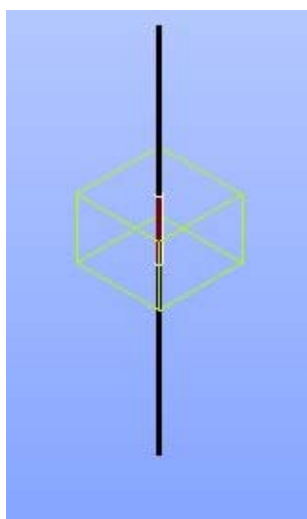


Рис. 3 Каркасная модель прохода кабеля, интегрированного в неизолированный проход кабеля в палубе судна

ниях согласно Стандарту [3], в рамках подтверждения соответствия требованиям Федерального закона [1], было установлено, что основным отличием методов испытаний является:

- применение углеводородного температурного режима, согласно Стандарту [5], при процессе испытаний в рамках Кодекса [4];
- геометрические показатели прохода кабелей, отличие заделочных материалов и наличие образца палубы судна при проведении испытаний с ранее приведенными размерами.

В 2011 году, в ФГБУ ВНИИПО МЧС России, была утверждена тема научно-исследовательской работы на разработку метода математического моделирования по определению пределов огнестойкости кабельных проходок. Данный метод предполагается как альтернатива проведению огневых испытаний (сравнительных и проектных) согласно Стандарту [3], при котором учитываются следующие условия:

- геометрические параметры прокладываемых кабелей, типы их исполнения, материалы конструкций кабельных проходок и глубина их заделки;
- теплофизические свойства материалов кабельных изделий и конструкций кабельных проходок.

Работа по созданию математической модели проведения испытаний, согласно п. 4.1 Стандарта [3] находится в стадии завершения и апробирования на кабельных проходках, применяемых в зданиях и сооружениях. По промежуточным результатам выполняемой научно-исследовательской работы сделан вывод о перспективности предложенного расчетного метода. По отношению к экспериментальному он дает существенную экономию средств и времени на определение предела огнестойкости каждой из проходок.

Научная и практическая новизна заключается в следующем:

- рассматривается нелинейная теплопроводность в процессе горения материалов конструкций кабельных изделий и кабельных проходок;
- предложен алгоритм разработки командных (исполнительных) файлов для каждой конструкции кабельной проходки в зависимости от времени воздействия температурного режима пожара по Стандарту [7], набора кабелей, материала заделки, а также пространственной ориентации кабелей при пересечении рассматриваемого инженерного узла.

По мнению разработчиков, данная математическая модель также может быть применена при определении пределов огнестойкости проходов кабелей на судах после некоторой доработки командного (исполнительного) файла расчета. Доработка командного (исполнительного) файла заключается в импортировании углеводородного температурного режима пожара согласно Стандарту [5], внедрения в геометрическую модель элементов конструкции палубы или переборки, а также кабелей.

Адаптация разрабатываемой математической модели по определению пределов огнестойкости кабельных проходок, применяемых в зданиях и сооружениях, в целях численного моделирования пределов огнестойкости противопожарных конструкций (палуб и переборок) в судах позволит:

- минимизировать затраты на проведение натурных испытаний кабельных проходок;
- выполнить подбор наиболее подходящих уплотнений проходов кабелей исходя из количества и геометрической ориентации кабелей в проходе кабелей, материала уплотнения и глубины его заделки;
- как сопутствующий фактор, при определении предела огнестойкости прохода кабелей, возможно определение огнестойкости конструкции палубы или переборки с учетом тепловой (термической) деформации.

Таким образом, после внесения вышеприведенных изменений в разрабатываемую математическую модель по определению пределов огнестойкости кабельных проходок, применяемых в зданиях и сооружениях и проведения практической апробации для судовых кабельных проходок, она может быть рассмотрена как дополнение или замена огневых испытаний проводимых в рамках Кодекса [4].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федеральный закон от 22 июля 2008 года №123-ФЗ Технический регламент о требованиях пожарной безопасности (с изменениями на 29 июля 2017 года).
2. Кошмаров А.Ю. Прогнозирование опасных факторов пожара в помещении: Учебное пособие.- М.: Академия ГПС МВД России, 2000, 118 с.

3. ГОСТ Р 53310-2009 Проходки кабельные, вводы герметичные и проходки шинопроводов. Требования пожарной безопасности. Методы испытаний на огнестойкость. М.: Стандартиформ, 2009.
4. Международный кодекс 2010 года по применению процедур испытания на огнестойкость (Кодекс ПИО 2010), Принят Резолюцией MSC.307 (88) от 03.10.2010.
5. ГОСТ Р ЕН 1363-2-2014 Конструкции строительные. Часть 2. Испытания на огнестойкость. Альтернативные и дополнительные методы. М.: Стандартиформ, 2014.
6. ГОСТ 31996-2012 Кабели силовые с пластмассовой изоляцией на номинальное напряжение 0,66; 1 и 3 кВ. Общие технические условия. М.: Стандартиформ, 2013.
7. ГОСТ 30247.0-94 Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Общие требования

REFERENCES

1. Federal'nyy zakon ot 22 iyulya 2008 goda №123-FZ Tekhnicheskiy reglament o trebovaniyakh pozharnoy bezopasnosti (s izmeneniyami na 29 iyulya 2017 goda) [The Federal law from 22 July 2008 No. 123 Technical regulations on fire safety requirements (as amended on 29 July 2017)].

2. Koshmarov A.Yu. Prognozirovanie opasnykh faktorov pozhara v pomeshchenii: Uchebnoe posobie [Forecasting of fire dangerous factors in the room: Tutorial]. Moscow, Academy of State Fire Service of the Ministry of Internal Affairs of Russia, 2000, 118 p.
3. GOST R 53310-2009 Prokhodki kabel'nye, vvody germetichnye i prokhody shinoprovodov. Trebovaniya pozharnoy bezopasnosti. Metody ispytaniy na ognestoykost [State Standard R 53310-2009 Through penetration for cables, hermetic inputs and through penetration of electric current types. Requirements of fire safety. Fire resistance test methods]. Moscow, Standartinform Publ., 2009.
4. An international code 2010 on the application procedures for fire resistance tests (Code PIO 2010), Adopted by Resolution MSC.307 (88) from 03.10.2010.
5. GOST R EN 1363-2-2014 Konstruktsii stroitelnye. Chast 2. Ispytaniya na ognestoykost. Alternativnye i dopolnitel'nye metody [Constructions. Part 2. Fire resistance tests. Alternative and additional methods]. Moscow, Standartinform Publ., 2014.
6. GOST 31996-2012 Kabeli silovye s plastmassovoy izolyatsiey na nominal'noe napryazhenie 0,66; 1 i 3 kV. Obshchie tekhnicheskie usloviya [State Standard 31996-2012 Power cables with plastic insulation for rated voltages of 0,66; 1 and 3 kV. General specifications]. Moscow, Standartinform Publ., 2013.
7. GOST 30247.0-94 Konstruktsii stroitelnye. Metody ispytaniy na ognestoykost. Obshchie trebovaniya [State Standard 30247.0-94 Elements of building constructions. Fire-resistance test methods. General requirements].



РАДИОНАВИГАЦИОННОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

УДК 656.61.052.4

СГЛАЖИВАНИЕ ТРАЕКТОРНЫХ ДАННЫХ КРИВОЛИНЕЙНОГО ДВИЖЕНИЯ СУДНА ПРИМЕНИТЕЛЬНО К КОНЦЕПЦИИ УДАЛЕННОГО НАВИГАЦИОННОГО КОНТРОЛЯ

Н.М. Кобец, ФГБОУ ВО «ГМУ имени адм. Ф. Ф. Ушакова», Новороссийск, e-mail: nik7891@ya.ru

В статье рассмотрен метод расчета сглаживания траекторных измерений криволинейного движения судна применительно к концепции удаленного (дистанционного) навигационного контроля. Криволинейное движение судна описывает случайный процесс по причине влияния различных помех. Метод наименьших квадратов предоставляет возможность сглаживания криволинейных линий фактического пути с определенной точностью, а представленный в статье алгоритм обеспечивает автоматизированный контроль за движением судна по линии заданного пути. Проведенное исследование показало относительно хорошие результаты, которые позволяют наглядно выявить несанкционированные отклонения (увод) судна с линии заданного пути, неисправность навигационного оборудования и другие важные навигационные параметры. Таким образом, предложенный метод позволяет реализовать концепцию удаленного (дистанционного) навигационного контроля за судами-автоматами и в перспективе безэкипажными судами.

Ключевые слова: навигация, траекторные измерения, сглаживание, безэкипажные суда, суда-автоматы, способ наименьших квадратов, криволинейное движение, угловая скорость поворота

TRAJECTORY MEASUREMENTS SMOOTHING FOR A SHIP CURVILINEAR MOTION IN REGARD TO THE NAVIGATION REMOTE CONTROL CONCEPT

N.M. Kobets, FSBEO HE "Admiral Ushakov Maritime State University", Novorossisk, e-mail: nik7891@ya.ru

The article describes a calculation method of the trajectory measurements of a ship's curvilinear motion in regard to the navigation remote control concept. Curvilinear motion of a ship describes a random process due to the impact of various interfering factors. The least squares method provides the ability to smooth the curved lines of the actual ship's track with a certain precision and the algorithm presented in the article provides automated control over the ship's movement along the intended track. Studies have shown relatively good results allowing to visually identify unauthorized deviation of the ship from the intended track, failure of navigation equipment and other important navigation parameters. Thus, the proposed method allows implementing the concept of navigation remote control of the autonomous ships and unmanned ships in the future.

Keywords: navigation, trajectory measurements, smoothing, unmanned ships, autonomous ships, the least squares method, curvilinear motion, rate of turn

Концепция судов-автоматов или безэкипажных судов в перспективе устанавливает более жесткие требования выполнения плана перехода и удержания судна на линии заданного пути (ЛЗП). Для оценки и анализа пути судна под наблюдением берегового удаленного (дистанционного) центра необходимо знать отклонения судна от ЛЗП и заранее прогнозировать последующий маршрут. Весь путь следования судна можно разделить на прямолинейные и криволинейные участки. В данной статье предлагается методика сглаживания траекторных измерений криволинейного движения судна способом наименьших квадратов.

В процессе движения судна техническими средствами судовождения фиксируются различные траекторные измерения. Основным показателем точности движения является боковое смещение судна с ЛЗП – $\pm Y_i$ ($-Y_i$ – смещение влево от ЛЗП; $+Y_i$ – смещение вправо от ЛЗП) или ХТД – *cross track distance*. Величина этого смещения устанавливается до начала перехода судна и может изменяться во время следования при необходимости.

Авторами работ [4, 5] были предложены различные методы сглаживания траекторных измерений по координатам, курсу и скорости. В свою очередь, точность удержания судна на ЛЗП зависит от бокового смещения и является одной из первостепенных задач для обеспечения безопасности плавания.

Основным навигационным прибором учета изменения угловой скорости поворота судна является гиротаксметр, который позволяет выдерживать и определять угловую скорость поворота (ROT – *rate of turn*) при движении судна на прямолинейных и криволинейных участках пути. В дополнение к гиротаксметру возможно установить привязку изображений и навигационных параметров к наличию криволинейного движения путем сопоставления судовой и береговой электронных картографических навигационных и информационных систем (ЭКНИС).

Основные формулы нахождения угловой скорости поворота судна представлены в следующем виде:

$$\omega_{\text{сдд}} = \frac{2\pi}{T_{\text{сдд}}} = \frac{2V_c}{D_c} = \frac{V_c}{R_{\text{сдд}}}, \quad (1)$$

– фиксированная угловая скорость, рад/с

$$\omega_{\text{сдд}} = 0,95 \frac{V}{R_{\text{сдд}}}, \quad (2)$$

– фиксированная угловая скорость, град/мин

$$\omega_{\text{сдд}} = \omega_{\text{сдд}} \cdot k = \omega_{\text{сдд}} \cdot \frac{\ddot{E}\ddot{E}_2 - \ddot{E}\ddot{E}_1}{\ddot{O}_2 - \ddot{O}_1} \quad (3)$$

– фиксированная угловая скорость при компенсации влияния течения, град/мин

где: V_c, V – скорость судна, м/с и узл.;
 D_c – диаметр поворота, м;
 $R_{\text{сдд}}, R_{\text{сдд}}$ – заданный радиус поворота, м и м. миля (морская миля).

Несмотря на то, что заданные угловые скорости судна на криволинейных участках маршрута могут быть определены с высокой точностью и выдержаны либо техническими средствами, либо рулевым, – погрешности и влияние гидрометеорологических факторов вызывают рыскание судна при выполнении маневра.

Используя способ наименьших квадратов с целью минимизации суммы квадратов боковых смещений, можно выстроить сглаженные кривые второго порядка на каждом участке криволинейного движения с достаточной точностью.

Формула нахождения минимума функционала боковых смещений судна с ЛЗП определяется так:

$$\sum_{i=1}^n \Delta Y_i^2 = \min \quad (4)$$

Для нахождения сглаженных боковых смещений судна с ЛЗП при криволинейном движении необходимо воспользоваться следующими формулами, представленными ниже:

$$Y_i^* = Y_1^* + V_c^* \cdot \Delta t \cdot (i-1) + \frac{\omega_c^*}{2} \cdot [\Delta t \cdot (i-1)]^2, \quad (5)$$

– сглаженные значения боковых смещений судна с ЛЗП, м. миля

$$Y_1^* = \sum_{i=1}^n Y_i \cdot \eta_{Y_1}(i), \quad (6)$$

– среднее значение бокового смещения, м. миля

$$V_c^* = \sum_{i=1}^n Y_i \cdot \eta_{V_c}(i), \quad (7)$$

– боковая составляющая скорости, 1/мин

$$\omega_c^* = \sum_{i=1}^n Y_i \cdot \eta_{\omega_c}(i), \quad (8)$$

– сглаженное постоянное ускорение, м. миля/мин²

$$Y_n^* = \sum_{i=1}^n Y_i \cdot \eta_{Y_n}(i), \quad (9)$$

– среднее значение бокового смещения в n -й точке, м. миля

$$\Delta t = 1 \text{ мин} \quad (10)$$

– время дискретного измерения

Значения весовых функций находятся по формулам:

$$\eta_{Y_1}(i) = \frac{3}{n(n+1)(n+2)} [3(n+1)(n+2) - 2i(6n+7) + 10i^2], \quad (11)$$

– весовая функция первой точки

$$\eta_{V_c}(i) = - \frac{6}{\Delta t(n^2-1)(n^2-4)} \times \\ \times [(n+1)(n+2)(6n-7) - 2i(16n^2-19) + 30i^2(n-1)], \quad (12)$$

– весовая функция боковой скорости, 1/мин

$$\eta_{\omega_c} = \frac{60}{\Delta t^2 n(n^2-1)(n^2-4)} \times \\ \times [(n+1)(n+2) - 6i(n+1) + 6i^2], \quad (13)$$

– весовая функция ускорения, 1/мин²

$$\eta_{Y_n}(i) = \frac{3}{n(n+1)(n+2)} [(n+1)(n+2) - 2i(4n+3) + 10i^2], \quad (14)$$

– весовая функция в n -й точке.

Вышеперечисленные формулы представляют собой математическое представление сглаженной кривой второго порядка боковых смещений судна, используя способ наименьших квадратов. Данные формулы могут быть использованы для автоматической оценки и анализа параметров движения судна при криволинейном движении.

На основании изложенной методики произведен сбор экспериментальных данных на танкере-химовозе с дедвейтом 16565 тонн с использованием автоматического приемоиндикатора (АПИ) Глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС). Используя полученные экспериментальные данные, строится график значений боковых смещений судна (рис. 1).

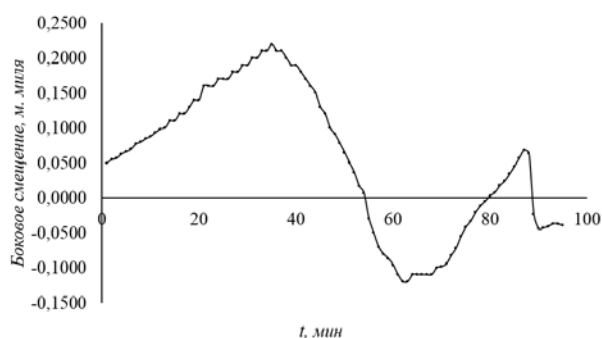


Рис. 1 Полученные экспериментальные боковые смещения судна

Следует отметить, что для лучшего анализа и облегчения вычислений, полученные значения боковых смещений судна с ЛЗП представляются вдоль одной оси.

Как видно из рис. 1, судно производит криволинейное движение на следующих участках (отрезках времени) пути, пересекая ЛЗП: точки 1 – 54 мин, 55 – 80 мин, 81 – 87 мин. Для построения сглаживающей кривой второго порядка используется участок пути пересечения судном ЛЗП $\Delta t = 54 – 80$ мин.

Далее составляется табл. 1. боковых смещений судна от ЛЗП и расчетов сглаживающей кривой второго порядка по вышеприведенным формулам (5) – (14).

На основе расчетов табл. 1 строится график полученных значений боковых смещений судна и сглаживающей кривой второго порядка его движения (рис. 2).

Зная значения полученных боковых смещений судна и рассчитав сглаженные боковые смещения кривой второго порядка движения судна (табл. 1), рассчитывается невязка по следующей формуле:

$$\Delta Y = Y_i^* - Y_i. \quad (15)$$

По данным табл. 1 строится график разности полученных и сглаженных боковых смещений (рис. 3).

По формуле (8) находится сглаженное постоянное ускорение:

$\omega_c^* = 0,001 \text{ м. миля/мин}^2$, – что соответствует развороту судна вправо с выходом на ЛЗП.

Как видно из рис. 2, сглаживающая кривая второго порядка достаточно точно описывает

Таблица 1

Экспериментальные и вычисленные значения сглаженной кривой второго порядка

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
t , мин	i	Y_i , м. миля	$\eta_{Y_1}(i)$	$\eta_{Y_1}(i)Y_i$, м. миля	$\eta_{Y_2}(i)$	$\eta_{Y_2}(i)Y_i$, м. миля	$\eta_{\omega_c}(i)$	$\eta_{\omega_c}(i)Y_i$, м. миля	Y_i^* , м. миля	$\Delta Y = Y_i^* - Y_i$, м
54	1	0,0065	6324	41	103350	670	650	4	-0,0200	-49
55	2	-0,0297	5400	-160	82400	-2447	500	-15	-0,0353	-10
56	3	-0,0502	4536	-228	63010	-3164	362	-18	-0,0491	2
57	4	-0,0702	3732	-262	45180	-3171	236	-17	-0,0616	16
58	5	-0,0805	2988	-240	28910	-2326	122	-10	-0,0728	14
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
75	22	-0,0421	-480	20	-9000	379	20	-1	-0,0551	-24
76	23	-0,0335	-144	5	2810	-94	122	-4	-0,0419	-16
77	24	-0,0211	252	-5	16180	-341	236	-5	-0,0273	-12
78	25	-0,0113	708	-8	31110	-353	362	-4	-0,0114	0
79	26	-0,0049	1224	-6	47600	-231	500	-2	0,0059	20
80	27	0,0027	1800	5	65650	177	650	2	0,0245	40

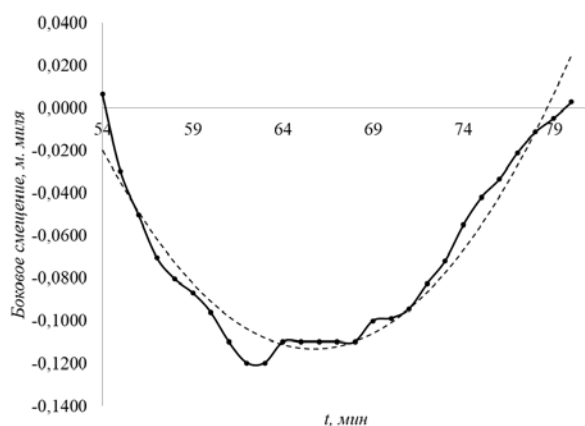


Рис. 2 Полученные значения боковых смещений судна и сглаживающая кривая второго порядка

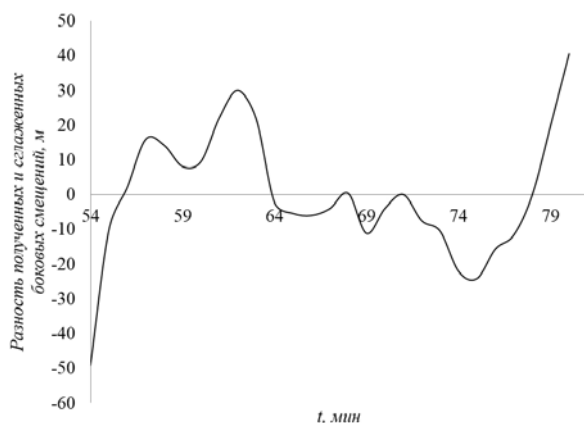


Рис. 3 Разность полученных и сглаженных боковых смещений криволинейного движения судна

движение судна. Для того чтобы предотвратить значительные невязки, например, участок пути точки $\Delta t = 59 - 64$ ($\Delta Y_i = 30$ м), необходимо тщательно контролировать маневр судна дополнительными техническими средствами судовождения.

Как видно из рис. 3, разность смещений не является постоянной и изменяется от $\Delta Y_i < 0$ до $\Delta Y_i > 0$. Это говорит о том, что судно совершало маневр; сглаживающая кривая второго порядка распределена как слева, так и справа от измеренных боковых смещений; максимальное значение разности смещений составило порядка $\Delta Y_i = 30$ м, что удовлетворяет предъявляемым требованиям к АПИ ГНСС.

Изложенная методика представляет собой автоматизированный контроль за местоположениями судна на криволинейных участках пути, является непосредственным алгоритмом сглаживания траекторных измерений и может быть использована для реализации концепции судов-автоматов и в перспективе безэкипажных судов.

Используя данную методику, возможно выявить несанкционированное отклонение (увод) судна с ЛЗП сопоставляя измеренные и сглаженные кривые боковых смещений движения судна.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баранов Ю. К., Гаврюк М. И., Логиновский В. А., Песков Ю. А. – Навигация. Учебник для вузов. – СПб.: Изд. во «Лань», 1997. – 512 с.
2. Боран – Кешишьян А. Л., Кобец Н. М. – Сопоставление текущих координат судна по одновременным данным с двух АПИ СРНС применительно к концепции удаленного навигационного контроля // Транспортное дело России, 2016. – №3. – с. 118 – 124.
3. Вагущенко Л. Л. – Обработка навигационных данных на ЭВМ. – М.: «Транспорт», 1985. – 145 с.
4. Васков А. С., Мельник В. Г. – Кусочно-линейное сглаживание траекторных данных движения судна // Эксплуатация водного транспорта, 2015. – №1(74). – с. 28 – 32.
5. Васков А. С., Мельник В. Г. – Оценка сноса судна по траекторным данным // Эксплуатация водного транспорта, 2015. – №2 (75). – с. 34 – 38.
6. Вентцель Е. С. – Теория вероятностей. – М.: Наука, 1969. – 576 с. с илл.
7. Дуров А. А., Кан В. С., Ничипоренко Н. Т., Устинов Ю. М. – Судовая радиолокация. Судовые радиолокационные системы и САРП. Учебник для вузов. Изд. 2 – е, переработанное и исправленное. – П. – Камчатский, Камчат ГТУ, 2005. – 280 с. Ил, табл., библиогр. назв.
8. Кузьмин С. З. – Цифровая обработка радиолокационной информации. – М., Советское радио, 1967. – 400 с.
9. Молоканов Г. Ф. – Объективный контроль точности самолетовождения. – М.: «Воениздат», 1980. – 126 с.
10. Песков Ю. А. – Морская навигация с ГЛОНАСС / GPS. Учебное пособие для вузов + CD. М.: «Моркнига», 2010. – 344 с.
11. Песков Ю. А. – Радиолокационная проводка судна. Методы навигационного использования судовой РЛС. Учебное пособие. – М.: В/О «Мортехинформреклама», 1983. – 88 с.
12. Песков Ю. А. – Использование РЛС в судовождении. – М.: Транспорт, 1986. – 144 с. (Б – ка судоводителя).

REFERENCES

1. Baranov Ju.K., Gavryuk M.I., Loginovskij V.A., Peskov Ju.A. Navigacija. Uchebnik dlja vuzov [Navigation. Textbook for high schools]. St. Petersburg, Lan' Publ., 1997, 512 p. [In Russian]
2. Boran – Keshish'jan A.L., Kobets N.M. Sopostavlenie tekushih koordinat sudna po odnovremjonnym dannym s dvuh API SRNS primenitel'no k koncepcii udaljonno navigacionnogo kontrolja [Comparison of the current coordinates of the vessel by simultaneous data from two GNSS indicators of the satellite radio navigation system applicable to the concept of remote navigation control]. Transportnoe delo Rossii [Transport business of Russia] 2016, №3, pp. 118 – 124. [In Russian]
3. Vagushhenko L.L. Obrabotka navigacionnyh dannyh na JeVM [Processing of navigation data on a computer]. Moscow, Transport Publ., 1985, 145 p. [In Russian]
4. Vas'kov A.S., Mel'nik V.G. Kusочно-linejnoe sglazhivanie traektornyh dannyh dvizhenija sudna [Piecewiselinear smoothing of the ship motion trajectory data]. Jekspluatacija vodnogo transporta [Operation of water transport]. 2015, №1 (74), pp. 28 – 32. [In Russian]

5. Vas'kov A.S., Mel'nik V.G. Ocenka snosa sudna po traektornym dannym [Evaluation of the demolition of the ship on a trajectory data]. Jekspluatacija vodnogo transporta [Operation of water transport]. 2015, №2 (75), pp. 34 – 38. [In Russian]
6. Ventcel' E.S. Teorija verojatnostej [Probability theory]. Moscow, Nauka Publ., 1969, 576 p. [In Russian]
7. Durov A.A., Kan V.S., Nichiporenko N.T., Ustinov Ju.M. Sudovaja radiolokacija. Sudovye radiolokacionnye sistemy i SARP. Uchebnik dlja vuzov. Izd. 2 – e, pererabotannoe i ispravlennoe [Ship radar. Ship and ARPA radar systems. Textbook for high schools. Ed. 2nd, revised and corrected]. Petropavlovsk-Kamchatsky, KamchatGTU, 2005, 280 p. [In Russian]
8. Kuz'min S.Z. Cifrovaja obrabotka radiolokacionnoj informacii [Digital processing of radar data]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1967, 400 p. [In Russian]
9. Molokanov G.F. Ob'ektivnyj kontrol' tochnosti samoljotovozhdenija [Objective control of precision piloting]. Moscow, Voenizdat Publ., 1980, 126 p. [In Russian]
10. Peskov Ju.A. Morskaja navigacija s GLONASS / GPS. Uchebnoe posobie dlja vuzov + CD [Navigating with GLONASS / GPS. Textbook for high schools + CD]. Moscow, Morkniga Publ., 2010, 344 p. [In Russian]
11. Peskov Ju.A. Radiolokacionnaja provodka sudna. Metody navigacionnogo ispol'zovanija sudovoj RLS. Uchebnoe posobie [Radar ship pilotage. Methods of using marine navigation radars. Textbook]. Moscow, Morteinformreklama Publ., 1983, 88 p. [In Russian]
12. Peskov Ju.A. Ispol'zovanie RLS v sudovozhdenii [Use of radar in navigation]. Moscow, Transport Publ., 1986, 144 p. [In Russian]



КОНТЕЙНЕРНЫЕ ПЕРЕВОЗКИ

УДК 664.004.12:536.2

ОЦЕНКА ВРЕМЕНИ НАГРЕВАНИЯ ЗАМОРОЖЕННОЙ ПРОДУКЦИИ В БЛОКАХ ПРИ ХРАНЕНИИ В ГЕРМЕТИЧНОМ КОНТЕЙНЕРЕ БЕЗМАШИННОГО ХОЛОДООБЕСПЕЧЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СУХОГО ЛЬДА

В.Ф. Диденко, канд. техн. наук, доцент, профессор, Санкт-Петербургский Государственный Морской технический университет» (СПбГМТУ), Санкт-Петербург

А.Н. Щербяк, СПбГМТУ, Санкт-Петербург, e-mail: anton.sherbyak@mail.ru

А.Ю. Зайцев, СПбГМТУ, Санкт-Петербург

А.Н. Чикулаев, ООО «ТРАНСГЕО», Ломоносов

В работе предлагается математическая модель расчета времени нагрева (дефростации) предварительно замороженной продукции от -18°C до -8°C . Аналитическое решение дифференциального уравнения теплопроводности Фурье с начальными условиями 3-го рода позволяет рассчитать время нагрева продукции при безмашинном холодообеспечении контейнера за счет аккумуляционного холода продукции. Расчетная модель позволяет рассчитать необходимое количество сухого льда, холодопроизводительность которого должна быть достаточной для компенсации внешних теплопритоков, которые были получены на основании теплового баланса контейнера и таким образом предотвратить повышение температуры выше -8°C в течение расчетных 30 суток хранения. Выполненные расчеты определяют количество продукции, которое может поместиться в контейнере, и уточняют максимально возможную толщину изоляции контейнера, и на основании этого определить коэффициент теплопередачи от внешней среды к грузу.

Ключевые слова: контейнер, замороженная продукция, безмашинное охлаждение, сухой лед, нагревание (дефростация), дифференциальное уравнение Фурье, теплопроводность, математическая модель

EVALUATION OF THE HEATING TIME FOR FROZEN PRODUCTS IN BLOCKS DURING STORAGE IN A SEALED CONTAINER OF MACHINE-FREE COLD SUPPLY USING DRY ICE

V.F. Didenko, PhD, associate professor, professor, St. Petersburg State Maritime Technical University (SMTU), St. Petersburg

A.N. Scherbyak, SMTU, St. Petersburg, e-mail: anton.sherbyak@mail.ru

A.Yu. Zaitsev, SMTU, St. Petersburg

A.N. Chikulaev, LLC "TRANS GEO", Lomonosov

In the paper, a mathematical model is proposed for calculating the heating (defrosting) time of pre-frozen products from -18°C to -8°C . The analytical solution of the differential equation of Fourier thermal conductivity with initial conditions of the third kind makes it possible to calculate the heating time of the production at machine-free cooling of the container due to the product's accumulative holdover cold. The design model allows to calculate the required amount of dry ice, the cooling capacity of which is sufficient to compensate for external heat inflows, which have been obtained on the basis of the container's heat balance, and thus prevent a temperature rise above -8°C during the estimated 30 days of storage. The calculations performed determine the maximum amount of product a container can hold and specify the maximum possible thickness of the container's insulation, based on which the heat transfer coefficient from the external medium to the cargo is defined.

Keywords: container, frozen products, machine-free cooling, dry ice, heating (defrostation), differential Fourier equation, heat conductivity, mathematical model

При больших объемах реализации продукта (на примере рыбопродукции) на рынки сбыта наиболее энергетически эффективным способом сохранения качества, в соответствии с требованием действующего СНиП 2.11.02-87-м, является традиционный способ холодообеспечения с помощью парокомпрессорных холодильных машин.

Последние широко применяются в городах с разветвленной инфраструктурой распределительных, производственных и специализированных промышленных холодильников.

Доставка продукции на рынки сбыта в отдаленные регионы страны преимущественно осуществляется в контейнерах с безмашинным охлаждением с использованием водного льда с добавлением соли, эвтектических растворов, сухого льда и т.д. На практике хранение продукции более 3 – 4 суток при температуре окружающей среды около 25°C не может гарантировать сохранения ее качества.

В настоящей работе авторы делают попытку разработать методологию расчета времени нагревания замороженной продукции в блоках при хранении в герметичном контейнере безмашинного холодообеспечения с использованием сухого льда.

Аналитическое решение дифференциального уравнения теплопроводности Фурье с начальными условиями 3-го рода позволяет рассчитать время нагревания продукции от воздействия окружающей среды на первом этапе, а затем оценить количество сухого льда, необходимое для заданного режима поддержания температуры продукции не выше -8°C в течение 30 суток.

Для решения поставленной задачи используются следующие допущения:

1. Начальная температура продукции в центре блока после загрузки в контейнер должна быть не выше -18°C .

2. Расчетная температура окружающей среды должна быть не выше 25°C .

3. Продукция в контейнере представляется как прямоугольный параллелепипед.

4. Физические свойства продукции однородны по всему объему.

5. Коэффициент теплопередачи ограждения контейнера постоянный.

6. В расчете времени нагревания продукции от окружающей среды учитывается только теплоприток через ограждение контейнера от окружающего воздуха.

7. В расчете количества сухого льда теплоприток от продукции к сухому льду равен 0.

8. Удельная теплота парообразования (холодопроизводительность) сухого льда Дж/кг постоянна.

1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЛИЧЕСТВА ГРУЗА, КОТОРОЕ МОЖЕТ ПОМЕСТИТЬСЯ В КОНТЕЙНЕР С УЧЕТОМ ТОЛЩИНЫ СТЕН

Сначала определим какое количество груза может поместиться в контейнер. Габариты контейнера принимаются в соответствии с принятыми нормативами.

Изначальные толщины материалов стен контейнера принимаем в соответствии с толщинами ограждения рефрижераторного вагона [1].

Суммарная толщина стенки контейнера:

Толщина стенки контейнера:

$$t = \delta_c + \delta_{из} + \delta_{г.из} = 204 \text{ мм}, \quad (1.1)$$

где: $\delta_c = 2$ – толщина слоя стали, мм;
 $\delta_{из} = 200$ – толщина слоя теплоизоляции, мм;
 $\delta_{г.из} = 2$ – толщина слоя гидроизоляции, мм.

Рассчитываем количество груза, которое может поместиться с учетом толщины стенки.

По длине контейнера:

$$n_l = \frac{L_k - 2t}{L_g} = 7,06 \quad (1.2)$$

где: $L_k = 6$ – длина контейнера, м;
 $L_g = 0,6$ – длина единицы груза, м.

По ширине контейнера:

$$n_b = \frac{B_k - 2t}{B_g} = 8,12 \quad (1.3)$$

где: $B_k = 2,4$ – ширина контейнера, м;
 $B_g = 0,25$ – ширина единицы груза, м.

По высоте контейнера:

$$n_h = \frac{H_k - 2t}{H_z} = 12,12 \quad (1.4)$$

где: $H_k = 2,5$ – высота контейнера, м;
 $H_z = 0,18$ – высота единицы груза, м.

При проектировании камеры необходимо учесть, что по длине ширине и высоте остаются пустоты между грузом и стенками контейнера, увеличиваем толщину изоляции на длину этих пустот:

По длине контейнера:

$$a_l = \frac{L_z n_l - L_{целое}(n_l)}{2} = 0,025 \text{ м} \quad (1.5)$$

По ширине контейнера:

$$a_b = \frac{B_z n_b - B_{целое}(n_b)}{2} = 0,015 \text{ м} \quad (1.6)$$

По высоте контейнера:

$$a_h = \frac{H_z n_h - H_{целое}(n_h)}{2} = 0,0115 \text{ м} \quad (1.7)$$

По значениям рассчитанных расстояний от груза до стенки контейнера a_l , a_b , a_h выполняется пересчет толщин изоляции стен:

По длине контейнера:

$$\delta_{из.l} = \delta_{из} + a_l = 0,225 \text{ м} \quad (1.8)$$

По ширине контейнера:

$$\delta_{из.b} = \delta_{из} + a_b = 0,215 \text{ м} \quad (1.9)$$

По высоте контейнера:

$$\delta_{из.h} = \delta_{из} + a_h = 0,2115 \text{ м} \quad (1.10)$$

Толщины стен контейнера пересчитываются с учетом новой толщины изоляции:

По длине контейнера:

$$t_l = \delta_c + \delta_{из.l} + \delta_{г.из} = 229 \text{ мм} \quad (1.11)$$

По ширине контейнера:

$$t_b = \delta_c + \delta_{из.b} + \delta_{г.из} = 219 \text{ мм} \quad (1.12)$$

По высоте контейнера:

$$t_h = \delta_c + \delta_{из.h} + \delta_{г.из} = 215,5 \text{ мм} \quad (1.13)$$

Рассчитывается количество паков, которое может поместиться в контейнер с учетом новых толщин изоляции контейнера:

$$n = \text{целое}(n_l) \cdot \text{целое}(n_b) \cdot \text{целое}(n_h) = 672 \text{ пака} \quad (1.14)$$

Для улучшения эксплуатационных характеристик контейнера, а также для исключения учитываемых внешних теплопритоков вместо верхнего ряда паков предусматривают нишу для сухого льда.

Рассчитывается количество паков, которые исключаются для установки ниши с хранилищем сухого льда:

$$n_{с.л} = 1 \cdot \text{целое}(n_l) \cdot \text{целое}(n_b) = 56 \text{ паков} \quad (1.15)$$

После внесения конструктивных изменений, определяется количество паков в контейнере:

$$n_{нов} = n - n_{с.л} = 616 \text{ паков} \quad (1.16)$$

Рассчитывается объем освободившегося места:

$$V_{с.л} = n_{с.л} V_{пака} = n_{с.л} L_z B_z H_z = 2,016 \text{ м}^3 \quad (1.17)$$

Рассчитаем массу сухого льда по формуле:

$$m_{с.л} = \rho_{с.л} V_{с.л} = 3146 \text{ кг}, \quad (1.18)$$

где $\rho_{с.л} = 1561$ – плотность сухого льда, кг/м³

Рассчитаем приведенный коэффициент теплопередачи контейнера [1], который равняется.

$$k_{np} = k_{инф} \frac{\sum_{i=1}^3 k_i F_i}{F} \quad (1.19)$$

где: $k_{инф} = 1,5$ – коэффициент учитывающий инфильтрацию;
 F_i – площадь i -той поверхности контейнера, м²;
 F – суммарная площадь поверхности контейнера, м².

$$k_i = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_n} + \frac{\delta_c}{\lambda_c} + \frac{\delta_{из}}{\lambda_{из}} + \frac{\delta_{г.из}}{\lambda_{г.из}} + \frac{1}{\alpha_в}} \quad (1.20)$$

где: α_n – коэффициент теплоотдачи на наружной поверхности контейнера, Вт/м²К;
 $\alpha_в = 6$ – коэффициент теплоотдачи на внутренней поверхности контейнера, Вт/м²К;
 $\lambda_c = 46,4$ – коэффициент теплопроводности стали, Вт/мК;
 $\lambda_{из} = 0,022$ – коэффициент теплопроводности изоляции, Вт/мК;
 $\lambda_{г.из} = 0,197$ – коэффициент теплопроводности гидроизоляции, Вт/мК;

$$\alpha_n = \frac{0,7(v + 15)}{L_k^{0,2}} = 26,12 \text{ Вт/м}^2\text{К} \quad (1.21)$$

где: $v = 20$ – скорость движения контейнера, км/ч.

Коэффициент теплоотдачи по длине контейнера:

$$k_l = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_n} + \frac{\delta_c}{\lambda_c} + \frac{\delta_{из.l}}{\lambda_{из}} + \frac{\delta_{г.из}}{\lambda_{г.из}} + \frac{1}{\alpha_в}} = 0,096 \text{ Вт/м}^2\text{К} \quad (1.22)$$

Коэффициент теплоотдачи по ширине контейнера:

$$k_b = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_n} + \frac{\delta_c}{\lambda_c} + \frac{\delta_{из.b}}{\lambda_{из}} + \frac{\delta_{г.из}}{\lambda_{г.из}} + \frac{1}{\alpha_в}} = 0,102 \text{ Вт/м}^2\text{К} \quad (1.23)$$

Коэффициент теплоотдачи по высоте контейнера:

$$k_h = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_n} + \frac{\delta_c}{\lambda_c} + \frac{\delta_{из.h}}{\lambda_{из}} + \frac{\delta_{г.из}}{\lambda_{г.из}} + \frac{1}{\alpha_в}} = 0,1 \text{ Вт/м}^2\text{К} \quad (1.24)$$

$$k_{np} = \frac{1,5 \cdot 2L_k B_k k_l + 2L_k H_k k_b + 2B_k H_k k_h}{F} = 0,15 \text{ Вт/м}^2\text{К}$$

Приведенный коэффициент теплопередачи ограждения контейнера принимается в соответствии с выполненными расчетами.

2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ВРЕМЕНИ НАГРЕВАНИЯ КОНТЕЙНЕРА

Зависимость времени нагрева содержимого контейнера от наружной температуры определяется с помощью аналитического решения уравнения теплопроводности с граничными условиями 3-го рода. Для этого решается дифференциальное уравнения с начальными условиями $T_0 = -18^\circ\text{C}$ (255°K) и $\tau_0 = 0$ с. и граничными условием 3-го рода – теплоприток через разделяющую стенку от окружающей среды [2].

Уравнение теплопроводности Фурье:

$$\frac{\partial T_c(x, t)}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 T_c(x, \tau)}{\partial x^2} \quad (2.1)$$

где: $T_c(x, \tau)$ – функция температуры продукта от времени τ , с и координаты x , м;

$$a = \frac{\lambda}{C_p \rho}$$

λ – удельная теплопроводность продукта, принимаем $1,6 \text{ Вт/мК}$;
 C_p – теплоемкость продукта, принимаем 1800 Дж/кгК ;
 ρ – плотность продукта, принимаем 1000 кг/м^3 ;

Граничные условия 3-го рода:

$$\left. \frac{\partial T_c(x, \tau)}{\partial \tau} \right|_{x=\delta} = \frac{k}{\lambda} (T_\epsilon - T_c(x, \tau));$$

$$\left. \frac{\partial T_c(x, \tau)}{\partial \tau} \right|_{x=-\delta} = \frac{k}{\lambda} (T_\epsilon - T_c(x, \tau));$$

где: $T_\epsilon = 25$ – температура окружающей среды, $^\circ\text{C}$;

$k = k_{np}$,

δ – характерный размер тела, половина от длины ширины и толщины всего груза в контейнере, м.

Решением данного дифференциального уравнения (2.1) с граничными условиями 3-го рода в виде безразмерной температуры является функциональный ряд (2.2) [2]:

$$\Theta_x = \frac{T_\epsilon - T_c(x, \tau)}{T_\epsilon - T_0} = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{2\sin(\mu_k)}{\mu_k + \sin(\mu_k)\cos(\mu_k)} e^{-\mu_k^2 \frac{a\tau}{\delta^2}} \cos(\mu_k \frac{x}{\delta}) \quad (2.2)$$

где: $T_0 = -18$ – начальная температура груза, $^\circ\text{C}$;
 μ_k – корни уравнения $\text{ctg}(\mu) = \mu/Bi$;
 Bi – число Био.

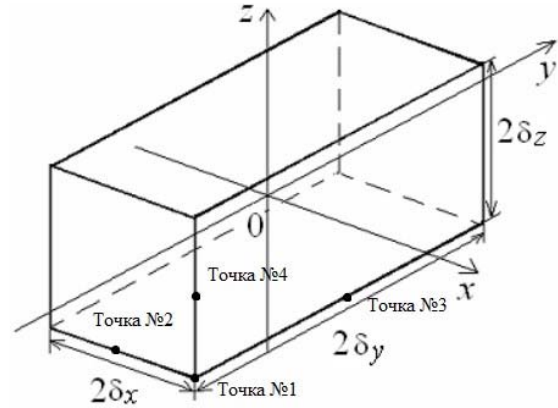


Рис. 1 Расчетные точки груза

Введем прямоугольную систему координат с началом в геометрическом центре груза. Так как прямоугольный параллелепипед образован пересечением трех взаимно перпендикулярных неограниченных пластин, то решением является произведение трех безразмерных температур неограниченных пластин [3]:

Общее решение в развернутом виде запишется как:

$$\Theta = \frac{T(x, y, z, \tau) - T_\epsilon}{T_0 - T_\epsilon}; \quad (2.3)$$

$$\Theta = \Theta_x \Theta_y \Theta_z; \quad (2.4)$$

$$\Theta = \frac{T(x, \tau) - T_\epsilon}{T_0 - T_\epsilon}; \quad (2.5)$$

$$\Theta = \frac{T(y, \tau) - T_\epsilon}{T_0 - T_\epsilon}; \quad (2.6)$$

$$\Theta = \frac{T(z, \tau) - T_\epsilon}{T_0 - T_\epsilon}; \quad (2.7)$$

Для использования функционального ряда (2.2) в расчетах отбросим все члены ряда начиная с 4-го

$$\Theta_x = \sum_{k=1}^3 \frac{2\sin(\mu_{kx})\cos(\frac{2\mu_{kx}x}{L_k - 2t_l})}{m_{kx} + \sin(\mu_{kx})\cos(\mu_{kx})} \times \exp(-\frac{4\mu_{kx}^2 \lambda \tau}{C_p \rho (L_k - 2t_l)^2}); \quad (2.8)$$

$$\Theta_y = \sum_{k=1}^3 \frac{2\sin(\mu_{ky})\cos(\frac{2\mu_{ky}y}{H_k - 2t_h - H_e})}{m_{ky} + \sin(\mu_{ky})\cos(\mu_{ky})} \times \exp(-\frac{4\mu_{ky}^2 \lambda \tau}{C_p \rho (H_k - 2t_h - H_e)^2}); \quad (2.9)$$

$$\Theta_z = \sum_{k=1}^3 \frac{2\sin(\mu_{kz})\cos(\frac{2\mu_{kz}z}{B_k-2t_b})}{m_{kz} + \sin(\mu_{kz})\cos(\mu_{kz})} \times$$

$$\times \exp(-\frac{4\mu_{kz}^2\lambda\tau}{C_p(B_k-2t_b)^2}); \quad (2.10)$$

$$\Theta = \Theta_x \Theta_y \Theta_z; \quad (2.11)$$

$$T(x, y, z, \tau) = T_a - (T_0 - T) \Theta \text{ } ^\circ K. \quad (2.12)$$

Далее для определения времени необходимого для нагрева содержимого контейнера от -18°C до -8°C рассмотрим 4 точки продукции на рис. 1 с координатами указанными в табл. 1:

Таблица 1

Точки для определения температуры груза

№ точки	Координаты, м		
	x	y	z
1	2,8	0,99	1
2	2,8	0,99	0
3	0	0,99	1
4	2,8	0	1

Bi	μ_1	A_1	μ_2	A_2	μ_3	A_3
0	0,0000	1,0000	3,1416	0,0000	6,2832	0,0000
0,1	0,3111	1,0159	3,1731	-0,0197	6,2991	0,0050
0,2	0,4328	1,0312	3,2039	-0,0381	6,3148	0,0100
0,3	0,5218	1,0450	3,2341	-0,0555	6,3305	0,0148
0,4	0,5932	1,0581	3,2636	-0,0719	6,3461	0,0196
0,5	0,6533	1,0701	3,2923	-0,0873	6,3616	0,0243
0,6	0,7051	1,0813	3,3204	-0,1025	6,3770	0,0289
0,7	0,7506	1,0918	3,3477	-0,1154	6,3923	0,0335
0,8	0,7910	1,1016	3,3744	-0,1282	6,4074	0,0379
0,9	0,8274	1,1107	3,4003	-0,1403	6,4224	0,0423
1,0	0,8603	1,1192	3,4256	-0,1517	6,4373	0,0466
1,5	0,9882	1,1537	3,5422	-0,2013	6,5097	0,0667
2,0	1,0769	1,1784	3,6436	-0,2367	6,5783	0,0848
3,0	1,1925	1,2102	3,8088	-0,2881	6,7040	0,1154
4,0	1,2646	1,2287	3,9352	-0,3215	6,8140	0,1396
5,0	1,3138	1,2403	4,0336	-0,3442	6,9096	0,1588
6,0	1,3496	1,2478	4,1116	-0,3604	6,9924	0,1740
8,0	1,3978	1,2569	4,2264	-0,3812	7,1263	0,1959
10,0	1,4289	1,2612	4,3058	-0,3934	7,2281	0,2104
100,1	1,5552	1,2731	4,6658	-0,4239	7,7764	0,2539
∞	1,5708	1,2732	4,7124	-0,4244	7,8540	0,2546

Рис. 2 Значения первых 3-х корней уравнения $\text{ctg}(\mu) = \mu/Bi$ [2]

Число Био рассчитывается для трех осей координат контейнера:

$$Bi_x = \frac{(L_k - 2t_l)k_{np}}{2\lambda} = 0,26 \quad (2.13)$$

$$Bi_y = \frac{(H_k - 2t_h - H_z)k_{np}}{2\lambda} = 0,09 \quad (2.14)$$

$$Bi_z = \frac{(B_k - 2t_b)k_{np}}{2\lambda} = 0,09 \quad (2.15)$$

Из табл. 2 найдем значения коэффициентов μ_1 , μ_2 , μ_3 и занесем их в табл. 3:

Таблица 2

Значения коэффициентов μ_1 , μ_2 , μ_3

Координата	μ_1	μ_2	μ_3
x	0,4328	3,2039	6,3148
y	0,3111	3,1731	6,2991
z	0,3111	3,1731	6,2991

Температуры контрольных точек контейнера рассчитываются, подстановкой значений в формулы (2.8), (2.9), (2.10), (2.11), (2.12) и построением зависимости температуры этих точек от времени.

Результаты расчета сведем в табл. 3.

Для нахождения времени нагрева содержимого контейнера используем графический метод, для этого представим данные из табл. 3 в виде графика на рис. 3 с зависимостью температур точек контейнера от времени. Как видно на рис. 3 температура продукта достигает значения -8°C в точке № 1 за 213 часов. При этом погрешность расчета при отбрасывании бесконечного количества членов в формуле (2.11) при значениях координат точки № 1 и времени 213 часов не превышает $9,5 \times 10^{-5} \%$.

3. РАСЧЕТ ТРЕБУЕМОГО КОЛИЧЕСТВА СУХОГО ЛЬДА ДЛЯ ПОДДЕРЖАНИЯ ЗАДАННОГО ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА

Расчет количества сухого льда, необходимого для поддержания температуры груза в заданном интервале температур, от от -18°C до -8°C в

Таблица 3

Значения температуры в четырех точках в зависимости от времени

Время, ч	30	60,5	91	121,5	152	182,5	213	243,5
Температура точки №1, $^\circ\text{C}$	-14,04	-12,6	-11,48	-10,51	-9,62	-8,78	-7,99	-7,22
Температура точки №2, $^\circ\text{C}$	-15,39	-14,26	-13,23	-12,27	-11,36	-10,48	-9,65	-8,84
Температура точки №3, $^\circ\text{C}$	-15,16	-13,98	-13,09	-12,32	-11,59	-10,88	-10,18	-9,49
Температура точки №4, $^\circ\text{C}$	-15,41	-14,28	-13,24	-12,27	-11,36	-10,48	-9,65	-8,81

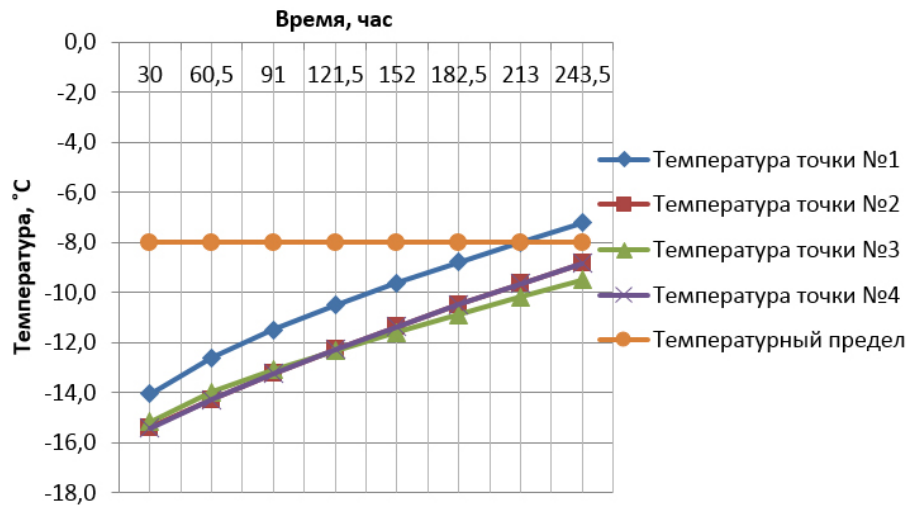


Рис. 3 Зависимость температур точек контейнера от времени (температура точки №2 сливается с точкой №4)

течение требуемого времени проводится с использованием условия равенства 0 суммы теплопритоков.

$$\Sigma Q\tau = 0 \quad (3.1)$$

$$(Q_c + Q_{yc} + Q_{c.p} + Q_{c.l})\tau = 0 \quad (3.2)$$

где: Q_c – теплоприток через ограждение контейнера;
 Q_{yc} – теплоприток от усушки продукта;
 $Q_{c.p}$ – теплоприток от солнечной радиации;
 $Q_{c.l}$ – теплоприток от сухого льда;
 τ – время.

Теплоприток через ограждение контейнера [4];

$$Q_c = k_{np}F(T_{\text{в}} - T_0) = 473,65 \text{ Вт} \quad (3.3)$$

Теплоприток от усушки продукта;

$$Q_{yc} = \frac{k_{yc}m_z(i_1 - i_2)}{\tau} = 19,54 \text{ Вт} \quad (3.4)$$

где: $k_{yc} = 0,04$ – коэффициент учитывающий усушку груза;
 $m_z = 36n = 22176$ – масса груза кг;
 $i_1 = 5,4$ – энтальпия груза (рыба) при температуре $T_0 = -18, ^\circ\text{C}$;
 $i_2 = 45,7$ – энтальпия груза (рыба) при температуре $T_1 = -8, ^\circ\text{C}$;
 τ – время нагрева груза от температуры T_0 до T_1 , с.

Теплоприток от солнечной радиации;

$$Q_{c.p} = (F_p t_{\text{эп}} + (F_{\text{бс}} t_{\text{энв}} + F_k t_{\text{эпр}}) \mu_c) \frac{15}{24} k_{np} = 23,54 \quad (3.5)$$

где: $F_p = L_k B_k + 2L_k H_k + 2B_k H_k = 57,86$ – освещаемая площадь контейнера, м^2 ;
 $F_{\text{бс}} = 2L_k H_k + 2B_k H_k = 44,02$ – площадь боковых поверхностей контейнера, м^2 ;
 $F_k = L_k B_k = 14,76$ – площадь крыши, контейнера м^2 ;
 $t_{\text{эп}} = 1,5$ – начальная температура груза, $^\circ\text{C}$;
 $t_{\text{энв}} = 5,5$ – дополнительный нагрев горизонтальных поверхностей, $^\circ\text{C}$;
 $t_{\text{эпр}} = 11,5$ – дополнительный нагрев вертикальных поверхностей, $^\circ\text{C}$;
 $\mu_c = 0,1 - 0,8$ – вероятность солнечных дней в году.

Теплоприток от сухого льда;

$$Q_{c.l} = \frac{m_{c.l} q_{c.l}}{\tau} \text{ Вт} \quad (3.6)$$

где: $m_{c.l}$ – масса сухого льда, кг;
 $q_{c.l} = 550 \times 10^3$ – удельная теплота парообразования (холодопроизводительность) сухого льда, Дж/кг.

Используем условие (3.1), согласно которому сумма пришедшей и поглощенной теплоты за время перемещения груза должна равняться нулю. Температура груза во время перемещения не изменяется. Для экономии используемого сухого льда вычитается из требуемого времени (нормативно) время нагревания продукции от -18°C до -8°C

$$\tau = \tau_{mp} - \tau = 720 - 213 = 507 \text{ ч} \quad (3.7)$$

где: $\tau_{mp} = 30$ суток – время доставки продукции;
 $\tau_z = 213$ часов – время нагрева продукции от -18°C до -8°C , находим из рис. 3

Отсюда найдем массу сухого льда:

$$m_{c.l} = \frac{(Q_c + Q_{yc} + Q_{c.p} + Q_{c.l})\tau}{q_{c.l}} = 1588 \text{ кг} \quad (3.8)$$

Полученная масса сухого льда меньше максимальной массы сухого льда (1.18), которая может поместиться в нишу для сухого льда.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ и обобщение результатов исследования процесса дефростации продукта, предварительно

замороженного до -18°C , в герметичных контейнерах при безмашинном холодообеспечении последних позволяет утверждать:

1. Время нагрева продукта в контейнерах от -18°C до -8°C , за счет аккумулирующего холода продукции составляет около 213 часов при условии поддержания температуры окружающей среды около 25°C .

2. Результаты расчетов подтверждают возможность продления времени поддержания расчетной температуры продукта, при условии применения сухого льда (двуокиси углерода), размещенного в контейнере.

3. Установлено, что использование холода CO_2 после повышения температуры продукта до -8°C может продлить время сохранения качества продукта, в течение последующих 507 часов.

4. Авторы предлагают в работе математическую модель расчета времени допускаемой продолжительности безмашинного охлаждения продукции. Результаты исследования показали, что погрешность расчета для значений в точке № 1 при температуре -8°C составляет $9,5 \times 10^{-5} \%$. Чтобы исключить сомнение в адекватности расчетной модели заданным расчетным параметрам допускаемого срока хранения и определении погрешности при использующихся допущениях, авторы считают целесообразным проведение экспериментальных исследований процесса дефростации продукта в контейнере.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фишбейн Б.Д., Лисевич Т.В., Титова Е.Н., Котельников Р.И. Методические указания к выполнению лабораторных работ по дисциплине «Энергохолодильные системы вагонов и их ремонт». – Самара: СамГ АПС, 2004. – 44 с.
2. Егоров В.И. Точные методы решения задач теплопроводности. Учебное пособие. – СПб: СПбГУИТМО, 2006. – 48 с.
3. Тепломассообмен: учебное пособие к практическим занятиям / Лобасова М.С., Дектерев А.А., Серебренников Д.С.. – Красноярск: ИПК СФУ, 2009. – (Тепломассообмен: УМКД № 1536-2008 / руководитель творческого коллектива М.С. Лобасова).
4. Дзюба И.С. Перевозка скоропортящихся грузов. Пособие для курсового и дипломного проектирования. Ч1 Гомель: БелГУТ, 2000. – 45 с.

REFERENCES

1. Fishbein B.D., Lisevich T.B., Titova E.N., Kotelnikov R.I. Metodicheskie ukazaniya k vypolneniyu laboratornykh rabot po distsipline «Egergokholodil'nye sistemy vagonov i ikh remont» [Methodical instructions for the performance of laboratory work on the discipline "Energo-cooling systems of wagons and their repair"]. Samara, SamG APS, 2004, 44 p. [In Russian]
2. Egorov V.I. Tochnye metody resheniya zadach teploprovodnosti. Uchebnoe posobie [Exact methods for solving heat conduction problems. Tutorial.]. St. Petersburg, SPbGUITMO Publ., 2006, 48 p. [In Russian]
3. Lobasova M.S. , Dekterev A.A., Serebrennikov D.S.. Teplomas-soobmen: uchebnoe posobie k prakticheskim zanyatiyam [Heat and mass transfer: a textbook for practical studies]. Krasnoyarsk, IPK SFU, 2009. (Teplomassoobmen: UMKD № 1536-2008 / rukovoditel' tvorcheskogo kollektiva [Heat and mass transfer: Educational-methodical complex № 1536-2008 / head of the creative team] M.S. Lobasova). [In Russian]
4. Dzyuba I.S. Perevozka skoroportyashchikhsya gruzov. Posobie dlya kursovogo i diplomnogo proektirovaniya [Transportation of perishable goods. Allowance for course and diploma design]. Gomel, BelGUT Publ., part 1, 2000, 45 p. [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 (<http://www.rs-class.org/ru/register/research/ntsb/>). 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.

Пример:

Byzov A.L., Utina I.A. The centrifugal effects on amacrine cells in the retina of frog. *Neirofiziolgia* [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.

Пример: 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 MGUTU "Matematicheskoe modelirovanie slozhnykh tekhnicheskikh sistem"* [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., Mullagalina 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, Mashinostroyeniye 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_farmatsevticheskaja_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 kolichstva 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 <http://www.rs-class.org/ru/register/research/ntsb/>.

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 Microsoft Equation 3.0 (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.

6. РЕЦЕНЗИРОВАНИЕ СТАТЕЙ

6.1 Текст статьи в электронном виде и в твердой копии следует направлять непосредственно в научно-

исследовательский отдел Главного управления Регистра на имя главного редактора журнала. Статья может быть представлена на соответствующей секции Научно-технического совета Регистра и передана ученым секретарем секции в научно-исследовательский отдел вместе с заключением о возможности опубликования.

6.2 Рецензирование статьи осуществляет Редакционная коллегия журнала с привлечением специалистов соответствующих секций Научно-технического совета. По результатам рецензирования статья может быть принята, отклонена или направлена автору на доработку.

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

6.4 Журнал осуществляет рецензирование всех поступающих в редакцию материалов, соответствующих тематике журнала, 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 редакции журнала в течение 5 лет.

6.5 Редакция журнала обязуется направлять копии рецензий в Министерство образования и науки Российской Федерации при поступлении в редакцию 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://kmtп.ru/>
<http://www.efg-berlin.de/>
<http://maritimeforum.net/>
<http://korabley.net/>
<http://demoweb.hermosoft.com/efos/>

Российский морской регистр судоходства
Журнал
«Научно-технический сборник
Российского морского регистра судоходства»
вып. 48/49

Редакционная коллегия журнала

Ответственные за выпуск: *А.В. Зухарь, М.Р. Маркушина*
Редактор *А.В. Спиленко*
Компьютерная верстка *С.С. Лазарева*
Дизайн концепции *М.В. Батракова*

Подписано в печать 01.12.17. Формат 60 × 84/8
Усл. печ. л.: 14,9. Уч.-изд.л.: 14,6. Тираж 200

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