



НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СБОРНИК

РОССИЙСКОГО МОРСКОГО РЕГИСТРА СУДОХОДСТВА

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ МОРЕПЛАВАНИЯ

практическая реализация требований IMO

18

ПРИБОРЫ КОНТРОЛЯ ОСТОЙЧИВОСТИ

современные требования

64

СИСТЕМА ХРАНЕНИЯ ГРУЗА НА ГАЗОВОЗЕ

алюминиево-магниевые сплавы и сварные соединения

91



№ 42/43

Июнь

2016

Учредитель-издатель

ФАУ «Российский морской регистр судоходства»

Главный редактор

М.С. Бойко

E-mail: research.dept@rs-class.org

ISSN 2223-7097

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.

Редакционная коллегия

Евенко В.И. – председатель, главный инженер - директор департамента классификации, ФАУ «Российский морской регистр судоходства»

Бойко М.С. – заместитель председателя, канд. техн. наук, начальник научно-исследовательского отдела, ФАУ «Российский морской регистр судоходства»

Большев А.С. – д-р. техн. наук, проф., Санкт-Петербургский государственный политехнический университет им. Петра Великого

Григорьев А.В. – канд. техн. наук, доц., ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова

Кутейников М.А. – д-р. техн. наук, начальник отдела конструкции корпуса и судовых устройств, ФАУ «Российский морской регистр судоходства»

Малышевский В.А. – д-р. техн. наук, проф., заместитель генерального директора, ФГУП «ЦНИИ конструкционных материалов «Прометей»

Половинкин В.Н. – д-р. техн. наук, проф., референт генерального директора, ФГУП «Крыловский государственный научный центр»

Родионов А.А. – д-р. техн. наук, проф., заведующий кафедрой строительной механики корабля, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

Рождественский К.В. – д-р. техн. наук, проф., проректор в области международного сотрудничества и образования, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

Сазонов А.Е. – д-р. техн. наук, проф., чл.-корр. РАН, ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова

Тимофеев О.Я. – д-р. техн. наук, проф., заместитель генерального директора, начальник Арктического инженерингового центра, ФГУП «Крыловский государственный научный центр»

Тряскин В.Н. – д-р. техн. наук, проф., первый проректор, 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 базу данных Российского индекса научного цитирования www.elibrary.ru.

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://pereschen.vak2.ed.gov.ru/>.

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

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СБОРНИК

РОССИЙСКОГО МОРСКОГО РЕГИСТРА СУДОХОДСТВА

№ 42/43

RESEARCH BULLETIN

BY RUSSIAN MARITIME REGISTER OF SHIPPING

Санкт-Петербург
2016

ОБРАЩЕНИЕ ГЕНЕРАЛЬНОГО ДИРЕКТОРА РС



УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ!

Выход в свет нового выпуска журнала «Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства» приурочен к Дню работников морского и речного флота.

Обеспечение безопасности человеческой жизни на море является первоочередной задачей, стоящей перед Российским морским регистром судоходства. Ее решение подразумевает не только совершенствование нормативной базы Регистра и повышение качества услуг, но и проведение широкого спектра научных исследований, обеспечение информационной доступности их результатов, поддержание постоянного диалога с широким кругом специалистов морской отрасли.

Развитие журнала «Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства» является неотъемлемой частью решения данной задачи. Широкий состав разделов журнала позволяет осуществить публикацию статей по всем основным направлениям прикладных исследований в области морского транспорта. Традиционно открывает журнал рубрика «Безопасность мореплавания и охрана окружающей среды», посвященная вопросам безопасности и экологии морского транспорта, в том числе практической реализации требований международных нормативных документов.

Наиболее существенные научно-исследовательские работы Регистра, выполненные совместно с ведущими отечественными научными организациями, регулярно находят отражение в журнале. В новом выпуске опубликованы результаты научно-исследовательской работы по развитию требований Регистра к судам, использующим принцип осушения на грунте для выполнения грузовых операций (раздел «Прочность судов и плавучих сооружений»), по развитию программного обеспечения для определения максимальной удерживающей силы и угла крена

эскортных буксиров в соответствии с правилами Регистра (раздел «Мореходные качества судов»).

В разделе «Материалы и сварка» приведены результаты выполненных по заказу Регистра исследований свойств алюминиево-магниевого сплава и сварных соединений для конструкций систем хранения грузов на газовозах. В разделе «Электрооборудование и радионавигационное оборудование» опубликована статья, посвященная разработке методов компьютерного моделирования механических испытаний вращающихся электрических машин, которые позволят внести изменения в существующие требования нормативных документов Регистра и существенно сократить расходы на натурные испытания прочности и работоспособности машин в условиях динамических нагрузок.

Следует отметить повышение интереса к публикациям журнала со стороны судостроительной промышленности, научных и учебных заведений. Расширению аудитории авторов и читателей журнала во многом способствует деятельность Регистра по обеспечению информационной доступности издания. С начала 2016 года к активному расширению читательской аудитории привлечены Архангельский, Астраханский, Дальневосточный и Мурманский филиалы Регистра. Расширение географии читательской аудитории является одним из основных направлений развития журнала на ближайшую перспективу.

Важным этапом подтверждения качества журнала стало его включение в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук. Научные специальности, публикации по которым в журнале признаются Высшей аттестационной комиссией Российской Федерации, включают машиностроение и машиноведение, кораблестроение, металлургию и материаловедение, транспорт и науки о Земле. Таким образом, создана уникальная возможность реализации комплексного подхода к публикации качественных статей в широком диапазоне научных направлений, имеющих непосредственное отношение к обеспечению безопасности мореплавания и защите окружающей среды.

Приглашаем авторов и читателей к сотрудничеству в области развития журнала «Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства». Ваши предложения и пожелания предлагаем направлять непосредственно в адрес Редакционной коллегии журнала.

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

ОБРАЩЕНИЕ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ!

В новом выпуске журнала рубрику «Экономика и управление на морском транспорте» открывает статья, посвященная технико-экономическому обоснованию оптимальных параметров арктического контейнеровоза для транзитных перевозок по Северному морскому пути. В связи с этим следует отметить, что требования к конструкции и прочности современных контейнеровозов в последние годы являются одним из основных объектов внимания со стороны Международной ассоциации классификационных обществ (МАКО). Ряд аварийных случаев, связанных с нарушением целостности корпусных конструкций крупнотоннажных контейнеровозов, создал предпосылки к внесению дополнений в существующую нормативную базу МАКО, целью которых является обеспечение единообразного подхода при классификации контейнеровозов среди всех классификационных обществ, а также высоких стандартов безопасности данных типов судов.

Результатом работы стало создание двух новых Унифицированных требований (УТ): УТ МАКО S11A «Требования к продольной прочности контейнеровозов» и УТ МАКО S34 «Функциональные требования к вариантам нагрузки при проверке прочности контейнеровозов методом конечных элементов». Оба документа распространяются на контейнеровозы и суда, перевозящие грузы преимущественно в контейнерах, неограниченного района плавания, контракт на постройку которых заключен 1 июля 2016 г. и после этой даты. Данные УТ в полном объеме включены в Правила классификации и постройки морских судов Циркулярным письмом Регистра № 314-26-868ц от 17.02.2016.

При разработке УТ S11A, которое по сути является новым стандартом общей продольной прочности контейнеровозов, использовался опыт МАКО по созданию Общих правил по конструкции и прочности нефтеналивных и навалочных судов. В частности, одним из новых обязательных требований является проверка общей предельной прочности корпуса контейнеровозов с применением шагово-итерационной процедуры (т.н. «метод Смита») для судов, длина которых превышает 150 м. Еще одной аналогией между требованиями УТ S11A и требованиями общих правил является внедрение метода расчета касательных напряжений при общем продольном изгибе на основании теоремы о циркуляции касательных напряжений по

замкнутому контуру. Существенные изменения также внесены в требования к расчету устойчивости конструктивных элементов.

Текст УТ S34 по сути является так называемыми «функциональными требованиями» (*"functional requirements"*), то есть не содержит конкретных формул и численных критериев прочности.

«Функциональные требования» подразумевают базовые указания о том, какие основные допущения должны быть приняты при выполнении расчетов методом конечных элементов, каким образом геометрические размеры конечноэлементной модели должны соотноситься с габаритными размерами судна, а также какие статические и динамические нагрузки должны быть приложены к модели. Таким образом, по указанным основным параметрам обеспечивается единообразие требований между классификационными обществами.

Указанное выше отражает существующую тенденцию развития правил классификационных обществ по повышению наукоемкости современных технических требований. При этом данная тенденция характерна не только для требований по конструкции и прочности судов, но для других аспектов безопасности. Внедрение, в частности, положений Целевых стандартов Международной морской организации (*IMO Goal Based Standards*) создает предпосылки для реализации комплексного, наукоемкого и технически насыщенного подхода к разработке нормативных документов в морской индустрии.

Поэтому основным принципом формирования состава статей журнала «Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства» является высокий инженерный уровень проведенных исследований и практическая направленность полученных результатов.



М.С. Бойко
Главный редактор, к.т.н.



СОДЕРЖАНИЕ

Пальников К.Г. Обращение генерального
директора. 2

Бойко М.С. Обращение главного редактора. 3

ОБОЗРЕНИЕ 6

БЕЗОПАСНОСТЬ МОРЕПЛАВАНИЯ И ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Зиненко Н.Н., Панамарев В.Е. Опыт мониторинга
выбросов вредных веществ с отработавшими
газами судовых энергетических установок 8

Емельянов М.Д. Повреждаемость полупогружных
буровых установок и пути ее снижения 14

Гришкин В.В. Применение оборудования
для фильтрации нефти в соответствии
с международными требованиями
по предотвращению загрязнения нефтью
с судов. 18

ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ НА МОРСКОМ ТРАНСПОРТЕ

Штрек А.А., Буянов А.С. Техничко-экономическое
обоснование оптимальных параметров
арктического контейнеровоза для транзитных
перевозок по Северному морскому пути. 23

Чернов О.А. Научно-исследовательские суда
в современной морской индустрии. Обзор 31

ПРОЧНОСТЬ СУДОВ И ПЛАВУЧИХ СООРУЖЕНИЙ

*Апполонов Е.М., Коришунов В.А., Пономарев Д.А.,
Родионов А.А.* Развитие расчетно-эксперимен-
тальных подходов по уточнению локальной
ледовой нагрузки 40

*Азовцев А.И., Евенко В.И., Кулеш В.А., Кутейников М.А.,
Огай А.С., Петров В.А.* Предложение по развитию
требований к судам, эксплуатация которых
предусматривает посадку на грунт. 47

Тряскин В.Н., Дехтярь И.В., Численная проверка
методики проектирования рамного бортового
набора надводного корабля на основе требований
правил классификационных обществ 58

K.G. Palnikov RS Director General address

M.S. Boyko Editor-in-Chief address

NEWSROOM

MARITIME SAFETY AND ENVIRONMENTAL PROTECTION

N.N. Zinenko, V.E. Panamarev Harmful
substances concentrations monitoring in ship
power plant exhaust gases

M.D. Emelyanov Semisubmersible mobile
offshore drilling units (MODU) damage RATE
and the ways to reduce it

V.V. Grishkin Oil filtering equipment
in compliance with international
requirements on oil pollution prevention

SEA TRANSPORT ECONOMICS AND MANAGEMENT

A.A. Shtrek, A.S. Buyanov Feasibility study
of Arctic containership optimal parameters
for transit navigation along the Northern Sea Route

O.A. Chernov Research vessels in the modern
maritime industry. Review

STRENGTH OF SHIPS AND FLOATING FACILITIES

*Ye.M. Appolonov, V.A. Korshunov, D.A. Ponomarev,
A.A. Rodionov* Development of computational
and experimental approaches to refinement
of local ice load

*A.I. Azovtsev, V.I. Evenko, V.A. Kulesh, M.A. Kuteynikov,
A.S. Ogai, V.A. Petrov,* Proposal for rule
requirements development for ships operating
in contact with ground

V.N. Tryaskin, I.V. Dekhtyar Numerical verification
of design methodology based on the classification
societies requirements in application to web frames
of naval ships

МОРЕХОДНЫЕ КАЧЕСТВА СУДОВ

Кутейников М.А., Одегов В.С. Приборы контроля устойчивости. Современные требования. 64

Немзер А.И., Юрканий А.В., Кутейников М.А., Захаров М.Е. Разработка программного обеспечения для определения максимальной удерживающей силы и угла крена эскортных буксиров в соответствии с требованиями Правил РС. 70

Семенова В.Ю., Киав Тхура. Определение нелинейных сил второго порядка, обусловленных разностью частот и возникающих при поперечной качке шпангоутных контуров на тихой воде 75

Живица С.Г. Прогноз параметров качки аварийного морского объекта при борьбе за его живучесть в штормовых условиях 82

МАТЕРИАЛЫ И СВАРКА

Башаев В.К., Павлова В.И., Осokin Е.П., Зыков С.А., Дриц А.М. Деформируемые алюминий-магнелиевые сплавы и сварные соединения для конструкций систем хранения груза газозовов 91

Третьякова Т.В. Разработка и внедрение комплексной программы по применению высокоэффективных неметаллических изоляционных и отделочных материалов на строящихся заказах в АО «ПО «Севмаш» 100

МЕХАНИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ДВИЖИТЕЛИ

Хабаров А.А. Создание судовых подшипников нового поколения 105

Павловский В.А., Власев М.В. Оценка повышения давления паров при хранении СПГ в судовом криогенном резервуаре. 110

ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ И РАДИОНАВИГАЦИОННОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Щукин А.Ю., Забировин П.Б. Некоторые аспекты компьютерного моделирования механических испытаний вращающихся электрических машин. . 114

Приходько В.М., Приходько И.В. Математическое обеспечение для оптимальной сушки изоляции электрооборудования судов по энергосберегающей технологии 121

Максимова М.А., Рогов С.С. Мониторинг технического состояния судового энергетического оборудования 125

Фисай В.Г., Иванов Б.Г. Обоснование внедрения системы информационной поддержки для обеспечения живучести кораблей и судов. . 130

Фисай В.Г., Иванов Б.Г. Особенности применения системы сигнализации уровня жидких грузов и аварийных масс воды для кораблей и судов. . 134

Правила предоставления статей 138

SEAWORTHINESS

M.A. Kuteynikov, V.S. Odegov Stability control instruments. Up-to-date requirements

A.I. Nemzer, A.V. Yurkanskiy, M.A. Kuteynikov, M.E. Zaharov Software development to determine maximum holding force and heel angle of escort tugs with regard to RS rules

V.Y. Semyonova, Kiav Tkhura The determination of nonlinear second-order forces due to frequency difference and occurring during the transverse motions of the contours in calm water

S.G. Zhivitsa Forecast of rolling and pitching parameters of emergency offshore facility during damage control in storm conditions

MATERIALS AND WELDING

V.K. Bashaev, B.I. Pavlova, E.P. Osokin, S.A. Zykov, A.M. Drits Deformed aluminum-magnesium alloys and welds for cargo containment system structures of gas carriers

T.V. Tretyakova Development and implementation of package program on the application of high performance non-metallic insulation and finishing materials at JSCO "PO "Sevmash" orders under construction

MACHINERY INSTALLATIONS AND PROPULSION

A.A. Khabarov Development of next generation marine bearings

V.A. Pavlovsky, M.V. Vlasiev Evaluation of vapour pressure increase in storage of LNG cryogenic ship tank

ELECTRICAL AND RADIO NAVIGATIONAL EQUIPMENT

A.Y. Shchukin, P.B. Zabiokhin Some aspects of mechanical tests computer simulation of rotating electrical machines

V.M. Prikhodko, I.V. Prikhodko Mathematical basis for effective ships electrical insulation drying subject to energy saving solutions

M.A. Maksimova, S.S. Rogov Monitoring of technical condition of the ship's power equipment

V.G. Fisai, B.G. Ivanov Feasibility of the information support system implementation for damage control of ships and vessels

V.G. Fisai, B.G. Ivanov Application features of liquid cargo and emergency waters alarm system for ships and vessels

ОБОЗРЕНИЕ

ОБЗОР СОСТОЯНИЯ МОРСКОГО ФЛОТА

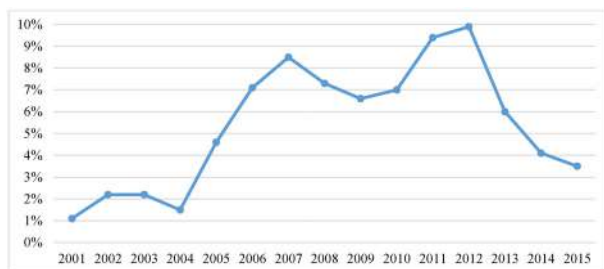
Настоящий раздел подготовлен на основе отчета UNCTAD "Review of Maritime Transport 2015".

Мировая экономика

Мировая экономика в 2015 г. отметила рост в 2,5 %, сохранив примерно тот же темп, что и в 2014 г. Но если развитие экономики демонстрируют постепенное ускорение роста (в 2014 г. – 1,6 %, в 2015 г. – около 1,9 %), то рост экономики развивающихся стран замедляется: за 2015 г. он составил 4,1 % против 4,5 % за 2014 г. и 4,8 % за 2013 г. При этом, по данным Международного валютного фонда, вклад развитых стран в развитие мировой экономики составляет около 75 %. Объемы мировой торговли в этих условиях продемонстрировали соизмеримый рост в 2,3 %, что, впрочем, означает его замедление по сравнению с 2,6 % годом ранее.

Мировой флот

Тенденция к замедлению роста мирового флота продолжается, и в течение 2014 г. совокупный тоннаж мирового флота увеличился лишь на 3,5 %. На начало 2015 г. мировой флот насчитывал 89464 судна общей валовой вместимостью 1,75 млрд т (под «судами» понимаются самоходные морские суда валовой вместимостью более 100, исключая суда внутреннего плавания, рыболовные, военные суда, яхты, стационарные и мобильные морские платформы, баржи). По сравнению с предыдущей декадой, скорость роста мирового флота впервые замедлилась так значительно.



Динамика изменения суммарного тоннажа мирового флота (в процентах по сравнению с предыдущим годом)

Продолжились значительные изменения в составе мирового флота в отношении типов судов: доля танкеров в нем снижается примерно с такой же скоростью, что и растет доля навалочных судов. Кроме того, довольно быстро уменьшается доля судов для перевозки генеральных грузов.

Структура мирового флота по основным типам судов, 2014–2015 гг.

(данные на начало года: дедвейт, тыс. т; доля рынка, %)

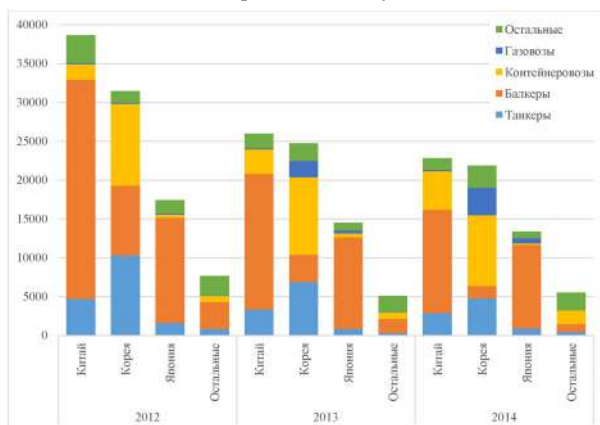
Тип судна	2014 г.	2015 г.	Изменение, %, 2014/2013
Танкеры	482017, 28,5 %	489388, 28,0 %	1,4 %
Навалочные суда	726319, 42,9 %	760468, 43,5 %	4,4 %
Суда для перевозки генеральных грузов	77552, 4,6 %	76731, 4,4 %	-1,0 %
Контейнеровозы	216345, 12,8 %	227741, 13,0 %	5,5 %
Другие типы:	189395, 11,2 %	194896, 11,1 %	5,2 %
- газовозы	46427, 2,7 %	49675, 2,8 %	7,2 %
- химовозы	42009, 2,5 %	42181, 2,4 %	1,2 %
- суда снабжения морских платформ	71924, 4,3 %	74174, 4,2 %	6,7 %
- паромы и пассажирские суда	5601, 0,3 %	5797, 0,3 %	4,8 %
Другие суда	23434, 1,4 %	23066, 1,3 %	3,7 %
Итого, мировой флот:	1691628, 100 %	1749222, 100 %	3,5 %

Регистрация мирового флота

В отношении флагов регистрации судов следует отметить ряд интересных фактов:

- пять крупнейших флагов остались неизменными (Панама, Либерия, Маршалловы острова, Гонконг, Сингапур), совокупный тоннаж судов под этими флагами составляет 57 % от мирового;
- весьма значительный рост продемонстрировал флот под флагом Маршалловых островов: если в 2014 г. он составлял 152,3 млн т, то в 2015 г. – уже 175,3 млн т (рост на 13,3 %);
- флот под флагом Гонконга вырос на 6,5 % (150,8 млн т), под флагом Сингапура – на 8,5 % (115,0 млн т);
- существенный рост совершил флот под флагом Мальты: увеличившись с 72,9 млн т в 2014 г. до 82,0 млн т в 2015 г., флаг Мальты занял 6-е место в списке крупнейших флагов регистрации судов.

Постройка новых судов



Тоннаж судов, построенных в основных судостроительных странах в 2012–2014 гг.

Всего в течение 2014 г. было построено судов с общей валовой вместимостью 64 млн т. Более 91 % из них построено в трех странах, которые являются признанными мировыми лидерами в области судостроения: это Китай (35,9 %), Корея (34,4 %) и Япония (21,0 %). В Китае в основном осуществлялось строительство навалочных судов и контейнеровозов, в Корею – контейнеровозов, танкеров и газовозов, в то время как подавляющее большинство судов, построенных в Японии, – навалочные суда.

ДАЙДЖЕСТ НОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

**Statoil инвестирует 152 млн GBP
в строительство первой в мире плавучей ветровой
электростанции**

Норвежская энергетическая компания разместит 30 МВт ветровую турбинную электростанцию на плавучих установках в области *Bucha Deep* в 25 км от Питерхеда (Абердиншир, Шотландия). Электростанция, которую планируют ввести в эксплуатацию ориентировочно в конце 2017 г., сможет удовлетворять потребность в энергообеспечении 20000 домашних хозяйств.

Сама цель создания *Huwind Pilot Park* – продемонстрировать возможности использования промышленных плавучих ветровых электростанций. Площадь *Huwind Pilot Park* займет около 4 км² в Северном море, где средняя скорость ветра достигает 10 м/с (36 км/ч) в районах глубиной 95 – 120 м. Большинство существующих британских ветровых электростанций располагаются на мелководье глубиной 25 – 50 м.

Создаваемая станция – это уникальная офшорная ветровая установка, разработанная *Statoil*. Проект был одобрен спустя 6 лет эксплуатации прототипа, установленного на острове *Karmøy*, Норвегия. Плавучие турбины – это новая технология по сравнению с традиционным способом крепления турбин на бетонные опоры, установленные на морском дне. Эта технология имеет множество преимуществ, включая более низкую стоимость установки, возможность применения на глубоководье и возможность буксировки к месту эксплуатации и к берегу для технического обслуживания (*Marine Professional*. December/January 2016)

Применение 3D-принтеров в морской индустрии

Борьба с отказами техники на борту – это каждодневная задача для команды судна. Компанией *Maersk* было принято решение усовершенствовать систему поставок запчастей для судов путем применения 3D-принтеров. Было решено установить 3D-принтер на берегу, что способствует сокращению времени доставки запасных частей.

3D-принтеры используют лазерные лучи для расплавки сырья, создавая таким образом последовательно слои детали. В последние годы эта технология развивалась, позволяя создавать как пластиковые, так и металлические детали, что вызвало широкий интерес крупнейших мировых компаний, которые стали использовать 3D-печать для ускорения процесса производства и создания сложных легковесных частей.

Еще не известно, насколько широко технология может использоваться на борту, но однозначно 3D-печать сильно повлияет на стоимость поставок запчастей. Стоимость доставки одной детали на борт может достигать 5000 USD. 3D-печать исключит расходы на хранения на складе и упаковку, воздушные грузоперевозки до порта и фрахтование судна для доставки запчасти на борт.

Однако остается открытым вопрос по материалам, используемым для 3D-печати. Очевидно, что около 90 % деталей механизмов изготовлены из металла. Сегодня принтеры, способные изготавливать запчасти из металла, стоят порядка 1 млн USD, а установки, работающие с пластиком – 25000 USD.

Безусловно, остается еще множество вопросов касательно применения 3D-печати в массовом производстве и стоимости материалов, но однозначно данная технология в процессе своего развития сможет существенно усовершенствовать процесс изготовления деталей. (*The Motorship*. Vol. 97, issue 1134, February 2016).

Почта редакции

Уважаемые читатели!

В адрес Регистра поступило письмо от ФГУП «Крыловский государственный научный центр» с сообщением о том, что в статье «Разработка концептуального проекта нефтеналивного танкера с ограниченной осадкой и энергосберегающей каверной для круглогодичного вывоза нефти из портов Балтийского моря», опубликованной в журнале «Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства» № 40/41 (декабрь 2015 г.), пропущено по вине авторов статьи указание на соавторство в ее подготовке Буянова Александра Сергеевича. Соавторы статьи приносят А.С. Буянову искренние извинения за непреднамеренную неточность при оформлении состава соавторов и считают нужным отметить, что раздел 4 «Экономическая оценка эффективности применения устройства для создания единой воздушной каверны на днище судна» названной статьи полностью разработан А.С. Буяновым.

*Материалы подготовлены М.В. Батраковой,
К.А. Добржинским, О.А. Черновым.*



БЕЗОПАСНОСТЬ МОРЕПЛАВАНИЯ И ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

УДК 621.43.06

ОПЫТ МОНИТОРИНГА ВЫБРОСОВ ВРЕДНЫХ ВЕЩЕСТВ С ОТРАБОТАВШИМИ ГАЗАМИ СУДОВЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Н.Н. Зиненко, канд. техн. наук, доц., ФГБОУ ВО «Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова», Новороссийск; ПАО «Совкомфлот», Санкт-Петербург, e-mail: N.Zinenko@scf-group.com
В.Е. Панамарев, канд. техн. наук, ПАО «Совкомфлот», e-mail: V.Panamarev@scf-group.com

Проводится анализ систем мониторинга концентрации вредных веществ в отработавших газах современных судовых дизельных двигателей и котельных установок. Описана методика, применяемая в ПАО «Совкомфлот» для замера и контроля концентрации CO_2 , SO_x и NO_x в отработавших газах судовой энергетической установки в эксплуатации.

Ключевые слова: отработавшие газы, расход топлива, CO_2 , SO_x , NO_x , средневзвешенные выбросы.

HARMFUL SUBSTANCES CONCENTRATIONS MONITORING IN SHIP POWER PLANT EXHAUST GASES

N.N. Zinenko, PhD, associate professor, FSEI "Admiral Ushakov Maritime University", Novorossiysk, SCF Group, St. Petersburg, e-mail: N.Zinenko@scf-group.com
V.E. Panamarev, PhD, SCF Group, e-mail: V.Panamarev@scf-group.com

This article analyses the monitoring systems of concentrations of harmful substances in exhaust gases of modern marine diesel engines and boilers. It describes the methods used in PAO «SOVCOMFLOT» to measure and monitor the concentration of CO_2 , SO_x and NO_x in the exhaust gases of the ship power plant in operation.

Keywords: exhaust gases, fuel flow, CO_2 , SO_x , NO_x , net-weighted emissions (concentrations).

Н ачиная с середины прошлого века вопросы качества атмосферного воздуха стали привлекать все большее внимание мирового сообщества. В последние десятилетия задачи обеспечения охраны окружающей среды перешли в разряд первоочередных. Следует отметить, что необходимость сохранения окружающей среды, запрет на нанесение ей ущерба устанавливает Конституция Российской

Федерации. Охрана атмосферного воздуха от вредного воздействия различных факторов регламентируется Федеральным законом от 4 мая 1999 года № 96-ФЗ «Об охране атмосферного воздуха» [1, 2].

Весомую роль в загрязнении воздушного бассейна транспортным флотом играют выбросы вредных веществ с отработавшими газами (ОГ) главных, вспомогательных двигателей и

котельных установок судов, в связи с чем становятся актуальными вопросы сбора и анализа информации по качественному и количественному составу выбросов ОГ, а также разработки способов их снижения.

На рис. 1 представлен суточный расход топлива на главный двигатель (ГД), вспомогательные двигатели — дизель-генераторы (ДГ) и котельную установку (КУ) танкера размера AFRAMAX.

Как видно из рисунка, расход топлива на КУ сопоставим, а в ряде случаев может превышать суточный расход на ГД и ДГ. Выбросы с ГД, в основном, происходят за пределами акватории порта, а в порту главными источниками загрязнения с судов являются ДГ и КУ. В случае, если судовая грузовая система танкера оснащена насосами с паровыми турбоприводами, суточное потребление топлива на котельную установку может достигать до 91 т и превысить суточный расход топлива на ГД и КУ при их работе на номинальных нагрузках. Кроме продуктов сгорания топлива, в ОГ присутствуют продукты сгорания топливных присадок. При этом, примерно 80 – 95 % от общей массы токсичных компонентов ОГ приходится на долю пяти основных компонентов: оксида азота NO_x , оксида углерода CO , углеводородов C_xH_y , альдегидов RCHO , диоксида серы SO_2 .

Такие химические вещества, как NO_x , CO , SO_x и другие, попадая в атмосферу, нарушают ее естественный экологический баланс за счет образования слабых кислот.

Доля NO_x и SO_x в ОГ составляет более 80 % от объема всех вредных выбросов, поэтому задача снижения эмиссии этих компонентов составляет стержень проблемы создания «экологически чистых» судов.

Содержание окислов серы в ОГ обусловлено наличием серы в топливе. Сера также содержится в сырой нефти, однако ее содержание не превышает 1 %. При перегонке нефти большая часть серы переходит в мазут – самую тяжелую фракцию перегонки. В нем

может содержаться от 0,5 до 5,0 % серы, хотя посредством дополнительных процедур перегонки содержание серы в мазуте можно еще уменьшить. При сжигании угля или нефти сера, содержащаяся в них, окисляется. Далее, реагируя с водой, она образует серную кислоту.

При сгорании серы S и ее соединений, содержащихся в топливе, кроме твердых частиц образуются неорганические газы – диоксид серы (сернистый ангидрид) SO_2 и триоксид серы (серный ангидрид) SO_3 . В отработавших газах на долю диоксида серы приходится 97 – 98 % от общего содержания оксидов серы, а на долю триоксида – 2 – 3 %. Диоксид серы сохраняется в атмосфере от нескольких часов до нескольких дней, а затем окисляется до высшего оксида (триоксида) SO_3 .

Помимо загрязнителей выбрасывается и диоксид углерода CO_2 – более трех тонн при сжигании одной тонны топлива. Суммарные выбросы морского транспорта составляют более 3 % от всех мировых выбросов CO_2 . Загрязнители и диоксид углерода оказывают противоположное воздействие на климат: загрязнители способствуют похолоданию, диоксид углерода – потеплению. Но воздействие каждого из этих веществ не компенсирует негативное влияние другого. Вместе они являются одним из значимых факторов загрязнения атмосферы. Экологические же характеристики определяются, главным образом, содержанием в отработавших газах оксидов азота NO_x в приведении к диоксиду азота NO_2 , которые по индексу токсичности превосходят другие вредные компоненты ОГ.

При проведении энергетических аудитов судов была определена зависимость удельных выбросов SO_x от частоты вращения, мощности и замеренного удельного расхода топлива судовых малооборотных двигателей моделей 6S50/60MC, при этом прослеживается прямая зависимость содержания SO_x в ОГ от содержания серы в топливе (см. рис. 2).

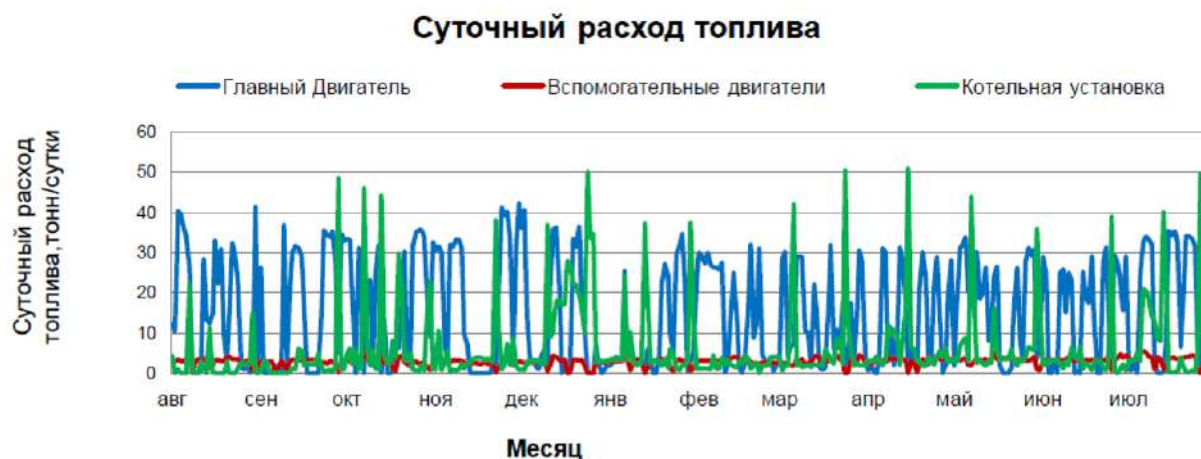


Рис. 1 Суточный расход топлива танкера размера AFRAMAX

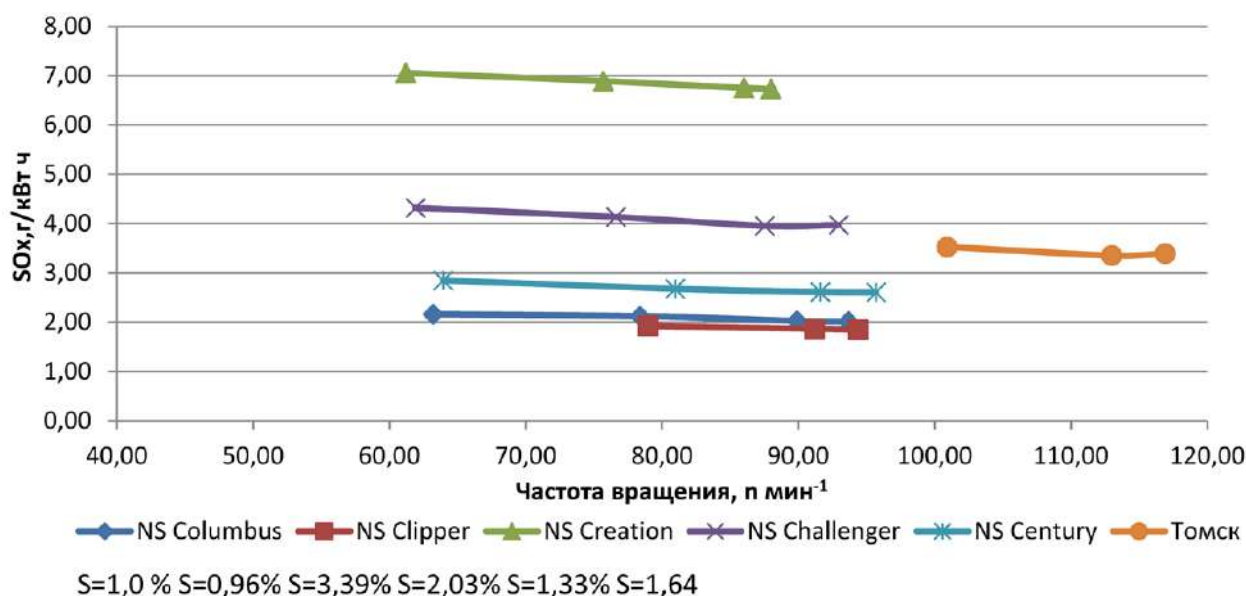


Рис. 2 Зависимость удельных выбросов SO_x от частоты вращения двигателей MAN D&T 6S50/60MC

Выбросы оксидов азота с ОГ судовых дизелей в нашей стране регламентируются ГОСТ Р 51249-99 «Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Выбросы вредных веществ с отработавшими газами. Нормы и методы определения» [3], отвечающим в части, касающейся выбросов азота, требованиям правила 13 главы III Приложения VI «Правила предотвращения загрязнения воздушной среды с судов» к Международной конвенции по предотвращению загрязнения с судов 1973 г., измененной Протоколом 1978 г. к ней (MARPOL 73/78), вступившего в силу с 1 июля 2010 г. [4]. Помимо этого, с 1 января 2011 г. Международной морской организацией (ИМО) принято дальнейшее ужесточение действующих норм выбросов оксидов азота на 20 % (уровень Tier II), а с 1 января 2016 г. запланировано ужесточение норм в зонах контроля эмиссии оксида азота (NO_x Emission Control Area - NECA) на 80 % (уровень Tier III). Ограничения по выбросам с КУ не регламентируются действующими в настоящее время международными конвенциями. В российском законодательстве действует ГОСТ Р 50831-95 «Установки котельные. Тепломеханическое оборудование. Общие технические требования» [5], но судовые котельные установки к данному стандарту также отнести нельзя, так как он распространяется на тепломеханическое оборудование с его технологическими связями, входящее в состав установок котельных энергетических блоков мощностью от 80 до 1200 МВт и производительностью от 160 до 3950 т/ч.

Все вышеприведенные требования регламентируют предельно допустимые выбросы с главных

и вспомогательных двигателей при стендовых испытаниях, с приведением к определенным условиям и при работе на условном топливе. В действительности, количество и состав ОГ судовых двигателей и судовых котельных установок в процессе эксплуатации может сильно отличаться от стендовых испытаний. Исходя из вышеизложенного, возникла необходимость контроля состава ОГ судовых ДВС и КУ при различных режимах их эксплуатации.

Существует несколько способов контроля состава ОГ, но наиболее приемлемыми способами для использования на судах морского флота являются:

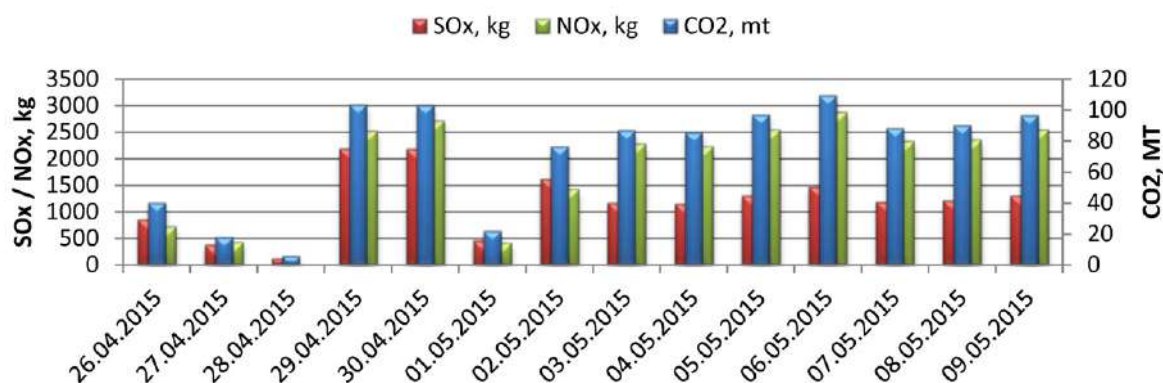
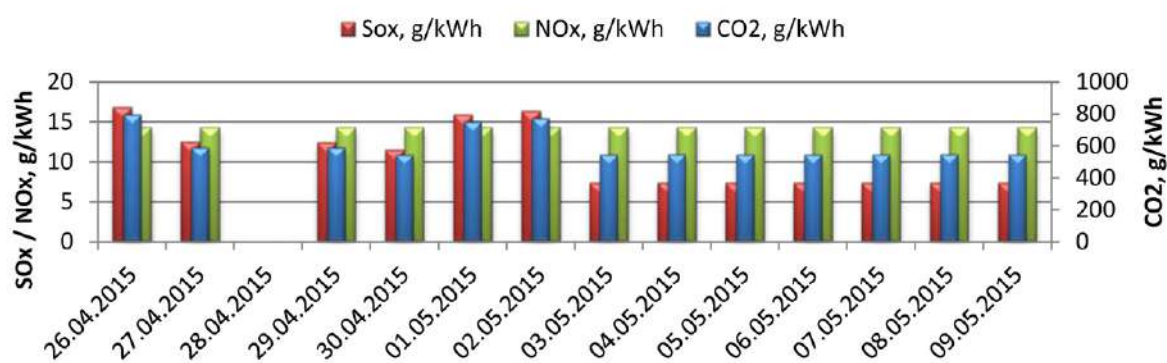
- определение по косвенным показателям (по расходу топлива);
- непосредственное измерение (наиболее точный способ) при проведении энергетического аудита судна.

Состав ОГ судов ПАО «Совкомфлот» рассчитывается программой AMOS BS - DDR Module по расходу топлива на основании судовых отчетов "Engineering Report" и контролируется оператором судна. Программа генерирует Отчет по выбросам вредных веществ с ОГ судовых дизельных и котельных установок судна/группы судов за любой промежуток времени. На рис. 3, 4 и 5 представлены, как образцы, отчеты по ГД танкера, сгенерированные программой по запросу оператора.

Определение состава ОГ непосредственным измерением производится при проведении энергетического аудита судна.

Vessel Name:		SCF Plymouth																		
AMOS Code:		246																		
Main Engine																				
Total for period from:		01/01/2015		to:		30/06/2015		CO2: 10578 MT				SOx: 187.0 MT				NOx: 271.1 MT				
Date	Steaming Time, h	Distance, Nm	ME Power, kW	HSFO		LSFO		HSMDO		LSMGO		Emission Mass			Emission Specific by Hour			Emission Specific by Power		
				Sulphur content, (HSFO) %	Consumption (HSFO), mt	Sulphur content (LSFO) %	Consumption (LSFO), mt	Sulphur content (HSMDO) %	Consumption (HSMDO), mt	Sulphur content (LSMGO) %	Consumption (LSMGO), mt	CO2, mt	SOx, kg	NOx, kg	CO2, mt/h	SOx, kg/h	NOx, kg/h	CO2, g/kWh	SOx, g/kWh	NOx, g/kWh
01/01/2015 00:00:00	24	300	6800	2.40	29.1							90.6	1396.8	2343.6	3.776	58.20	97.65	555.33	8.56	14.36
02/01/2015 00:00:00	24			2.40	7.6							23.7	364.8		0.986	15.20				
03/01/2015 00:00:00	24	206	7000	2.40	21.2							66.0	1017.6	2412.5	2.751	42.40	100.52	393.01	6.06	14.36
04/01/2015 00:00:00	24	237	6800	2.40	29.1							90.6	1396.8	2343.6	3.776	58.20	97.65	555.33	8.56	14.36
05/01/2015 00:00:00	24	265	7350	2.40	31.4							97.8	1507.2	2533.1	4.075	62.80	105.55	554.38	8.54	14.36
06/01/2015 00:00:00	24	300	6800	2.40	29.1							90.6	1396.8	2343.6	3.776	58.20	97.65	555.33	8.56	14.36
07/01/2015 00:00:00	24	300	6830	2.40	29.1							90.6	1396.8	2353.9	3.776	58.20	98.08	552.89	8.52	14.36
08/01/2015 00:00:00	24	233	6850	2.40	29.1							90.6	1396.8	2360.8	3.776	58.20	98.37	551.27	8.50	14.36
09/01/2015 00:00:00	12	116	6400	2.40	13.7							42.7	657.6	1102.8	3.556	54.80	91.90	555.56	8.56	14.36

Рис. 3 Ежедневные отчеты по выбросам ГД

Рис. 4 Массовые выбросы CO₂, SO_x, NO_x с ОГ ДГРис. 5 Удельные выбросы CO₂, SO_x, NO_x с ОГ ДГ

Для упрощения процесса измерения состава ОГ используются газоанализаторы, не требующие дополнительной проверки калибровочными газами, так как калибровочные газы относятся к категории «опасные грузы», и доставка их на суда требует дополнительных расходов, а в некоторых случаях просто невозможна. В компании такими газоанализаторами являются Testo 350 и Testo 340, которые сертифицированы и внесены в Государственный реестр

средств измерений РФ. Схема устройства газоанализатора приведена на рис. 6.

Места отбора проб ОГ регламентированы и оборудованы стандартным фланцем [4]. Данные газоанализаторы имеют возможность передачи данных в реальном режиме времени через Bluetooth®2.0 или кабель непосредственно на ноутбук/ПК для хранения и дальнейшего анализа с интервалом измерений от 1 с.

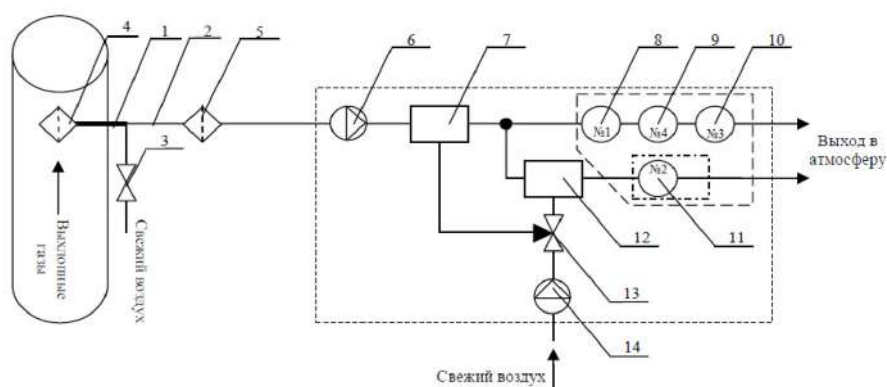


Рис. 6 Схема устройства газоанализатора:

- 1 – проботборный зонд; 2 – линия отбора проб; 3 – клапан отбора воздуха; 4 – предварительный фильтр; 5 – фильтр;
 6 – насос подачи выхлопных газов переменной производительности; 7 – камера смешивания (возможно 2-кратное разбавление);
 8 – сенсор № 1 установлен на O_2 ; 9 – сенсор № 4 установлен на NO_2 (возможна установка на CO , CO_{low} , SO_2 , NO_2);
 10 – сенсор № 3 установлен на NO (возможна установка на NO , NO_{low} , NO_2); 11 – сенсор № 2 установлен на SO_2 (возможна установка на CO , CO_{low} , NO , NO_{low} , SO_2); 12 – камера смешивания (возможно 5-кратное разбавление); 13 – 3/2 ходовой клапан;
 14 – насос свежего воздуха.

При проведении судовых энергетических аудитов проводятся экспериментальные замеры выбросов вредных веществ с ОГ судовой энергетической установки, ДГ и КУ. Замеры производятся в реальном режиме времени с интервалом записи 10 с, при снижении мощности главного двигателя согласно ГОСТ Р 51249-99 [3] и Руководству по освидетельствованию судовых дизелей в соответствии с Техническим кодексом по контролю за выбросами окислов азота из судовых дизелей [6].

На рис. 7, как пример, приведены результаты

измерения выбросов главного двигателя танкера размера AFRAMAX при снижении его нагрузки.

На всех режимах работы ГД производятся замеры параметров, согласно испытательному циклу, применяемому к главным и вспомогательным двигателям, работающим по винтовой характеристике (испытательный цикл Е3), в соответствии с Техническим кодексом по контролю за выбросами окислов азота из судовых дизельных двигателей (далее – Технический кодекс по NO_x). Для расчета средневзвешенных удельных выбросов используется формула

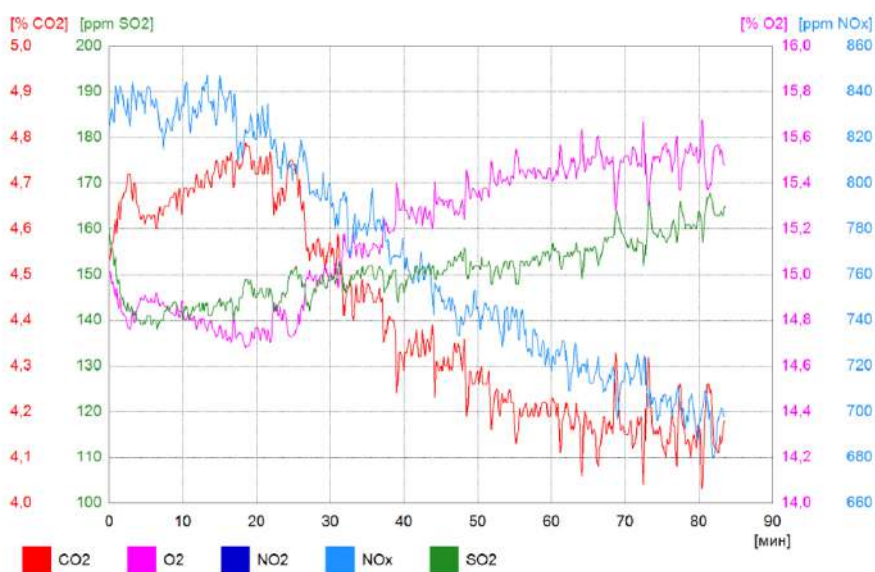


Рис. 7 Результат измерения выбросов ГД при снижении нагрузки

$$IMO_NO_x = \frac{\sum_{i=1}^{i=4} \text{Удельный_выброс_}NO_{x_i} \times \text{Мощность}_i \times \text{Весовой_коэффициент}_i}{\sum_{i=1}^{i=4} \text{Мощность}_i \times \text{Весовой_коэффициент}_i}$$

и методики, описанные в [3, 4, 6] и Техническом кодексе по NO_x.

Весовой коэффициент распределяется согласно Техническому кодексу по NO_x и испытательному циклу для главных и вспомогательных двигателей, работающих по винтовой характеристике, и представлен в табл. 1.

Таблица 1
Результаты расчета выбросов NO_x в эксплуатации

Весовой коэффициент	Удельный выброс NO _x , g/kWh	Мощность ГД, % MCR	IMO NO _x Испытательный цикл Е3, g/kWh
0,2	10,97	85 %	12,99946
0,5	11,10	75 %	
0,15	10,81	50 %	
0,15	15,74	17 %	

В результате проведенных экспериментальных замеров было установлено, что средневзвешенные выбросы отдельных дизелей в процессе эксплуатации (см. табл. 1) превышают средневзвешенные выбросы, полученные при стендовых испытаниях (табл. 2) [7], что подтвердило необходимость проведения инструментальных замеров на судах во время проведения энергетического аудита для контроля состава ОГ двигателей внутреннего сгорания в процессе эксплуатации в широком диапазоне изменения нагрузок.

Таблица 2
Результаты расчета выбросов NO_x согласно [7]

Весовой коэффициент	Удельный выброс NO _x , g/kWh	Мощность ГД, % MCR	IMO NO _x Испытательный цикл Е3, g/kWh
0,2	8,98	100 %	10,04
0,5	10,64	75 %	
0,15	9,25	50 %	
0,15	11,31	25 %	

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Конституция Российской Федерации. Официальное издание. Администрация Президента Российской Федерации. – М.: Юридическая литература, 2009. – 64 с.
2. Федеральный закон от 4 мая 1999 года № 96-ФЗ «Об охране атмосферного воздуха» // Российская газ. – 1999. – 13 мая.
3. ГОСТ Р 51249-99. Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Выбросы вредных веществ с отработавшими газами. Нормы и методы определения. – М.: Госстандарт России, 2005. – 17 с.
4. Международная конвенция по предотвращению загрязнения с судов 1973 г., измененная протоколом 1978 г. к ней (МАРПОЛ 73/78). – СПб, ЗАО «ЦНИИМФ». – 2008. – 760 с.
5. ГОСТ Р 50831-95. Установки котельные. Тепломеханическое оборудование. Общие технические требования. – М.: Госстандарт России, 1996. – 23 с.
6. Руководство по освидетельствованию судовых дизелей в соответствии с Техническим кодексом по контролю выбросов окислов азота из судовых дизелей. – СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2007.
7. IMO Technical File, Hyundai-MAN B&W 6S60MC Mk6, Certified as 'Member engine', Identification/approval number Hyundai-MAN B&W 6S60MC-2004-01-AA2175/, issued at Hyundai Heavy Industries Co., LTD., Ulsan, Korea, 2005, p. 15–32.

УДК 553.981.2:553.982.2:622.06

ПОВРЕЖДАЕМОСТЬ ПОЛУПОГРУЖНЫХ БУРОВЫХ УСТАНОВОК И ПУТИ ЕЕ СНИЖЕНИЯ

М.Д. Емельянов, канд. техн. наук, АО «Центральный научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт морского флота», Санкт-Петербург, e-mail: emelyanov@cniimf.ru

Приведены результаты обработки данных по аварийности полупогружных буровых установок (ППБУ) на морском шельфе Великобритании за период 1980–2005 гг. Выполнен анализ причин появления повреждений. Показана возможность снижения повреждаемости ППБУ в эксплуатационных условиях за счет своевременного изменения режима работы с целью не допустить обрыв якорной линии и выбора оптимальной осадки, предотвращающей заливание верхней палубы ППБУ.

Ключевые слова: полупогружная буровая установка, повреждаемость, обрыв якорной линии, заливание верхней палубы.

SEMISUBMERSIBLE MOBILE OFFSHORE DRILLING UNITS (MODU) DAMAGE RATE AND THE WAYS TO REDUCE IT

M.D. Emelyanov, PhD, "Central Scientific Research Institute of Marine Fleet", JSC, St. Petersburg, e-mail: emelyanov@cniimf.ru

This article shows the data processing results on the accidents of semisubmersible mobile offshore drilling units (MODU) offshore the United Kingdom for the period 1980–2005. The analysis of the causes of damage has been carried out. The possibility of reducing the risk of damage of semisubmersible MODU under service conditions by timely changing the operational mode in order to prevent breakage of the anchor line and selection of optimum draught preventing flooding of the upper deck of the semisubmersible MODU.

Keywords: semisubmersible mobile offshore drilling unit (semisubmersible MODU), damage rate, breakage of anchor line, flooding of the upper deck.

1. ВИДЫ ПОВРЕЖДЕНИЙ МОРСКИХ БУРОВЫХ УСТАНОВОК

Воздействие экстремальных погодных условий на морские буровые установки вызывает появление в них повреждений. Результаты обработки данных по аварийности буровых установок на морском шельфе Великобритании за период 1980 – 2005 гг. [1, 2], представленные в таблице, свидетельствуют о том, что полупогружные буровые установки (ППБУ) имеют наибольшую частоту повреждений по сравнению с самоподъемными установками и морскими стационарными платформами.

Повреждаемость плавучих установок и стационарных платформ

Тип установки	Частота f , (установка · год) ⁻¹	Тяжесть последствий S , баллы	Условный риск $\hat{R}_i$
Полупогружные буровые установки	0,219	2,41	0,0894
Самоподъемные буровые установки	0,053	2,63	0,0358
Морские стационарные платформы	0,004	2,78	0,0042

Подробно описание тяжести последствий повреждений и условного риска приведено в [3].

Конструкция ППБУ состоит из верхнего корпуса (платформы), стабилизирующих колонн и нижних понтонов (см. рис. 1). На рабочей (верхней) палубе платформы располагается верхнее строение, представляющее собой двух- или трехъярусную надстройку для размещения экипажа, а также энергетические и технологические блоки, складские помещения, краны, буровое и другое оборудование.

Обработка данных [2] по аварийности ППБУ показывает, что основными повреждаемыми элементами являются следующие (см. рис. 2):

- якорные устройства (84,9 %);
- верхний корпус, включая оборудование и устройства, расположенные на палубе платформы (12,0 %);
- стабилизирующие колонны с нижними понтонами (3,1 %).

Подавляющее число аварийных случаев связано с отказом якорной системы пассивного позиционирования установки и якорного устройства плавучего одноточечного причала. При этом 55,3 % всех отказов якорных устройств заключалось в падении натяжения и разрыве якорной линии (цепи, троса) при эксплуатации установки в штормовых условиях. 31,8 %

разрывов якорной линии произошли во время постановки ППБУ на точку бурения или снятия с точки и могут быть отнесены к человеческим ошибкам при проведении якорных операций. Оставшиеся инциденты приходились на отказы оборудования брашпиля и неустановленные причины.



Рис. 1 Внешний вид ППБУ
(источник – <http://www.funlib.ru/cimg/2014/101608/2509864>)

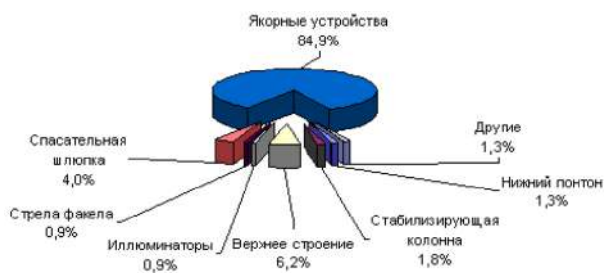


Рис. 2 Диаграмма распределения частоты повреждений по элементам конструкций ППБУ

Вторая группа повреждений вызвана заливанием палубы установки и охватывает конструкции и устройства, расположенные на платформе: верхнее строение, иллюминаторы, стрелу факела и спасательные шлюпки. Заливание, по-видимому, было вызвано увеличением осадки вследствие принятия избыточного балласта из-за опасения потери устойчивости установки в штормовых условиях.

К третьей группе повреждений относятся трещины в нижних понтонах и узлах соединения понтона со стабилизирующими колоннами, возникшие из-за общего изгиба установки на волнении.

2. ПУТИ СНИЖЕНИЯ ПОВРЕЖДАЕМОСТИ ППБУ В ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ УСЛОВИЯХ

При эксплуатации ППБУ наиболее действенными способами уменьшения повреждаемости являются своевременное снижение натяжения якорной линии во избежание ее обрыва и выбор оптимальной осадки, предотвращающей заливание верхней палубы платформы.

Снижение вероятности разрыва якорной линии

Эксплуатация ППБУ осуществляется в трех режимах: рабочем, штормового отстоя и «выживания».

В рабочем режиме якорные линии устанавливаются с предварительным натяжением, предотвращающем горизонтальные смещения ППБУ при воздействии порывов ветра и течения. При достижении скорости ветра предельно допустимой величины в рабочем режиме ППБУ должна быть переведена в режим штормового отстоя, при котором якорные линии ослабляют. При дальнейшем усилении ветра и достижении им предельно допустимой величины в режиме штормового отстоя ППБУ переводят в режим «выживания», при котором якорные линии еще более ослабляют и включают в работу подруливающие устройства с целью снижения нагрузки на якорные линии. То есть уменьшение вероятности разрыва якорной линии возможно при обоснованном переводе ППБУ с рабочего режима на режим штормового отстоя и с режима штормового отстоя на режим «выживания» при достижении скорости ветра соответствующих уровней предельно допустимых значений.

Вероятность обрыва якорной линии оценивается следующим образом.

Вероятность разрыва якорной линии $P_{\text{я}}$ определяется из условия того, что усилие в якорной линии F превысит ее разрывное усилие T , то есть

$$P_{\text{я}} = Pr[F \geq T]. \quad (1)$$

Эта вероятность не должна превышать допустимого значения $[P_{\text{я}}]$.

Распределение скорости ветра v в краткосрочных периодах времени хорошо согласуется с законом Вейбулла, интегральная функция которого равна

$$F_v(v) = 1 - \exp[-(v/a_v)^{1/\bar{n}}], \quad (2)$$

где a_v – параметр масштаба распределения скоростей ветра, определяемый по формуле

$$a_v = \bar{v} / \Gamma[(c+1)/c];$$

c – параметр формы, принимаемый в первом приближении равным 1,5;

$\bar{v}$ – среднее значение скорости ветра;

$\Gamma[\dots]$ – гамма-функция.

При этом распределение усилий в якорной линии от ветровой нагрузки будет также подчинено закону Вейбулла с параметром масштаба a_F , равным

$$a_F = Ka_v, \quad (3)$$

где K – коэффициент, равный отношению усилия в якорной линии от ветрового воздействия к величине скорости ветра.

Распределение прочности якорной линии соответствует нормальному закону с параметрами $\bar{T}$ и σ_T , где $\bar{T}$ – среднее значение (математическое ожидание) разрывного усилия, σ_T – стандартное отклонение. Значения $\bar{T}$ и σ_T определяются по заданному нормативному значению разрывного усилия T_n и известному коэффициенту вариации $v_T = \sigma_T / \bar{T}$. В первом приближении можно принять $T_n = \bar{T} - 2\sigma_T$ и $v_T = 0,1$.

Вероятность разрыва якорной линии будет соответствовать затененной площади под кривыми плотности вероятности $P_T(T)$ и $P_F(F)$, представленной на рис. 3.

Плотность вероятности распределения усилий и ее интегральная функция $F_j(F)$ соответственно равны:

$$p_F(F) = \frac{c}{a_F} \left(\frac{F-b}{a_F} \right)^{c-1} \exp \left[- \left(\frac{F-b}{a_F} \right)^c \right], \quad (4-1)$$

$$F_j(F) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{F-b}{a_F} \right)^c \right], \quad F > b, \quad (4-2)$$

где b – смещение по оси абсцисс относительно нуля.

В рабочем режиме кривая плотности вероятности распределения усилий $p_F(F)$ показана на рис. 3, а. Здесь смещение b в формулах (4) равно b_0 , где b_0 – предварительное натяжение якорной линии.

В режиме штормового отстоя ППБУ с комбинированной системой удержания возможны следующие варианты:

- подруливающее устройство отключено. Распределения усилий F подобно изображенному на рис. 3, а, на котором предварительное натяжение якорной линии $b_0 = b_1$, и смещение b в формуле (4-1) равно b_1 ;

- подруливающее устройство включено. Распределения усилий F является усеченным (см. рис. 3, б), и смещение b в формуле (4-1) равно $(b_1 - b_2)$, где b_2 – разгружающее усилие в якорной линии при работе подруливающих устройств. Плотность вероятностей усеченного распределения находится по формуле

$$p_{yc}(F) = \frac{p_F(F)}{1 - F_j(0)}, \quad F \geq 0, \quad (5)$$

где $p_F(F)$ – плотности вероятности распределения усилий по формуле (4-1);

$F_j(0)$ – интегральная функция по формуле (4-2) при $F = 0$ и $b = b_1 - b_2$.

Таким образом, измерив скорость ветра, можно рассчитать вероятность разрыва якорной линии и выбирать безопасный режим эксплуатации.

Снижение повреждаемости элементов конструкции и устройств на платформе

Снижение повреждаемости элементов конструкции и устройств, расположенных на платформе, достигается увеличением клиренса путем откачки части балласта во избежание ударов волн о конструкции платформы.

Вероятность заливания верхней (рабочей) палубы P_z определяется из закона Рэлея по формуле

$$P_z = \exp \left[- \frac{7,49 H^2}{h_{3\%}^2} \right] \leq [P_z], \quad (6)$$

где $h_{3\%}$ – высота волны 3% обеспеченности для данного волнового режима, м;

H – высота подъема конструкций верхнего корпуса над уровнем моря (тихая вода), м;

$[P_z]$ – допустимая вероятность заливания палубы платформы.

Однако уменьшение осадки приводит к подъему аппликаты центра тяжести установки, что неблагоприятно сказывается на ее остойчивости. Поэтому необходимо определить такую осадку, при которой в первом приближении выполняется условие

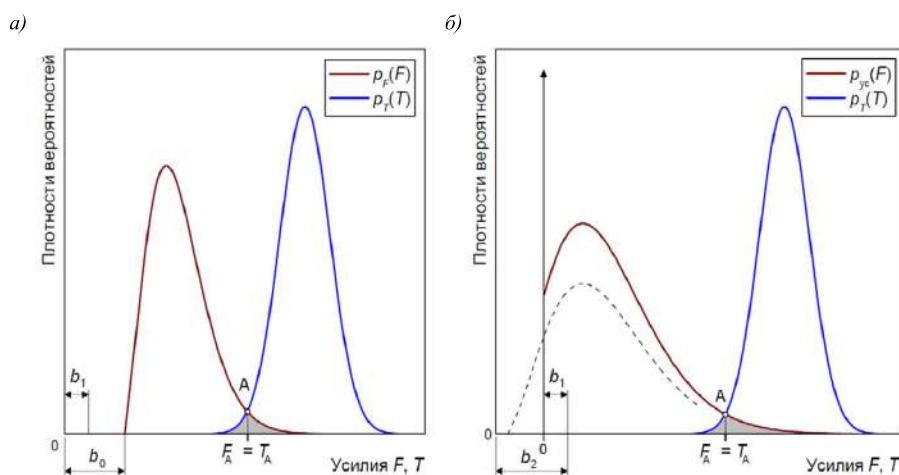


Рис. 3 Плотности вероятностей распределения усилий в якорных линиях:
 а – рабочий режим; b_0 – предварительное натяжение якорной линии;
 б – режим штормового отстоя; b_1 – натяжение якорной цепи из-за воздействия течения;
 b_2 – разгружающее усилие в якорной линии при работе подруливающих устройств

$$P_z \approx 10P_o,$$

где P_o – вероятность опрокидывания установки при заданной осадке на данном волновом режиме, которая равна вероятности того, что кренящий момент $M_{кр}$ превысит восстанавливающий момент $M_{в}$ с учетом влияния якорных линий.

При этом вероятность опрокидывания P_o не должна превышать допустимое значение $[P_o]$.

Допустимые значения вероятностей

При назначении допустимой обеспеченности нагрузок предполагается, что их наибольшее значение не будет превышено более чем один раз за рассматриваемый период времени.

Для волновых нагрузок в штормовых условиях обеспеченность Q можно принять равной 10^{-5} , если результатом их воздействия является разрушение конструкции или опрокидывание установки. При этом период волновых нагрузок считается близким к 10 с.

Если максимальная волновая нагрузка вызывает появление повреждения без потери функциональности объекта, то обеспеченность может быть снижена до $Q = 10^{-4}$. Для ветровых нагрузок период измерений составляет 10 мин. Поэтому обеспеченность ветровых нагрузок в штормовых условиях можно принять равной $Q = 6 \times 10^{-4}$.

Если принять, что вероятность наступления предельного состояния в случае воздействия максимально возможной нагрузки за рассматриваемый период равна $0,1 - 0,01$, то в итоге допустимые значения вероятностей разрушения, повреждения и опрокидывания будут следующими:

при разрыве якорной линии: $(0,6 - 0,06) \times 10^{-4}$;
при залипании палубы платформы:
 $(0,1 - 0,01) \times 10^{-4}$;
при опрокидывании установки:
 $(0,1 - 0,01) \times 10^{-5}$.

ВЫВОДЫ

ППБУ, используемые для разведочного бурения, при перемещении на новые точки оказываются в акваториях с разными гидрометеорологическими условиями. Оценка вероятности наступления предельного состояния позволяет для конкретных погодных условий обоснованно принять решение об изменении режима эксплуатации установки и тем самым снизить ее повреждаемость.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Accident statistics for fixed offshore units on the UK Continental Shelf 1980–2005. Det Norske Veritas/UK Health & Safety Executive. Research Report Series, Report No. R566, 2007.
2. Accident statistics for floating offshore units on the UK Continental Shelf 1980–2005. Det Norske Veritas/UK Health & Safety Executive, Research Report Series, Report No. R567, 2007.
3. Емельянов М.Д. Условный измеритель риска аварий для буровых судов, плавучих буровых установок и морских стационарных платформ // Нефть. Газ. Новации, 2014. – № 11. – С. 59–64.

ОБОЗРЕНИЕ: ДАЙДЖЕСТ НОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Wärtsilä запустила новый проект серии паромов для регулярных рейсов с «нулевыми выбросами»

Паромы будут эксплуатироваться либо исключительно на аккумуляторах, либо на гибридных электро-двигателях, работающих на LNG или биотопливе. Wärtsilä утверждает, что благодаря применению аккумуляторов потребление топлива снизится до 100 %, а выбросы будут полностью исключены. Применение гибридного двигателя позволит снизить количество выбросов до 50 %.

Кроме того, проект Wärtsilä предполагает наличие беспроводной индуктивной системы подзарядки, которая исключит кабельные соединения и позволит паромам начинать подзарядку незамедлительно после прибытия на причал. Также проект Wärtsilä

будет включать в себя азимутные движители и систему полного управления с капитанского мостика. (*Ship Efficiency Review. Issue 08.2016*)

Энергетическая установка MAN для нового кранового судна

Корпорация *MAN Diesel and Turbo* разработала энергетическую установку, работающую на двух типах топлива, для нового полупогружного кранового судна (NSCV).

Проект полностью модифицирован в соответствии с требованиями заказчика. Эта энергетическая установка для двух типов топлива является не просто крупнейшей когда-либо устанавливаемой на одном судне, но также удовлетворяющей требованиям Tier-III.

Полная мощность двигателей составит 96 МВт.

Двигатели будут готовы к поставке в первом квартале 2017 г., само судно планируется ввести в эксплуатацию в четвертом квартале 2018 г. NSCV станет одним из самых больших крановых судов в мире: его длина составит 220 м, а ширина 102 м. Несмотря на внушительные размеры, оптимальное расположения двигателей и системы SCR стало сложной задачей, которую корпорация MAN Diesel & Turbo успешно решила. На судне предусмотрено 4 машинных отделения, каждое с двигателем 3 x MAN 8L51/60DF.

Цель проекта – создать наиболее экологичное крановое судно, которое будет эксплуатироваться на топливе с низким содержанием серы. (*The Motorship. Vol. 97, issue 1134, February 2016*)

УДК 628.394

ПРИМЕНЕНИЕ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ФИЛЬТРАЦИИ НЕФТИ В СООТВЕТСТВИИ С МЕЖДУНАРОДНЫМИ ТРЕБОВАНИЯМИ ПО ПРЕДОТВРАЩЕНИЮ ЗАГРЯЗНЕНИЯ НЕФТЬЮ С СУДОВ

В.В. Гришкин, ФАУ «Российский морской регистр судоходства», Санкт-Петербург,
e-mail: grishkin.vv@rs-class.org

Приведены основные этапы формирования международных требований по предотвращению загрязнения нефтью с судов, основные требования Международной конвенции по предотвращению загрязнения моря с судов 1973 г., измененной в соответствии с Протоколом 1978 г. (МК МАРПОЛ 73/78), в части сброса нефтесодержащих вод в особых районах и применения фильтрующего оборудования. Обращено внимание на проблемы, с которыми могут сталкиваться судовладельцы при выполнении требований Приложения I к МК МАРПОЛ 73/78. Приведены рекомендации Российского морского регистра судоходства по установке на своих судах вне зависимости от района их эксплуатации полного комплекта одобренного фильтрующего оборудования. Также приведены последние результаты работы ИМО по разработке и принятию Международного кодекса для судов, эксплуатирующихся в полярных водах (Полярного кодекса), и описаны возможные последствия его применения в части эксплуатации судов и предотвращения загрязнения нефтью Арктических вод.

Ключевые слова: оборудование для фильтрации нефти, предотвращение загрязнения нефтью с судов.

OIL FILTERING EQUIPMENT IN COMPLIANCE WITH INTERNATIONAL REQUIREMENTS ON OIL POLLUTION PREVENTION

V.V. Grishkin, FAI "Russian Maritime Register of Shipping", St. Petersburg, e-mail: grishkin.vv@rs-class.org

The article deals with the milestones of designing the international requirements for the prevention of oil pollution from ships. Also the basic requirements of the International Convention for Prevention of Pollution from Ships, 1973, as amended by the 1978 Protocol thereto (MARPOL 73/78), as regards oily bilge water discharge within special areas and the use of filtering equipment is considered. Efforts have been made to focus the challenges that shipowners may face in meeting the requirements of Annex I to MARPOL 73/78. The recommendations of Russian Maritime Register of Shipping for installation of the complete set of the approved filtering equipment on ships, irrespective of the area of their operation are given. The article also specifies the latest results of the IMO activities on the development and adoption of the International Code for Ships Operating in Polar Waters (Polar Code), and describes the potential consequences of its application with regard to the operation of vessels and prevention of oil pollution in the Arctic.

Keywords: oil filtering equipment, oil pollution prevention from ships.

Проблема загрязнения моря нефтью возникла в первой половине XX столетия. Различными странами были введены собственные правила для контроля сброса нефти в пределах своих территориальных вод. В 1954 г. в Лондоне состоялась конференция по загрязнению нефтью, которая закончилась принятием Международного соглашения по предотвращению загрязнения моря нефтью (OILPOL). Это соглашение прежде всего было направлено против загрязнения моря, вызванного обычной эксплуатацией танкеров и сбросом нефтесодержащих льяльных вод из машинных отделений, что расценивалось как главные причины загрязнения моря с судов.

В 1973 г. созванная ИМО Международная конференция приняла Международную конвенцию по предотвращению загрязнения моря с судов. Хотя в то время и считалось, что случайные загрязнения, связанные с авариями судов, являются наиболее опасными для окружающей среды, конференция решила, что эксплуатационные загрязнения представ-

ляют собой большую угрозу. В результате конвенция 1973 г. включила в Приложение I, касающееся нефти, многое из соглашения OILPOL.

В феврале 1978, в ответ на большое количество инцидентов с танкерами в 1976–1977 гг., ИМО провела конференцию по безопасности танкеров и предотвращению загрязнения. Конференция утвердила требования к конструкции танкеров и их эксплуатации, которые были включены в Протокол, дополняющий Соглашение по безопасности на море (1978 SOLAS Protocol) и Международную конвенцию по предотвращению загрязнения моря с судов (1978 MARPOL Protocol).

Международная конвенция по предотвращению загрязнения моря с судов 1973 г., измененная Протоколом 1978 г. к ней (МК МАРПОЛ 73/78), вступила в силу 2 октября 1983 г. (Приложения I и II). С тех пор на сессиях Комитета защиты окружающей среды (КЗМС) ИМО постоянно принимаются поправки к правилам Приложения I. Таким образом, этот

международный инструмент постоянно совершенствуется.

Накопление на судах большого количества нефтесодержащих вод и нелегальный сброс этих вод в море являются до сих пор одними из главных экологических проблем для судоходства.

В соответствии с правилом 15.2 Приложения I, любой сброс в море нефти или нефтесодержащих смесей с судов валовой вместимостью 400 и более за пределами особых районов, исключая Арктические воды, запрещается, кроме случаев, когда соблюдаются одновременно все следующие условия:

- судно находится в пути;
- нефтесодержащая смесь обработана с помощью оборудования для фильтрации нефти, отвечающего требованиям правила 14 Приложения I;
- содержание нефти в стоке без его разбавления не превышает 15 миллионных долей (млн-1);
- на нефтяных танкерах нефтесодержащая смесь не происходит из льял отделения грузовых насосов;
- нефтесодержащая смесь не смешана с остатками груза нефти (для нефтяных танкеров).

Правило 14.1 Приложения I требует, чтобы любое судно валовой вместимостью 400 и более, но менее 10 000 было оснащено оборудованием для фильтрации нефти, которое должно иметь одобренную Администрацией конструкцию в соответствии с положениями руководств одной из применимых резолюций ИМО А.393(X), МЕРС.60(33) или МЕРС.107(49) (в зависимости от даты установки оборудования на судно) и обеспечивать такую фильтрующую способность, чтобы после прохождения через это оборудование любой нефтесодержащей смеси, сбрасываемой в море, содержание нефти в ней не превышало 15 млн^{-1} . В данном случае имеется в виду оборудование для фильтрации нефти, состоящее из одного сепаратора льяльных нефтесодержащих вод на 15 млн^{-1} .

Современный сепаратор на 15 млн^{-1} , как правило, состоит из двух основных блоков: коалесцирующего, где идет основное отделение нефти от нефтесодержащей воды (после слияния и укрупнения частиц нефти при помощи коалесцирующих элементов), и фильтрующего блока, где при помощи фильтрующих элементов содержание нефти в сбросе снижается до 15 млн^{-1} и менее.

Правило 14.2 Приложения I требует, чтобы любое судно валовой вместимостью 10000 и более было оснащено оборудованием для фильтрации нефти, отвечающим требованиям правила 14.7 этого приложения, т.е. оборудованием, состоящим из сепаратора на 15 млн^{-1} , сигнализатора на 15 млн^{-1} , одобренного Администрацией в соответствии с положениями вышеуказанных применимых резолюций ИМО (в зависимости от даты установки сигнализатора на судно), а также автоматического запорного устройства.

Сигнализатор на 15 млн^{-1} представляет из себя прибор, который подает управляющий сигнал на автоматическое запорное устройство при превышении предельного уровня нефти (15 млн^{-1}) в сбрасываемой за борт воде из сборного танка льяльных вод или из самих льял машинных помещений после сепаратора на 15 млн^{-1} . В этом случае автоматическое запорное устройство, представлявшее из себя, как правило, трехходовой управляемый клапан (или группу клапанов), переключает поток сбрасываемой льяльной воды обратно в сборный танк льяльных вод или в льяла. На старых судах встречаются конструкции, когда в установках, одобренных на соответствие резолюции ИМО А.393(X), автоматическое запорное устройство может быть реализовано посредством остановки насоса, используемого для подачи льяльной воды к сепаратору на 15 млн^{-1} .

В соответствии с правилом 15.3 Приложения I в пределах особых районов, указанных в правиле 1 того же приложения (район Арктических вод особым районом не является), любой сброс в море нефти или нефтесодержащих смесей с судов валовой вместимостью 400 и более также запрещается, кроме случаев, когда соблюдаются одновременно все вышеперечисленные условия в правиле 15.2 Приложения I, за исключением того, что нефтесодержащие воды из района машинных отделений могут быть сброшены (при необходимости такого сброса), если они обработаны с помощью оборудования для фильтрации нефти, отвечающего требованиям правила 14.7 Приложения I, т.е., как указано выше, состоящего из сепаратора на 15 млн^{-1} , сигнализатора на 15 млн^{-1} и автоматического запорного устройства.

В случае эксплуатации судна исключительно в пределах особого района или смежных особых районов, а также района Арктических вод Администрация может не применять требования правил 14.1 и 14.2 Приложения I по оснащению судна оборудованием для фильтрации нефти на основании положений правила 14.5 Приложения I при соблюдении следующих условий:

- судно оборудовано сборным танком достаточной, удовлетворяющей Администрацию вместимости для полного сохранения на борту нефтесодержащих льяльных вод;
- все нефтесодержащие льяльные воды сохраняются на борту для последующего их сброса в приемные сооружения;
- Администрация удостоверилась, что в достаточном количестве портов или терминалов, куда заходит судно, имеются отвечающие требованиям приемные сооружения для приема таких нефтесодержащих льяльных вод;
- Международное свидетельство о предотвращении загрязнения нефтью, если оно требуется, содержит запись о том, что судно

выполняет рейсы исключительно в пределах особых районов или в Арктических водах, или считается высокоскоростным судном для цели настоящего правила и характер рейса установлен;

- сброшенное количество, время и порт сброса регистрируются в части I Журнала нефтяных операций.

Однако, несмотря на возможность такого освобождения от требований Администрацией, не целесообразно превращать судно в транспортное средство для перевозки собственных отходов.

Одно из важнейших качеств судна – автономность определяется не только запасами топлива, провизии и питьевой воды, но и достаточной емкостью сборных танков льяльных нефтесодержащих вод для эксплуатации судна в районах, где сброс этих вод запрещен.

Как указано выше, одним из условий возможности предоставления Администрацией освобождения от требования по оснащению судна оборудованием для фильтрации нефти является наличие сборного танка достаточной, удовлетворяющей Администрацию вместимости для полного сохранения на борту нефтесодержащих льяльных вод. Это требование не всегда может быть выполнено по причине отсутствия на судне сборного танка достаточной вместимости, которая определяется предоставляемым судовладельцем расчетом накопления льяльных нефтесодержащих вод в зависимости от источников образования этих вод при переходе судна между портами в особом районе, где имеются достаточные приемные сооружения.

Количество образующихся судовых нефтесодержащих вод зависит от целого ряда причин, связанных с типом судна, энергетической установкой и во многом – от их технического состояния. Такими причинами могут быть протечки забортной и пресной воды через неплотности в трубопроводах, фитингах, арматуре, корпусах механизмов и аппаратов, особенно через дейдвудное уплотнение с сальниковой набивкой (при наличии такого уплотнения), протечки, возникшие в результате ремонта оборудования, отпотевания внутреннего корпуса судна и т.д., а также протечки топлива и смазочного масла, в основном отработанного с достаточно большим содержанием серы.

В нефтесодержащих льяльных водах также могут содержаться химические моющие вещества, применяемые для очистки танков и оборудования, что приводит к образованию стабильных эмульсий, препятствующих отделению нефти от воды в фильтрующем оборудовании. Эта трудная задача отделения нефти от эмульгированной нефтесодержащей воды может быть решена только за счет применения на судах сепараторов на 15 млн^{-1} , имеющих типовое одобрение в соответствии с резолюцией МЕРС.107(49), которые способны отделять нефть от эмульсии с обеспечением стока с

содержанием нефти, не превышающим 15 млн^{-1} . Такие сепараторы должны быть установлены на судах, киль которых заложен 1 января 2005 г. или позже, или на судах, киль которых был заложен до этой даты, когда заказ этих сепараторов для установки на судне был произведен 1 января 2005 г. или позже (циркуляр ИМО МЕРС/Circ.420).

Для судна, у которого вообще нет сборного танка льяльных вод, наличие которого не требуется правилами Приложения I, и, таким образом, все нефтесодержащие воды накапливаются в льялах машинных помещений судна, предоставление Администрацией вышеуказанного освобождения невозможно.

Отсутствие на эксплуатирующемся в особом районе судне оборудования для фильтрации нефти (которое должно при его наличии соответствовать требованиям правила 14.7 Приложения I), но тем не менее получившим освобождение Администрации от выполнения этого правила, значительно снижает автономность судна, а также «привязывает» судно к определенным особым районам без возможности эксплуатации его за пределами этих особых районов или перехода из одного особого района в другой несмежный с ним особый район, а также увеличивает риск возникновения нелегальных сбросов с судов необработанных нефтесодержащих вод.

Во избежание вышеуказанных проблем Российский морской регистр судоходства рекомендует всем судовладельцам устанавливать на своих судах вне зависимости от района их эксплуатации полный комплект одобренного фильтрующего оборудования, состоящий из сепаратора на 15 млн^{-1} , сигнализатора на 15 млн^{-1} и автоматического запорного устройства, в том числе и на судах валовой вместимостью менее 400, что действительно послужит вкладом в дело защиты окружающей среды.

На 68-й сессии КЗМС ИМО 15 мая 2015 г. был принят (резолюция МЕРС.264(68)) Международный кодекс для судов, эксплуатирующихся в полярных водах (Полярный кодекс), с датой вступления в силу 1 января 2017 г. после вступления в силу соответствующих поправок к Приложениям I, II, IV и V к МК МАРПОЛ 73/78.

В главе 1 части II-A Полярного кодекса приведены требования по предотвращению загрязнения с судов, эксплуатирующихся в полярных водах. В соответствии с пунктом 1.1.1 этой главы в полярных водах с любого судна запрещен любой сброс в море нефти или нефтесодержащих смесей. Однако в пункте 1.1.3 этой главы для судов категории А (спроектированных для эксплуатации в полярных водах по меньшей мере в условиях однолетнего льда средней толщины с возможными включениями старого льда) сделано временное отступление от выполнения этого требования. А именно, вышеуказанные суда, построенные до

1 января 2017 г., которые не могут соответствовать требованиям в отношении полного запрета по сбросу нефти или нефтесодержащих смесей из машинных помещений и которые непрерывно эксплуатируются в арктических водах в течение более 30 сут, должны соответствовать этим требованиям не позднее, чем при первом промежуточном освидетельствовании или освидетельствовании для возобновления свидетельства, в зависимости от того, что произойдет раньше через год после 1 января 2017 г., при условии одобрения Администрацией. До дат указанных освидетельствований после 1 января 2017 г. такие суда должны соответствовать требованиям к сбросам, содержащимся в правиле 15.3 Приложения I к МК МАРПОЛ 73/78, в соответствии с которыми нефтесодержащие воды могут быть сброшены из района машинных отделений судна (при необходимости такого сброса), если они обработаны с помощью оборудования для фильтрации нефти, отвечающего требованиям правила 14.7 Приложения I, т.е. состоящего из сепаратора на 15 млн^{-1} , сигнализатора на 15 млн^{-1} и автоматического запорного устройства.

До вступления в силу Полярного кодекса (1 января 2017 г.) всем судам валовой вместимостью 400 и более, но менее 10000, эксплуатирующимся в полярных водах, достаточно иметь только сепаратор на 15 млн^{-1} без сигнализатора на 15 млн^{-1} и автоматического запорного устройства (как для судов, эксплуатирующихся за пределами особых районов), а суда валовой вместимостью менее 400 могут вообще не иметь такой сепаратор.

После вступления в силу Полярного кодекса вышеуказанные суда категории А, эксплуатирующиеся в Арктических водах, до дат проведения освидетельствований в соответствии с пунктом 1.1.3 главы I части II-А Полярного кодекса при необходимости сброса нефтесодержащих вод должны быть приведены в соответствие с требованиями правила 14.7 Приложения I к МК МАРПОЛ 73/78 вне зависимости от их валовой вместимости, а затем до вступления в силу требований пункта 1.1.1 главы I части II-А Полярного кодекса по полному запрету сброса нефтесодержащих вод они должны быть дооборудованы сборными танками льяльных нефтесодержащих вод (при их отсутствии на судне) или дополнительными сборными танками объемом, достаточным для совершения продолжительного рейса с учетом отсутствия возможности сброса нефтесодержащих вод через фильтрующее оборудование.

Все остальные суда, включая суда категорий В и С (спроектированные для менее жестких ледовых условий, чем те, которые предусмотрены для судов категории А), при их эксплуатации в Арктических водах должны соответствовать требованию пункта 1.1.1 главы I части II-А Полярного кодекса по полному запрету сброса нефтесодержащих вод с

1 января 2017 г., что подразумевает их дооборудование сборными танками льяльных нефтесодержащих вод для полного их сохранения в период рейсов в Арктических водах. Такое дооборудование судов сборными танками связано с большими техническими трудностями и в отдельных случаях практически не осуществимо.

В ходе разработки и принятия Полярного кодекса Российская Федерация (РФ) на последних сессиях КЗМС обращала внимание на то, что выполнение полного запрета сброса нефтесодержащих вод с судов, особенно с судов, совершающих рейсы в ледовых условиях, окажет негативное влияние на судоходство в Арктике и может привести к росту нелегальных, неконтролируемых сбросов. Обнаружение таких сбросов в Арктике намного сложнее, чем, например, на Балтике, где нелегальные сбросы до сих пор являются острой проблемой, несмотря на более развитую портовую инфраструктуру и достаточность приемных сооружений.

Так, на 66-й сессии КЗМС в апреле 2014 г. РФ предлагала изменить положение главы I части II-А проекта Полярного кодекса о запрещении любого сброса в море нефтяных или нефтесодержащих смесей с любых судов, заменив его положением о разрешении судам, работающим в Арктических водах, сбрасывать нефтесодержащие воды из машинных помещений на условиях, предусмотренных для особых районов в соответствии с правилом 15.3 Приложения I к МК МАРПОЛ 73/78, в том числе с возможностью применения фильтрующего оборудования в соответствии с правилом 14.7 Приложения I. Однако это предложение РФ не получило достаточной поддержки.

На 67-й сессии КЗМС ИМО в октябре 2014 г. РФ была представлена «нота» к резолюции МЕРС 67/9/2 в части требований Полярного кодекса по предотвращению загрязнения нефтью, в которой предлагалось для исключения негативных последствий полного запрета сброса нефтесодержащих вод с судов ввести в текст главы I части II-А проекта Полярного кодекса (по аналогии с положениями правила 14.5 Приложения I к МК МАРПОЛ 73/78) положения об освобождении судов, совершающих рейсы в ледовых условиях, от выполнения требований по полному запрету сброса нефтесодержащих вод в случаях, когда по мнению Администрации конструктивные особенности этих судов (например, ледоколов, гидрографических и научно-исследовательских судов, находящихся в Полярных водах в течение нескольких месяцев без захода в порты) исключают возможность разумного и практически целесообразного применения к ним требований по полному запрету сброса нефтесодержащих вод при условии, что на этих судах будут выполняться требования правила 15.3 Приложения I в части условий сброса

нефте содержащих вод в установленных особых районах. Однако и в этом случае предложения РФ не были поддержаны.

Таким образом, декларируя озабоченность состоянием экологии Арктики и приверженность усилению требований по предотвращению загрязнения среды этого района, ИМО приняла очередной инструмент защиты окружающей среды, который исключает с определенной даты применение эффективных, годами проверенных методов ограничения сброса нефте содержащих вод, предусмотренных Приложением I к МК МАРПОЛ 73/78. Это может привести к непредсказуемым негативным последствиям: загрязнению нефтью Арктических вод вследствие нелегальных и неконтролируемых сбросов необработанных нефте содержащих льяльных вод, а также значительно усложнит выполнение задач, поставленных перед судоходством в Арктических водах.

ВЫВОДЫ

Введение запрета сброса с судов нефте содержащих вод как в особых районах на основании правила 14.5 Приложения I к МК МАРПОЛ 73/78, так и в

Арктических водах в соответствии с пунктом 1.1.1 главы 1 части II–А Полярного кодекса не может исключить нелегальные и неконтролируемые сбросы необработанных нефте содержащих льяльных вод, в случаях, когда судно оказывается в безвыходном положении по причине невозможности сброса нефте содержащих вод из переполненных сборных танков ввиду непредвиденных обстоятельств, связанных с задержкой рейса из-за тяжелых погодных условий или ледовой обстановки, или отсутствия достаточных приемных сооружений на пути следования судна.

Полностью исключить сбросы с судов нефте содержащих вод также невозможно, как невозможно полностью исключить выбросы из судовых двигателей окислов азота, окислов серы и парниковых газов. Можно только предельно ужесточить нормы сброса нефте содержащих вод с судов и выбросов из судовых двигателей. По аналогии с принятым в Приложении VI к МК МАРПОЛ 73/78 подходом по постепенному ужесточению норм выбросов из судовых двигателей, в части предотвращения загрязнения нефтью целесообразно также идти по пути ужесточения нормы нефте содержания в сбросе, например, изменив эту норму с 15 млн^{-1} до 5 млн^{-1} , а не по пути полного запрета сброса льяльных вод с любым содержанием нефти.

ОБОЗРЕНИЕ: ДАЙДЖЕСТ НОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Системный подход к энергетическому менеджменту

Снижение потребления топлива и повышение энергетической эффективности – одни из основных целей современного судостроения. Технический университет Чалмерса в Гётеборге провел анализ энергетической эффективности на примере танкера-химовоза и пассажирского судна. Выявлено, что использование систем утилизации отработанного тепла, основанных на органическом цикле Ренкина (отработанное тепло используется для превращения воды в пар с последующей подачей его на турбину, вырабатывающую элект-

рическую энергию), позволит снизить потребление топлива на 9 % в год для танкера-химовоза и на 4 % для пассажирского судна. Также было обнаружено, что в случае танкера-химовоза около 4 % годового расхода топлива приходится на вспомогательные котлы, использующиеся лишь в порту. В этом случае предложено использовать системы хранения тепловой энергии. Экономия топлива в порту может составить до 60 %. (*Naval Architect. January 2016*)

ПО для статистического анализа и оценки потери скорости

Анализ больших объемов данных в морской индустрии

позволяет в автоматическом режиме оценивать характеристики производительности судна. Норвежской компанией Кута разработано ПО, непрерывно анализирующее гидродинамические характеристики судна на основе данных о работе главного двигателя и скорости судна. Такое ПО даст судовладельцу удобный инструмент для оценки энергетической эффективности судна, планирования периода докования и анализа эффективности противобрастающего покрытия, что поможет эксплуатировать судно наиболее рационально. (*Naval Architect. January 2016*).



ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ НА МОРСКОМ ТРАНСПОРТЕ

УДК 629.5.01

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ АРКТИЧЕСКОГО КОНТЕЙНЕРОВОЗА ДЛЯ ТРАНЗИТНЫХ ПЕРЕВОЗОК ПО СЕВЕРНОМУ МОРСКОМУ ПУТИ

А.А. Штрек, магистр техники и технологии, АО «Центральный научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт морского флота» (ЦНИИМФ), Санкт-Петербург, e-mail: shtrek@cniimf.ru

А.С. Буянов, канд. экон. наук, АО «ЦНИИМФ», Санкт-Петербург, e-mail: flot@cniimf.ru

Статья посвящена разработке концептуального проекта судна ледового класса для круглогодичной перевозки контейнерных грузов по Северному морскому пути (СМП). Оценены перспективы транзита таких грузов и проведены поисковые исследования, направленные на выбор рациональных технических решений и разработку вариантов арктического контейнеровоза с высокой контейнеровместимостью, а также сценариев эксплуатации его на трассах СМП. В рамках выполненного технико-экономического обоснования сформированы ледовые трассы на маршрутах следования, рассмотрены варианты ледокольного обеспечения, произведены расчеты скоростей движения контейнеровоза на заданных линиях эксплуатации. Анализ полученных эксплуатационно-экономических показателей позволил обосновать оптимальный вариант контейнеровоза и сформулировать основные технико-эксплуатационные требования для его проектирования.

Ключевые слова: арктический контейнеровоз, Северный морской путь, технико-экономическое обоснование.

FEASIBILITY STUDY OF ARCTIC CONTAINERSHIP OPTIMAL PARAMETERS FOR TRANSIT NAVIGATION ALONG THE NORTHERN SEA ROUTE

A.A. Shtrek, MSc, "Central Scientific Research Institute of Marine Fleet", JSC, St. Petersburg, e-mail: shtrek@cniimf.ru

A.S. Buyanov, PhD, "Central Scientific Research Institute of Marine Fleet", JSC, St. Petersburg, e-mail: flot@cniimf.ru

The article deals with the development of the conceptual design of ice class vessel for the year-round transportation of container cargo along the Northern Sea Route (NSR). The assessment was made of the future transit container cargoes on the NSR and research investigations were carried out directed towards the selection of efficient technical solutions and development of versions of the Arctic containership with high TEU capacity and operational scenario on the NSR seaways. Within the framework of the realized feasibility study, the ice routes on the sailing lines were formed, different versions of icebreaker support were considered and calculations of containership speeds on the specified operational routes were performed. Analysis of the obtained operational and economic characteristics of navigation will enable to substantiate the optimal version of the containership and formulate the principal technical and operational requirements for its design.

Keywords: Arctic containership, Northern Sea Route, feasibility study.

ВВЕДЕНИЕ

В сферу важнейших мероприятий государственной политики Российской Федерации в Арктике входит интенсификация судоходства по Северному морскому пути (СМП) с созданием соответствующей инфраструктуры и обеспечением транзитных перевозок наливных, навалочных и генеральных грузов. Среди перевозок генеральных грузов особое место занимает транспортировка грузов в контейнерах. В настоящее время транзитные перевозки контейнеров между Европой и Азией осуществляются преимущественно южным путем через Суэцкий канал и частично по Транссибирской железной дороге.

В этой связи Федеральной целевой программой «Развитие гражданской морской техники» на 2009–2016 годы была предусмотрена разработка концептуального проекта контейнеровоза ледового плавания повышенной контейнероустойчивости для высокоширотных линий СМП. Данная работа выполнена АО «ЦНИИМФ» в рамках Государственного контракта № 3.01-15, заключенного с Федеральным агентством морского и речного транспорта (Росморречфлотом) по результатам открытого конкурса. В соответствии с Техническим заданием на выполнение работы, ЦНИИМФ были проведены исследования по выбору оптимальной контейнероустойчивости, рационального архитектурно-конструктивного типа, главных размерений, ледовых качеств, общего расположения, формы обводов корпуса, характеристик энергетической установки и движительно-рулевого комплекса перспективного арктического контейнеровоза для круглогодичных транзитных перевозок по СМП.

1. ПЕРСПЕКТИВНАЯ ГРУЗОВАЯ БАЗА

Основу контейнерной грузовой базы СМП могут составить следующие морские перевозки:

- каботажные перевозки между российскими портами (Мурманск, Петропавловск-Камчатский, Владивосток, Восточный, Магадан);
- импортные перевозки между российскими и азиатскими портами (Мурманск / Петропавловск-Камчатский);
- транзитные перевозки между российскими портами-хабами (Мурманск, Петропавловск-Камчатский);
- транзитные перевозки между портами Северной Европы и Азии.

В качестве перспективной грузовой базы для каботажных перевозок можно рассматривать

доставку рыбной продукции с портов Дальнего Востока в порт Мурманск и завоз грузов из европейской части России на Дальний Восток.

По состоянию на декабрь 2015 г. российскими рыбопромышленниками добыто 4 млн 384,4 тыс. т, что на 199 тыс. т или на 4,7 % выше уровня прошлого года. Общий вылов водных биоресурсов в Дальневосточном бассейне составил 2 млн 773,2 тыс. т, превысив уровень 2014 г. на 77,4 тыс. т. На промысле минтая вылов увеличился на 108,9 тыс. т – до 1 млн 615,8 тыс. т. По статистическим оценкам местное потребление рыбопродукции на Дальнем Востоке составляет порядка 500-600 тыс. т в год. Излишки рыбы реализуются как на внутреннем, так и на внешнем рынке.

Однако следует отметить, что российские каботажные грузы не смогут обеспечить необходимую загрузку контейнерной линии для ее экономически обоснованной работы. Выходом из этой ситуации может стать создание на севере и Дальнем Востоке двух крупных портов-хабов (по аналогии с азиатскими островными портами) – в Мурманске и в Петропавловске-Камчатском. Предпосылки создания портов-хабов на данный момент есть – планы по строительству контейнерного терминала в порту Мурманск и планы по реконструкции порта Петропавловск-Камчатский.

Создание портов-хабов позволит обеспечить сбалансированную работу контейнерной линии с использованием челночного контейнеровоза ледового плавания. Завоз и вывоз контейнеров из портов-хабов будет осуществляться неледовыми контейнеровозами повышенной вместимости.

Подпрограммой «Развитие экспорта транспортных услуг» ФЦП «Развитие транспортной системы России (2010-2020 годы)» предусмотрено комплексное развитие Мурманского транспортного узла, в рамках которого в том числе планируется строительство на восточном берегу Кольского залива контейнерного терминала мощностью 1 млн TEU.

Реконструкция морского порта Петропавловск-Камчатский связана с созданием территории опережающего социально-экономического развития «Камчатка». Основной задачей ее создания является реализация проекта строительства на базе Петропавловск-Камчатского морского торгового порта современного транзитного контейнерного порта-хаба и опорной береговой инфраструктуры в северо-восточной части СВРП. Создание многофункционального транзитного грузового терминала для обработки грузов, следующих из Юго-Восточной Азии в Европу и США, предполагает серьезную модернизацию портовой инфраструктуры. В основе плана – реконструкция существующих объектов Морского торгового порта и сооружений ФГУП «Росморпорт», а также создание новых площадей и мощностей.

Предпосылки создания транзитной контейнерной линии Европа – Азия с использованием Северного морского пути с точки зрения наличия грузовой базы очевидны.

По данным *Container Trades Statistics*, объем перевозок в 2014 г. в западном направлении из Азии в Европу составил около 15,4 млн TEU. В 2015 г. в связи с замедлением экономического роста Китая и макроэкономической ситуацией в целом произошло снижение грузооборота между Азией и Европой менее чем на 4% до 14,8 млн TEU в западном направлении (рис. 1).

По данным китайской таможенной статистики, оборот торговли между Китаем и Европой составил 264 млн т на сумму \$713 млрд. Импорт из Китая в Европу в 2014 г. составил 181,48 млн т на сумму \$468 млрд, экспорт из Европы в Китай – 83,49 млн т на сумму \$244 млрд. В TEU объем торговли из Китая в Европу превысил 10,5 млн, а европейский экспорт в Китай – 4 млн.

Таким образом, можно сделать вывод, что в настоящее время транзитные контейнерные перевозки на направлении Азия – Европа активно развиваются и являются востребованными на рынке морских перевозок. Все маршруты контейнерных линий, связывающих Европу и Азию, проходят по южному морскому пути через Суэцкий канал.

Создание альтернативного транспортного коридора с использованием СМП для перевозки контейнерных грузов может привлечь часть транзитной грузовой базы, идущей в настоящее время через Суэц.

Перспективная грузовая база для арктической контейнерной линии может включать в себя перевозку рыбопродукции из порта Петропавловск-Камчатский в Мурманск (около 300 – 400 тыс. т), завоз продовольственных грузов на Дальний Восток из Европейской части России, перевозку транзитных грузов на направлении Азия – Европа (600/400 тыс. т), перевозку российских внешнеторговых грузов.

Прогнозная оценка объемов перевозок контейнерных грузов по СВП приведена в табл. 1.

Таблица 1

Прогноз объема перевозок контейнерных грузов по СМП

Направление перевозки/род груза	Объем перевозки	
	тыс. т	тыс. TEU
<i>Петропавловск-Камчатский – Мурманск:</i>	1 050	80
транзитные грузы	600	46
российские внешнеторговые грузы	100	7
российские каботажные грузы (реф.-рыба)	350	27
<i>Мурманск – Петропавловск-Камчатский:</i>	750	57
транзитные грузы	400	31
российские внешнеторговые грузы	200	15
российские каботажные грузы (реф.-продовольствие)	150	11
ИТОГО	1 800	137

Для организации сбалансированной работы контейнерной линии и соблюдения заявленных сроков перевозки грузов минимально необходимой частотой отправления грузов из порта является периодичность два раза в месяц.



Рис. 1 Объем перевозки контейнеров на направлении Европа – Азия в 2015 г.

2. РАЗРАБОТКА ВАРИАНТОВ ПЕРСПЕКТИВНОГО АРКТИЧЕСКОГО КОНТЕЙНЕРОВОЗА

Разработке вариантов судна предшествовал анализ навигационных и ледовых условий в акватории СМП с учетом имеющихся прогнозов по изменению климата в Арктике. Выполненный анализ показал, что для возможности круглогодичной эксплуатации на трассах СМП с использованием ледокольного сопровождения транспортное судно должно иметь ледовый класс Российского морского регистра судоходства (Регистр) не ниже **Arc7** и полярный класс в соответствии с международной классификацией МАКО/ИМО – не ниже **PC3**. Для круглогодичного самостоятельного плавания без ограничений в акватории СМП, включая высокоширотные маршруты, при любом типе ледовых условий, рассматриваемый контейнеровоз должен иметь ледовый класс **Arc9** по классификации Регистра и полярный класс **PC2** по международной классификации.

В качестве основного сценария круглогодичной эксплуатации арктического контейнеровоза повышенной контейнеровместимости на трассах СМП наиболее целесообразно рассматривать его самостоятельное транзитное плавание в период летне-осенней навигации и движение под проводкой линейного ледокола в зимне-весенний навигационный период. В этом случае ледопроечность контейнеровоза с ледовым классом **Arc7**, с учетом накопленного опыта эксплуатации ледокольно-транспортных судов, должна составлять не менее 2,1 м. Требуемая ледопроечность ледокольно-транспортного судна ледового класса **Arc9**, рассчитанного на круглогодичное самостоятельное транзитное плавание по трассам СМП, составляет около 3,2 м.

С целью выбора оптимального типоразмера были проработаны варианты судна с ледовым классом **Arc7**, отличающиеся контейнеровместимостью (2000, 3000 и 4000 TEUs). Исходя из условий размещения контейнеров и обеспечения проводки судна во льдах одним перспективным линейным атомным ледоколом типа ЛК-60Я, ширина всех рассматриваемых вариантов принята равной 32,2 м, соответствующей ширине стандартного контейнеровоза класса «Панамакс». При этом варьировалась длина и высота борта контейнеровоза, исходя из обеспечения требуемой контейнеровместимости. Наряду с вариантами контейнеровоза, предназначенными под проводку ледоколами, был проработан также вариант контейнеровоза вместимостью 4000 TEU ледового класса **Arc9** для автономного плавания, который не имеет ограничения по ширине (табл. 2).

Потребная мощность на валах и количество гребных винтов определялись исходя из условия обеспечения заданного уровня ледопроечности. При этом оценивалась также возможность эффек-

Таблица 2
Основные характеристики расчетных вариантов контейнеровоза повышенной контейнеровместимости для СМП

Характеристика	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3	Вариант 4
Вместимость, TEU	2000	3000	4000	4000
Ледовый класс Регистра	Arc7	Arc7	Arc7	Arc9
Полярный класс ИМО	PC3	PC3	PC3	PC2
Длина по КВЛ, м	182	220	250	260
Ширина максимальная, м	32,2	32,2	32,2	40,0
Ширина по КВЛ, м	32,2	32,2	32,2	39,4
Высота борта, м	16,7	19,5	21,5	21,5
Осадка проектная (по КВЛ), м	10,1	11,0	12,1	12,3
Осадка максимальная, м	11,1	12,2	13,5	13,5
Водоизмещение порожнем, т	19100	24500	29200	42200
Дедвейт максимальный, т	29500	41000	52500	55500
Водоизмещение максимальное, т	48600	65500	81700	97700
Мощность на валах, МВт	45			80
Число гребных винтов (ВРК)	3 Azipod			3 ВФШ
Ледопроечность, м	2,1	2,1	2,1	3,2
Скорость на чистой воде, уз	21	21	21	23
Цена судна (без НДС), млн долл.: головное судно среднесерийное	200 173	217 188	231 200	346 300

тивной переработки мощности без кавитации и аэрации. В соответствии с расчетами, для всех вариантов судна наиболее целесообразно использование трехвальной пропульсивной установки. Как показали расчеты, необходимая мощность на валах для всех вариантов контейнеровоза с ледовым классом **Arc7** составит около 45 МВт. С целью улучшения маневренности во льдах и повышения эксплуатационных возможностей на вариантах контейнеровоза класса **Arc7** в качестве движителей могут быть использованы винто-рулевые колонки (ВРК) типа *Azipod* мощностью 15 МВт, аналогичные устанавливаемым на строящихся в данное время крупнотоннажных арктических газовозов для проекта «Ямал-СПГ». Для варианта контейнеровоза с ледовым классом **Arc9** необходимая для обеспечения ледопроечности (лед 3,2 м) мощность на валах составит около 80 – 90 МВт. В этом случае рассмотрен только традиционный пропульсивный комплекс, поскольку ВРК требуемой мощности и ледового класса в настоящее время не существует.

По архитектурно-конструктивному типу все варианты контейнеровоза представляют собой однопалубное судно открытого типа с двойными бортами, с трюмами ячеистой конструкции. Варианты контейнеровоза класса **Arc7** – с кормовым расположением машинного отделения (МО) и жилой рубки, с баком, с расположением контейнеров на палубе перед и за жилой надстройкой. Судно класса

Arc9 – с кормовым расположением МО и носовым расположением жилой надстройки с ходовым мостиком.

Варианты судна с ледовым классом **Arc7** имеют вертикальные борта и усовершенствованную традиционную ледокольную форму обводов носовой оконечности, обеспечивающую как требуемую ледопроездимость, так и приемлемые мореходные качества на чистой воде. Для контейнеровоза с ледовым классом **Arc9** требуется применение наклонного борта и экстремальных ледокольных обводов носовой оконечности, которые будут ограничивать его мореходность.

3. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ (ТЭО) АРКТИЧЕСКОГО КОНТЕЙНЕРОВОЗА ДЛЯ ТРАНЗИТНЫХ ПЕРЕВОЗОК ПО СМП

Для возможности выполнения сравнительных расчетов экономической эффективности и выбора оптимального варианта арктического контейнеровоза повышенной контейнероёмкости была сформирована транспортно-технологическая схема транзитных перевозок контейнерных грузов по СМП, включая:

- оценку стоимости постройки расчетных вариантов контейнеровозов ледового плавания (см. табл. 2);
- формирование ледовых трасс на маршрутах следования и определение потребности в ледокольном обеспечении.

Основным моментом, определяющим различия в транспортных схемах для вариантов контейнеровоза, отличающихся вместимостью, является возможность использования традиционных маршрутов плавания (через мелководный пролив Санникова) для вариантов судна вместимостью 2000 и 3000 TEU, максимальная осадка в грузу которых не превышает 12,2 м. Контейнеровозы вместимостью 4000 TEU с осадкой более 13 м должны использовать только высокоширотный маршрут, пролегающий севернее Новосибирских островов (см. рис. 2).

От того, в какой мере судно пользуется ледокольной поддержкой, зависит экономическая эффективность перевозки грузов. В настоящее время плата за ледокольную проводку осуществляется дифференцировано, в зависимости от числа зон, в которых эта услуга предоставляется. С этой целью акватория СМП разделена на 7 зон (см. рис. 2) [1]. При моделировании ледового плавания вариантов контейнеровоза класса **Arc7** ледокольная проводка может потребоваться максимум в шести зонах СМП, которые охватывают путь от северо-восточной части Карского моря до Берингова пролива.

Потребное ледокольное обеспечение в акватории СМП для контейнеровозов с ледовым классом **Arc7** оценивалось в двух вариантах:

- фиксированное – с января по июнь с постоянным числом зон проводки;
- дифференцированное – с минимальным числом месяцев в зимне-весенний период навигации и с минимальным числом зон в соответствии с принятым критерием.

Переход к сценарию проводки ледоколом происходит лишь в тех случаях, когда скорость автономного плавания контейнеровоза опускается ниже критического значения. Выполненные исследования показывают, что с эксплуатационной точки зрения плавание судна без ледокольной поддержки может считаться эффективным, если обеспечивается средняя скорость движения во льдах около 7 уз. Таким образом, результаты моделирования движения контейнеровоза самостоятельно и под проводкой атомохода позволили выполнить оптимизацию ледокольного обслуживания и определить продолжительность периода, когда судну будет необходима эта услуга. Расчетами показано, что ледокольная проводка в средних ледовых условиях потребуется для судов вместимостью 2000 и 3000 TEU в течение минимум трех месяцев, а для судна вместимостью 4000 TEU – в течение не менее пяти месяцев, с учетом различия в маршрутах плавания (см. рис. 3).

Расчеты скоростей движения рассматриваемых вариантов контейнеровоза во льдах выполнялись с использованием разработанной в ЦНИИМФ матема-

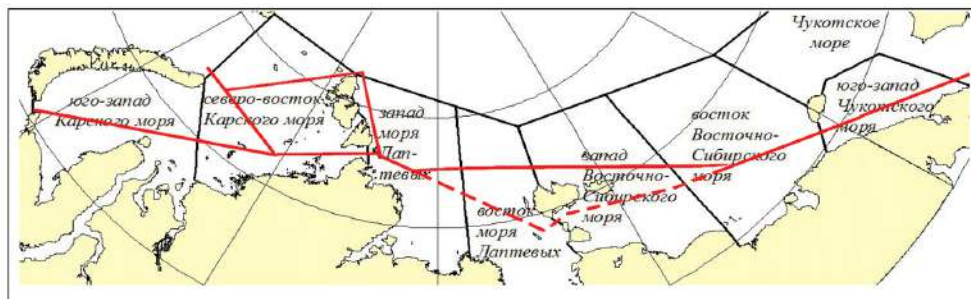


Рис. 2 Разделение акватории СМП на зоны и схемы маршрутов плавания контейнеровоза

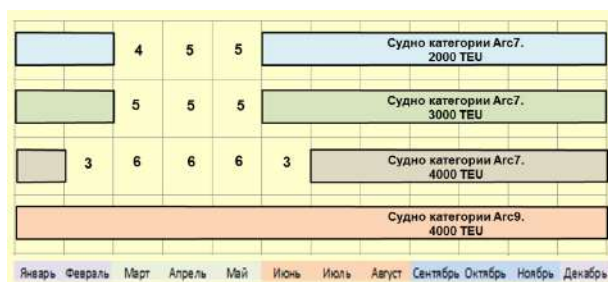


Рис. 3 Периоды безледокольной эксплуатации вариантов контейнеровоза и число зон ледокольной проводки из условия обеспечения эксплуатационной скорости на трассе СМП не менее 7 уз, при среднем типе ледовых условий

тической модели движения судна в канале за ледоколом [2]. Модель представляет собой совокупность аналитических зависимостей и логических связей, описывающих движение судна во льдах, как самостоятельно, так и во взаимодействии с ледоколом. Эта модель позволяет также определить затраты мощности судна и ледокола с учетом характеристик ледовой ходкости каждого из них.

Еще одной особенностью проектных решений рассматриваемого вариантного ряда контейнеровозов, отличающихся контейнеровместимостью, является увеличение длины цилиндрической вставки судна при сохранении постоянной ширины и параметров пропульсивной установки, что будет отражаться на характеристиках маневренности судна во льдах, а также на дополнительном росте сопротивления при движении в условиях сжатия льда как в автономном режиме, так и под

проводкой ледокола. Указанные проектные особенности были учтены при моделировании движения во льдах путем использования специальной методики оценки влияния ледовых сжатий на ледовую ходкость судов в зависимости от их размерений и режима движения во льдах [3].

Результаты расчетов средних эксплуатационных скоростей рассмотренных вариантов контейнеровоза на рассматриваемых маршрутах плавания по СМП применительно к фиксированному ледокольному обеспечению вариантов судна с ледовым классом **Arc7** приведены на рис. 4.

Для расчета эксплуатационно-экономических показателей были определены: расход топлива на ходу за рейс и за период эксплуатации, суммарное время рейса с учетом ходового и стояночного времени и количество рейсов.

Анализ выполненных расчетов эксплуатационных показателей позволяет сделать следующие выводы:

- использование фиксированной ледокольной проводки по всей трассе СМП в течение полугодия позволяет увеличить количество рейсов за эксплуатацию на один рейс за счет увеличения скорости судна;
- использование минимизированной ледокольной проводки ведет к росту расхода топлива при самостоятельном движении во льдах.

Выполненный расчет стоимости ледокольной проводки показал, что расходы на фиксированную ледокольную проводку более чем в два раза превышают расходы на минимизированный вариант

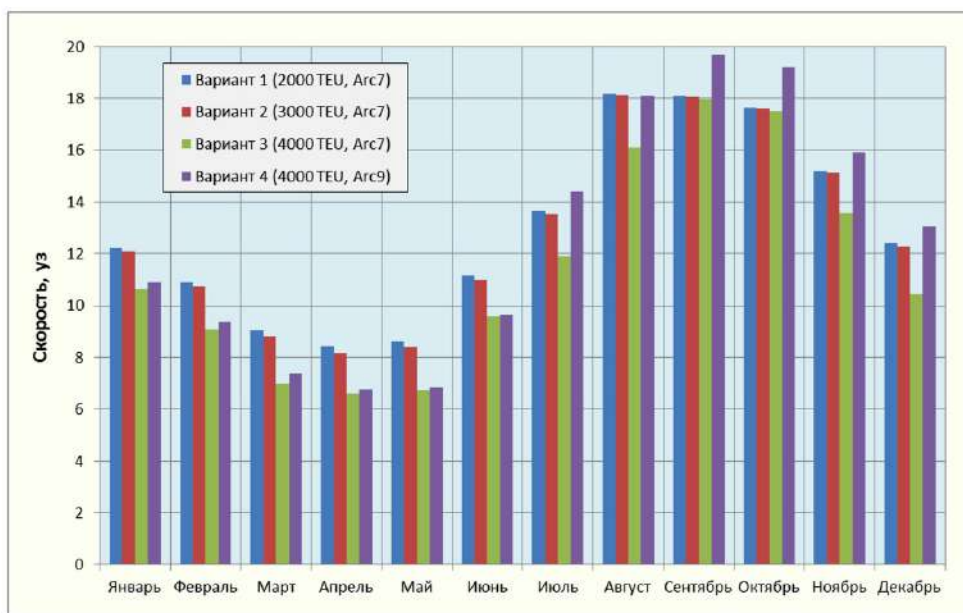
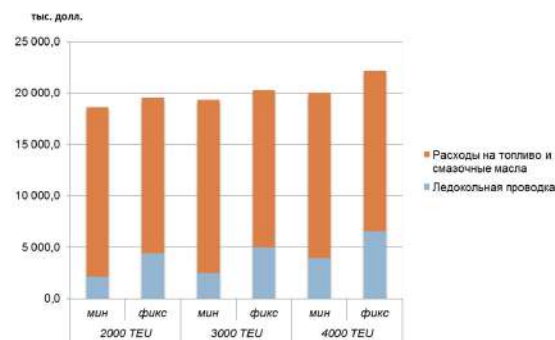


Рис. 4 Сравнение средних эксплуатационных скоростей различных вариантов контейнеровоза при моделировании плавания в акватории СМП при среднем типе ледовых условий (с фиксированным ледокольным обеспечением вариантов судна с ледовым классом **Arc7**)

проводки (см. рис. 5). Тем не менее, при введении скидки на ледокольную проводку 20 % и более (в расчетах 30 %), варианты с использованием фиксированной ледокольной проводки с учетом доходной части показывают лучший совокупный эффект.



лучший совокупный эффект.

Рис. 5 Расходы на топливо и ледокольную проводку контейнеровозов ледового класса Arc7 с различными вариантами их ледокольного обеспечения

На основании эксплуатационных показателей работы контейнеровоза были определены доходы от эксплуатации судна. Доходы от работы судна рассчитываются исходя из объема перевозки и фрахтовых ставок. Контейнерные перевозки, как правило, осуществляются в рамках линейного судоходства; это значит, что суда, работающие на контейнерной линии, следуют заранее известному маршруту и заходят в обозначенные порты по расписанию. Расчет доходов произведен в двух вариантах: на расчетную грузовую базу и на полную провозную способность в зависимости от контейнероёмкости судна.

Анализ полученных экономических показателей работы базовых вариантов контейнеровозов на расчетном направлении позволяет сделать следующие выводы:

- наибольшие эксплуатационные расходы получены для контейнеровоза вместимостью 4000 TEU ледового класса Arc9, что связано с его высокой стоимостью и значительными расходами на топливо;
- наименьшие эксплуатационные расходы получены для варианта контейнеровоза вместимостью 2000 TEU, что связано с меньшей строительной стоимостью и валовой вместимостью, на основе которых рассчитываются постоянные затраты в эксплуатации, ледокольная проводка и портовые сборы;
- в структуре эксплуатационных расходов наибольшую долю составляют расходы на топливо – от 58 % до 82 %, доля расходов на ледокольную проводку составляет от 18 % до 25 %;
- финансовый результат эксплуатации всех базовых вариантов контейнеровоза ледового

плавания на расчетном направлении является положительным.

Наилучшие результаты на линии Петропавловск-Камчатский – Мурманск при расчете на прогнозную грузовую базу получены для контейнеровоза вместимостью 3000 TEU, что связано с наилучшим соотношением грузоемкости и эксплуатационных затрат (табл. 3).

Таблица 3
Эксплуатационно-экономические показатели работы базовых вариантов контейнеровоза ледового плавления на расчетной линии за навигацию (на прогнозную грузовую базу)

Показатели	2000TEU	3000TEU	4000TEU	4000TEU Arc 9
Количество рейсов за эксплуатацию, ед.	20	20	19	20
Эксплуатационные расходы, млн долл.	23,5	24,5	26,6	34,9
Объем перевозки за эксплуатацию:				
TEU	35 000	46 200	46 360	48 800
тыс. т	455,0	600,6	602,7	634,4
Себестоимость перевозки 1 TEU, долл.	697	578	635	716
Доходы от перевозок, млн долл.	27,3	36,9	37,4	39,4
Финансовый результат, млн долл.	3,8	12,4	10,8	4,5
Простой срок окупаемости, лет	51,8	17,5	21,4	77,7

При расчете на максимальную провозную способность лучшие финансовые показатели имеет вариант судна контейнероёмкостью 4000 TEU. Имея одинаковые мощностные параметры, данный вариант судна может перевозить на 33 % больше груза, чем контейнеровоз на 3000 TEU, что значительно увеличивает доходы от его эксплуатации.

Тем не менее, стоит отметить, что для соблюдения ритмичности перевозок (с целью минимизации нахождения груза в порту) и эффективного использования грузоемкости судна за рейс более целесообразно использование варианта контейнероёмкостью 3000 TEU, чем варианта на 4000 TEU.

Дополнительный расчет эксплуатационно-экономических показателей при работе энергетической установки судна на судовом топливе стандарта MDO показал негативный эффект у всех вариантов судна и продемонстрировал рост эксплуатационных расходов, себестоимости перевозки и снижение финансового результата (см. рис. 6).

При выполнении оценки экономической эффективности базовых вариантов контейнеровоза ледового плавления повышенной контейнероёмкости был произведен расчет эксплуатационно-экономических показателей работ на направлении Азия – Европа транзитом по трассам СМП по аналогии с Южным морским путем. Данный вариант эксплуатации судна возможен в случае

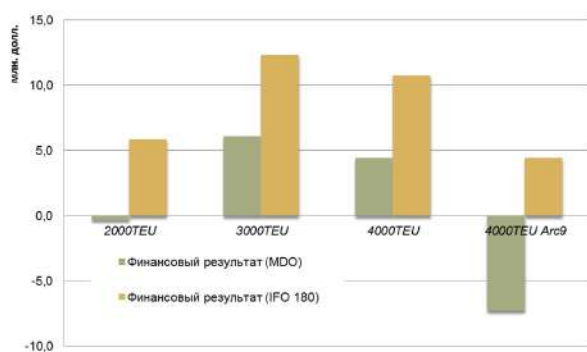


Рис. 6 Финансовый результат базовых вариантов контейнеровоза на расчетной линии за навигацию при различных типах судового топлива

задержки развития российских портов-хабов Мурманск и Петропавловск-Камчатский.

Расчетный маршрут следования включает ключевые порты Европы и Азии. Контейнерная линия протяженностью 9977 миль включает 8 портов: Шанхай – Пусан – Йокогама – Петропавловск-Камчатский – Мурманск – Орхус – Антверпен – Роттердам. Средняя длительность рейса составляет 31,2 сут с учетом стоянок в портах. Время хода варьируется от 20,8 до 30,1 сут в зависимости от ледовых условий и времени года.

Загрузка судна принята в размере 110 % с учетом погрузки/выгрузки в различных портах на протяжении маршрута следования. Средневзвешенная стоимость перевозки сформирована на основе анализа существующего уровня фрахтового рынка и составляет 1230 долл. за TEU (без учета обработки в порту).

В результате расчета контейнерной линии из Азии в Европу и обратно транзитом по трассам СМП получен положительный финансовый результат, а срок окупаемости (10,4 лет) не выходит за рамки нормативного срока службы судна. Провозная способность судна составила 470 тыс. т (36 тыс. TEU).

ВЫВОДЫ

В результате выполнения ТЭО рекомендуется к проектированию вариант контейнеровоза ледового класса **Arc7** вместимостью 3000 TEU, имеющий по

сравнению с вариантом контейнеровоза большей вместимости наряду с экономической целесообразностью следующие эксплуатационные преимущества:

- максимальная осадка в грузу не превышает 12,2 м, что позволяет использовать традиционные маршруты плавания по СМП, проходящие через пролив Санникова. Как показали расчеты, в этом случае достигается существенное увеличение средней эксплуатационной скорости движения контейнеровозов по СМП и обеспечивается минимум потребности в ледокольном обеспечении. Кроме того, при наличии достаточно интенсивного движения в зимний период по трассам СМП появляется возможность использования постоянного канала, проложенного через обширную зону припайного льда, охватывающего архипелаг Новосибирских островов и прилегающие мелководные районы моря Лаптевых и Восточно-Сибирского моря;

- отношение длины по ватерлинии к ширине (L/B) не превышает 7, что, как показал опыт эксплуатации и модельные испытания в ледовых бассейнах крупнотоннажных судов, позволяет обеспечить приемлемые маневренные характеристики во льдах.

По результатам выполненного ТЭО ЦНИИМФ были разработаны основные технико-эксплуатационные требования (ОТЭТ) на проектирование базового варианта арктического контейнеровоза ледового класса **Arc7** контейнеровместимостью 3000 TEU для высокоширотных линий СМП.

На основе ОТЭТ с учетом результатов выполненных исследований в рамках субконтракта ООО «Морское инженерное бюро – СПб» разработало эскизный и технический проекты арктического контейнеровоза для СМП (проект ICV51).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила плавания в акватории Северного морского пути. Утверждены приказом Минтранса России № 7 от 17 января 2013 г.
2. Цой Л.Г., Богданов А.А. Математическая модель движения судна во льдах под проводкой ледокола // Перспективные типы судов и их мореходные качества: Сб. научн. трудов ЦНИИМФ. – Л.: Транспорт, 1983. – С.95–99.
3. Штрек А.А. Проектные вопросы маневренности и ходкости при ледовых сжатиях перспективных крупнотоннажных судов арктического плавания // Морской Вестник. – 2013. – № 4(48). – С. 90–93.

УДК 629.54

НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЕ СУДА В СОВРЕМЕННОЙ МОРСКОЙ ИНДУСТРИИ. ОБЗОР

О.А. Чернов, ФАУ «Российский морской регистр судоходства», Санкт-Петербург, e-mail: chernov.oa@rs-class.org

Приведена краткая история советского и российского научно-исследовательского флота. Рассмотрены основные особенности, характерные для научно-исследовательских судов. Приведен развернутый перечень крупных научно-исследовательских судов, построенных в XXI в. На основе анализа мирового научного флота отмечены основные тенденции в современном судостроении данного типа судов, рассмотрены возможности дальнейшей эксплуатации ранее построенных судов.

Ключевые слова: научно-исследовательское судно, Мировой океан, мировой научный флот.

RESEARCH VESSELS IN THE MODERN MARITIME INDUSTRY. REVIEW

O.A. Chernov, FAI "Russian Maritime Register of Shipping", St. Petersburg, e-mail: chernov.oa@rs-class.org

The article deals with the short history of the Soviet Union and Russian research fleet. The main features inherent in the research vessel are described hereunder. The detailed list of the large research vessels constructed in the 21st century is provided. On the basis of the world research fleet review the main trends in modern shipbuilding of this type of vessel have been emphasized and the possible further service of the previously built ships has been considered.

Keywords: research vessel, World Ocean, world's scientific fleet.

ВВЕДЕНИЕ

В течение многих лет научно-исследовательские суда (НИС) и связанные с ними технологии развивались и совершенствовались и позволяют на современном высоком научно-техническом уровне проводить исследования:

- свойств воды:

физических (температура, прозрачность, скорость и направления течений, волнения, турбулентность на разных глубинах и т.д.) – гидрологические исследования;

химических (состав, соленость воды, содержание биогенных веществ и газов и др.) – гидрохимические исследования;

законов распространения звука в морской воде – гидроакустические исследования;

- дна океана:

пробы и анализ грунтовых пород морского дна – геологические исследования;

измерение магнитного, гравитационного и электрического полей, радиометрия, сейсморазведка и др. – геофизические исследования;

прибрежные и морские промеры, составление карт и лоций – гидрографические исследования;

- метеорологические: определение температуры, влажности и давления воздуха, скорости и направления ветра, солнечной радиации;

- биологические: изучение водной флоры и фауны;

- экологические: взаимоотношение морской биосферы и окружающей среды.

Приведенный перечень подразумевает наличие на борту НИС различного оборудования, позволяющего проводить соответствующие исследования. Это означает, что НИС являются судами, наиболее оснащенными технически и технологически.

1. НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЕ СУДА В МИРОВОМ СУДОСТРОЕНИИ

В последние полтора десятка лет интерес человека к изучению Мирового океана возрос, о чем свидетельствует существенное увеличение строящихся НИС. Так, если в 2000 – 2004 гг. было построено всего 10 судов, то в 2010 – 2014 гг. – 42 судна.

По состоянию на март 2016 г. в мире насчитывалось 961 НИС (категории *Research Survey Vessel* и *Icebreaker/Research* в терминологии IHS) общей валовой вместимостью 2,04 млн т, что в масштабах совокупного мирового флота составляет чуть менее 2 % по количеству и около 0,2 % по тоннажу (см. табл. 1 и 2) [4].

Предполагается, что в дальнейшем большие НИС, обладающие способностью нести больше

Таблица 1
Количество и валовая вместимость НИС, построенных
в разные периоды [6]

Годы постройки	Количество построенных НИС (из них – существующих)	Валовая вместимость, т
До 1970	443 (132)	527402 (92538)
1970-е	274 (151)	379443 (151012)
1980-е	340 (246)	536551 (338935)
1990-е	201 (166)	576422 (531574)
2000-е	137 (123)	417899 (376002)
2010-е	189 (143)	775 964 (547559)
Всего	1584 (961)	3213681 (2037620)

Таблица 2
Количество существующих НИС различной валовой
вместимости

Валовая вместимость, т	Количество
До 500	387
500–1000	138
1000–2000	150
2000–3000	81
3000–4000	55
4000–5000	40
5000–10000	75
>10000	35

оборудования и дольше находиться вдали от пунктов базирования, будут широко востребованы для обеспечения мультидисциплинарного подхода к изучению Мирового океана. Однако постройка высокотехнологичных судов – дорогостоящее мероприятие, требующее значительных капиталовложений. Поэтому для постройки НИС логичным видится вопрос о необходимости максимально активного участия государства в выделении ресурсов на строительство научно-исследовательского флота.

Следует отметить, что в настоящее время развиваются методы дистанционного зондирования и моделирования, совершенствуются технологии автономных необитаемых исследовательских аппаратов. Это постепенно изменяет роль флота, ведь судно в такой ситуации все чаще выступает в качестве платформы для запуска и управления такими средствами. Однако следует полагать, что потребность в НИС не будет снижаться.

2. КРАТКАЯ ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ РОССИЙСКОГО НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ФЛОТА

История российских исследований морей и океанов берет начало с середины XVII века, при этом постепенно они распространялись на все районы Мирового океана. Нацеленные на отыскание удобных морских путей, обследование берегов и проливов, экспедиции в то же время

собирали огромный научный материал, охватывающий астрономию, метеорологию, гидрологию, картографию, а используемые суда и их оснащение все больше приспособлялись не только к плаванию в суровых ледовых условиях, но и для решения научных задач. Как пример напомним, что русские мореплаватели Ф. Беллинсгаузен и М. Лазарев были первыми, кто увидел берега Антарктиды в январе 1820 г. В XX веке важную роль в освоении Антарктиды сыграл ледокольный транспорт – дизель-электроход «Обь», построенный в Голландии под наблюдением советских инженеров в 1953 г. С 1954 г. в исследованиях тихоокеанского бассейна участвовал «Витязь» – первое крупное НИС в составе академического флота СССР, переоборудованное из германского судна «Марс». Вместе с ним и некоторыми другими крупными судами большой объем океанографических и гидробиологических исследований выполняли малые экспедиционные суда. В основном, это были переоборудованные средние рыболовные траулеры, такие как «Гидролог», «Первенец» и др.

В Советском Союзе хорошо понимали важность и ценность исследований в Антарктиде. Для этого в 1955 г. была организована первая Комплексная Антарктическая экспедиция под руководством М.М. Сомова. В настоящее время ежегодно к берегам Антарктиды отправляются суда Российской Антарктической экспедиции для продолжения обширного комплекса научных наблюдений.

В 1961 г. по инициативе ЮНЕСКО в Токио прошел форум по исследовательским судам. В результате были выработаны общие принципы классификации и проектирования НИС, которыми в дальнейшем руководствовались в практике отечественного и иностранного судостроения.

Первым НИС, построенным в 1965 г. на верфи г. Висмар (ГДР) на базе проекта, по которому строились пассажирские теплоходы типа «Михаил Калинин», стал «Академик Курчатов». За ним для СССР были построены еще шесть научных судов: «Профессор Визе», «Академик Сергей Королев», «Академик Ширшов», «Профессор Зубов», «Академик Вернадский», «Дмитрий Менделеев», а в 1980-е гг. – такие суда как «Академик Мстислав Келдыш» (1980 г.) с подводными аппаратами «Мир-1» и «Мир-2» на борту, «Академик Фёдоров» (1987 г.), который по-прежнему является одним из флагманов академического флота России. К началу 1991 г. численность исследовательского флота Советского Союза составляла 293 судна общей валовой вместимостью 537 928 т.

После распада СССР и в связи с переходом к рыночной экономике научно-исследовательский флот Российской академии наук стал насчитывать всего 24 судна, из них 16 судов неограниченного района плавания.

К новейшей истории российского научно-исследовательского флота относится научно-экспедиционное судно (НЭС) «Академик Трёшников», построенное в 2012 г. на «Адмиралтейских верфях».

3. ОСОБЕННОСТИ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ СУДОВ

НИС (экспедиционными) судами считаются морские, озерные и речные суда, которые предназначены для изучения водных масс, морского дна, атмосферы и космического пространства (см. табл. 3). Такие суда строятся, как правило, по специально разработанным проектам, что, однако, не исключает практики переоборудования НИС из судов другого целевого назначения. Из существующих сегодня НИС лишь 56 построены по спецпроектам.

Содержание и способы проведения исследовательских работ в море по большей части

Таблица 3
Условная классификация типов НИС [3]

Тип судна, валовая вместимость	Назначение
Крупные экспедиционные суда, > 6000 т	Проведение комплексных экспедиций для изучения удаленных акваторий и малоисследованных районов Мирового океана
Универсальные НИС, 1900 – 4200 т	Проведение фундаментальных тематических исследований океана. Ограниченные исследования в области биологии моря
Океанографические съемочные суда, 2500 – 3800 т	Проведение стандартных съемок: топографии дна, структуры физических полей Земли, течений и других океанологических элементов. Сбор проб грунта и воды на различных глубинах. Сейсмоакустические исследования
Гидрографические суда, 500 – 3000 т	Стандартные промеры глубин, замеры течений и сбор других сведений, необходимых для лоций и морских карт
Метеорологические суда, 2200 – 5000 т	Проведение систематических метеонаблюдений в заданном районе. Сбор и передача информации на корабли, суда и самолеты. Использование в качестве радиомаяка. Исследование волнений моря, проведение многосуточных океанологических станций
Научно-промысловые суда, 1000 – 3000 т	Проведение исследований и морской промысел
Рыболовно-исследовательские суда, 500 – 2000 т	Рыболовство и проведение исследований
Исследовательские суда специального назначения, 500 – 2000 т	Проведение исследований по геологии и топографии дна, акустические, магнитные и другие исследования прикладного характера
Арктические исследовательские суда, > 5000 т	Комплексные исследования арктических районов Мирового океана

определяют главные размерения и архитектуру НИС. Для обслуживания научной аппаратуры рабочие палубы располагают как можно ближе к воде, уменьшая осадку для плавания на мелководье. Предусматривается избыточная высота надводного борта во избежание заливания палубы водой. Чтобы наиболее рационально разместить на борту научное оборудование, повысить маневренность и остойчивость судна, часто обеспечивается отношение длины к ширине судна в пределах 4,3 – 4,7 в сочетании с высоким надводным бортом [3]. Так, у НИС серии, построенной в 2009 – 2012 гг. для компании *Polarcus DMC*, длина 92 м, ширина 23,7 м; у НИС серии для *WesternGeco Ltd*, построенной в Испании в 2009 – 2011 гг., длина 88,8 м, ширина 19,0 м. Впрочем, НЭС «Академик Трёшников» не соответствует указанной особенности: его длина 133,5 м, а ширина 23 м.

Мореходные качества судов должны обеспечивать безопасность плавания и наиболее благоприятные условия для производства научных исследований и первичной обработки полученной в море информации. В будущем весьма вероятно изменение указанного подхода: получаемые данные будут пересылаться на берег в режиме реального времени с использованием спутниковых каналов связи. Такой подход позволит «береговым» исследователям участвовать удаленно в исследованиях океана [2].

Среди перспективных направлений развития научно-исследовательского флота и исследования Мирового океана стоит отметить потенциал, связанный с реализацией принципов по управлению Большими Данными (*Big Data*): тысячи судов, совершающих тысячи рейсов, постоянно осуществляют измерение различных параметров Мирового океана и смежных сред. Сбор и систематизация этого огромного массива данных видятся весьма полезными для целей анализа, выявления тенденций и прогнозирования параметров, характеризующих исследуемые объекты.

Говоря о продолжительности работы в море, стоит отметить, что до 50 – 80 % общей продолжительности рейса НИС плавают на самых малых ходах или лежат в дрейфе. В связи с этим предъявляются особые требования к **маневренности** и **управляемости**, особенно в малоизученных районах, а также во время работы на морских якорных станциях, когда судно должно сохранять постоянно заданное место без хода, а опущенные тросы с исследовательской аппаратурой находиться в вертикальном положении. Для этого суда зачастую оборудуются системой динамического позиционирования.

С другой стороны, работа дополнительного оборудования, предназначенного для корректировки положения судна, отрицательно сказывается на его

вибро-акустических характеристиках, повышая шумность и снижая качество проводимого исследования.

Гидродинамика корпуса НИС проектируется таким образом, чтобы снизить влияние шума, вызываемого корпусом, на работу датчиков и оборудования. Некоторые исследовательские суда оборудуются специальным опускаемым килем (*drop keel*), на котором устанавливается часть исследовательского оборудования (в основном, небольших размеров, например, профилографы течений и эхолоты). Более крупные устройства, такие как многолучевые эхолоты (основа гидроакустического комплекса, предназначены для съемок рельефа дна на глубинах, у «Академика Трёшников» – до 6000 м), иногда достигающие нескольких метров в ширину и длину, устанавливаются либо непосредственно на дне судна, либо в выносной гондоле, позволяющей снизить уровень шумов, но повышающей расход топлива (иногда на 15 – 20 %).

При расчете **остойчивости** НИС учитывается, в частности, что до 30 % их водоизмещения могут занимать жидкие грузы, расход которых в течение рейса заметно ухудшает остойчивость судна. Поэтому для ее сохранения предусматривается увеличенная поперечная метацентрическая высота.

Непотопляемость НИС часто обеспечивается при затоплении любых двух смежных отсеков судна, особое внимание уделяется обеспечению непотопляемости при поступлении заборной воды в носовые отсеки, наиболее подверженные повреждению в малоизученных районах Мирового океана.

Автономность плавания НИС является весьма важным фактором, влияющим на экономическую эффективность работы НИС, поскольку отрыв от проведения исследований с целью пополнения запасов является довольно дорогостоящим мероприятием.

Энергетическая установка НИС должна обеспечивать, с одной стороны, сниженные скорости вплоть до десятых долей узла во время проведения наблюдений на станциях, а с другой – достаточно высокие скорости при выполнении переходов. Скорость НИС, которые были построены с начала XXI века, колеблется в среднем от 12 до 20 уз.

Часть датчиков и сенсоров НИС предназначена для улавливания акустических волн. Среди них различные эхолоты, профилографы, в том числе – доплеровские профилографы течений (*Acoustic Doppler Current Profilers, ADCP*). Для оптимальной работы таких устройств необходим пониженный уровень посторонних шумов, которые могут

негативно отразиться на качестве исследования. Однако применяемые меры по снижению их уровня значительно повышают стоимость судна.

Широкий спектр дисциплин, изучаемых современными НИС, требует наличия на них большого числа различных лабораторий. Нередко используется контейнеризованный формат лабораторий, обеспечивающий мобильность и модульную функциональность. Так, например, на НЭС «Академик Трёшников» на открытой палубе второго яруса надстройки установлены четыре мобильных лаборатории контейнерного типа, которые предназначены для проведения различных видов работ и могут оснащаться оборудованием заказчика работ. Помимо этого, на судне имеется 11 штатных лабораторий. Общая площадь лабораторий составляет около 250 м².

Для погружения в воду крупного и технически сложного оборудования НИС оборудуются специальными кранами и лебедками. Например, НЭС «Академик Трёшников» имеет 5 исследовательских лебедок, П-образную раму, кранбалки. Одна из лебедок, расположенная на палубе судна, предназначена для исследования океанских вод с использованием зондирующего комплекса SBE-911plus, датчики которого рассчитаны для работы на глубинах до 6000 м. Данная лебедка является основой океанографического комплекса судна. Помимо нее на судне имеется расположенная в кормовой части на палубе П-образная рама и используемые с ней две тросовые 6-тонные лебедки. Емкость барабанов лебедок – 6000 м троса диаметром 12 мм. Лебедки и П-образная рама предназначены для работы с различными буксируемыми устройствами, а также для работы с драгами, грунтозаборными трубками, дночерпателями. Кроме того, на палубе надстройки 2-го яруса установлены две тросовые лебедки (по правому и левому бортам) для производства гидробиологических и океанографических работ с планктонными сетями, автономными STD-зондами, другими малогабаритными приборами. Барабан вмещает 2000 м стального троса диаметром 5 мм.

4. СТАТИСТИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОМ ФЛОТЕ

Следует отметить, что средняя валовая вместимость одного НИС, построенного в таких странах, как Норвегия, Польша, Китай, заметно больше остальных (см. табл. 4).

Таблица 4
Страны-судостроители научного флота. Количество и совокупная валовая вместимость построенных судов

Страна	Количество построенных судов (из них – существующих)	Валовая вместимость построенных (существующих) судов, т	Средняя валовая вместимость построенного (существующего) судна, т
США	238(149)	415756 (220553)	1747 (1480)
Россия и СССР	161(79)	272095 (86031)	1690 (1089)
Германия	160(80)	248542 (136761)	1553 (1710)
Китай	109(69)	334923 (219287)	3073 (3178)
Норвегия	103(82)	363425 (305914)	3528 (3731)
Япония	93(56)	252012 (134835)	2710 (2408)
Велико-британия	92(38)	172510 (100744)	1875 (2651)
Польша	77(49)	241417 (167651)	3135 (3421)
Финляндия	68(33)	116455 (73420)	1713 (2225)

Интересно также рассмотреть распределение научно-исследовательского флота по классификационным обществам, а также по флагам регистрации, где понятие «удобного флага» распространено в меньшей степени по сравнению с торговым флотом (см. табл. 5 и 6) [4].

Перечень стран, в которых построено наибольшее количество крупных (более 4000 т) НИС, выглядит следующим образом: Китай (20 судов, 181567 т), Польша (12 судов, 110222 т), Испания (10 судов, 68220 т), ОАЭ (8 судов, 51653 т), Япония

Таблица 5
Флаги регистрации НИС

Флаг	Количество судов	Валовая вместимость, т
США	107	183948
Россия	74	131821
Китай	70	233189
Панама	67	224989
Багамы	46	238537
Германия	38	51633
Норвегия	37	180369
Индия	25	44509
Канада	22	20372
Япония	21	54331

Таблица 6
Классификационные общества научно-исследовательского флота (включая совместный и двойной класс)

Класс	Количество судов	Валовая вместимость, т
DNV, DNV GL	139	823201
ABS	79	194372
RS	70	136346
BV	64	157682
CCS	49	214439
LR	48	78109
GL	45	80399

(7 судов, 105825 т), Румыния (7 судов, 69220 т), США (6 судов, 45978 т), Норвегия (4 судна, 32866 т) и всего 3 – в России (26754 т). Данные по НИС приведены в табл. 7.

Таблица 7
Перечень НИС, построенных в XXI в., валовой вместимостью более 4000GT

Название	Год –месяц постройки	Статус	GT	Флаг	Класс	Страна постройки	Владелец	Оператор
POLAR MARQUIS	2000-01	Существует	13339	Норвегия	DNV	Норвегия	Rieber AS	Dolphin Geophysical AS
BRUCE C. HEEZEN	2000-01	"	4201	США	ABS	США	United States Govt	MSC USA Govt Dept
OCEANIC CHALLENGER	2000-11	"	7127	Франция	BV	Румыния	CGGVeritas	Geofield Ship Management Serv
OCEANIC PHOENIX	2000-12	"	11368	Франция	BV	Япония	DOF ASA	Geofield Ship Management Serv
IMPECCABLE	2001-03	"	5484	США	ABS	США	United States Govt	MSC USA Govt Dept
HAI YANG SHI YOU 718	2001-07	"	5082	Панама	CCS	КНР	China National Offshore Oil	China Oilfield Services Ltd
PROTECTOR	2001-09	"	4985	Великобритания	DNV	Норвегия	United Kingdom Govt	United Kingdom Govt MOD-Navy
MARY SEARS	2001-12	"	4201	США	ABS	США	United States Govt	MSC USA Govt Dept
VANTAGE	2002-04	"	8186	Норвегия	DNV	Польша	Eidesvik Offshore ASA	Eidesvik AS
EDDA FONN	2003-06	"	4505	Норвегия	DNV	Румыния	Ostensjo Rederi AS	Ostensjo Rederi AS
POURQUOI PAS	2005-07	"	7854	Франция	BV	Франция	France Govt	Genavir Centre Ifremer
SEA VENTURE	2005-09	"	9926	США	ABS	США	Edison Chouest Offshore LLC	Edison Chouest Offshore LLC

Продолжение табл. 7

Название	Год –месяц постройки	Статус	GT	Флаг	Класс	Страна постройки	Владелец	Оператор
MARIA S. MERIAN	2006-02	Существует	5573	Германия	GL	Польша	Germany Govt	Briese Schiffahrts GmbH & Co
JAMES COOK	2006-08	"	5401	Великобритания	LR	Польша	NERC	NMF - Sea Systems
HUGIN EXPLORER	2006-12	"	6328	Кипр	DNV	Польша	Siem Offshore AS	Siem Offshore AS
GEO BARENTS	2007-06	"	4979	Норвегия	DNV	Румыния	Uksnoy & Co AS	Uksnoy & Co AS
GEO CELTIC	2007-08	"	12109	Франция	BV	Польша	CGGVeritas	Geofield Ship Management Serv
YUAN WANG 5	2007-09	"	22686	КНР	CCS	КНР	China Govt	China Satellite Launch
SAGAR NIDHI	2007-12	"	5050	Индия	IRS DNV	Италия	India Govt	SCI
R A M F O R M SOVEREIGN	2008-03	"	13688	Сингапур	DNV	Румыния	PGS	PGS Exploration Norway AS
YUAN WANG 6	2008-04	"	22686	КНР	CCS	КНР	China Govt	China Satellite Launch
EDDA FLORA	2008-07	"	6074	Норвегия	DNV	Россия	Ostensjo Rederi AS	Ostensjo Rederi AS
O C E A N I C ENDEAVOUR	2008-07	"	11570	Панама	DNV	Швеция	Volstad Maritime AS	Eidesvik AS
GEO CARIBBEAN	2008-11	"	12108	Франция	BV	Польша	CGGVeritas	CGGVeritas
BOA THALASSA	2008-12	"	5061	Каймановы о-ва	DNV	Польша	Boa Offshore AS	EMGS
G E O W A V E VOYAGER	2009-02	"	7969	Либерия	GL	Россия	CGGVeritas	Wavefield Inseis AS
WG COLUMBUS	2009-03	"	6922	Кипр	DNV	Испания	WesternGeco LLC	WesternGeco Ltd
R A M F O R M STERLING	2009-06	"	13721	Багамы	DNV	Румыния	PGS	PGS Exploration Norway AS
BOA GALATEA	2009-07	"	5061	Каймановы о-ва	DNV	КНР	Boa Offshore AS	EMGS
WG MAGELLAN	2009-07	"	6922	Кипр	DNV	Испания	WesternGeco LLC	WesternGeco Ltd
ARAON	2009-09	"	7507	Южная Корея	KR	Южная Корея	Korea South Govt KIOST	Korea South Govt KIOST
SEABED PRINCE	2009-09	"	4398	Норвегия	DNV	Турция	Volstad Shipping AS	Swire Seabed Shipping AS
SANCO SPIRIT	2009-10	"	4396	Гибралтар	DNV	Норвегия	Sanco Shipping AS	Sanco Shipping AS
POLARCUS NADIA	2009-12	"	6578	Багамы	DNV	ОАЭ	Global Skipsholding 2 AS	Polarcus DMCC
POLARCUS NAILA	2010-02	"	6667	Багамы	DNV	ОАЭ	Polarcus DMCC	Polarcus DMCC
WG AMUNDSEN	2010-02	"	6926	Кипр	DNV	Испания	WesternGeco LLC	WesternGeco Ltd
GEO CASPIAN	2010-02	"	12708	Панама	DNV	Швеция	Volstad Maritime AS	Fugro-Geoteam AS
PGS APOLLO	2010-03	"	7131	Багамы	DNV	Испания	н/д	PGS Geophysical AS
WG TASMAN	2010-03	"	6599	Кипр	DNV	ОАЭ	WesternGeco LLC	WesternGeco Ltd
WG VESPUCCI	2010-04	"	6926	Кипр	DNV	Испания	н/д	WesternGeco Ltd
HAI YANG LIU HAO	2010-04	"	4335	КНР	CCS	КНР	Guangzhou Marine Geological	Guangzhou Marine Geological
V O L S T A D SURVEYOR	2010-05	"	4398	Мальта	DNV	Турция	Volstad Shipping AS	Volstad Shipping AS
POLAR DUKE	2010-06	"	7131	Кипр	DNV	Испания	Rieber AS	Dolphin Geophysical AS
OCEANIC VEGA	2010-07	"	12550	Норвегия	DNV	Польша	Eidesvik Offshore ASA	Eidesvik AS

Продолжение табл. 7

Название	Год –месяц постройки	Статус	GT	Флаг	Класс	Страна постройки	Владелец	Оператор
POLARCUS ASIMA	2010-08	Существует	7894	Багамы	DNV	ОАЭ	Polarcus DMCC	Polarcus DMCC
WG COOK	2010-08	"	6599	Кипр	DNV	ОАЭ	WesternGeco LLC	WesternGeco AS
GEO CORAL	2010-08	"	12812	Франция	BV	Польша	CGGVeritas	CGGVeritas
POLARCUS ALIMA	2011-03	"	7894	Багамы	DNV	ОАЭ	Polarcus DMCC	Polarcus DMCC
B A R B A R O S HAYREDDIN PASA	2011-03	"	4711	Турция	DNV	ОАЭ	Turkiye Petrolleri	Turkiye Petrolleri
HAI YANG SHI YOU 720	2011-04	"	13061	КНР	CCS	КНР	China National Offshore Oil	China Oilfield Services Ltd
V Y A C H E S L A V TIKHONOV	2011-08	"	4711	Россия	RS DNV	ОАЭ	Polarcus DMCC	SCF Novoship JSC
BGP PROSPECTOR	2011-09	"	10732	Багамы	DNV	Южная Корея	н/д	BGP Geoprospector Pte Ltd
OCEANIC SIRIUS	2011-10	"	12550	Норвегия	DNV	Польша	Eidesvik Invest AS	Eidesvik AS
POLAR DUCHESS	2011-11	"	7142	Кипр	DNV	Испания	Rieber AS	Dolphin Geophysical AS
HAI YANG SHI YOU 708	2011-12	"	7847	КНР	DNV CCS	КНР	China National Offshore Oil	China Oilfield Services Ltd
H O W A R D O . LORENZEN	2011-12	"	17420	США	ABS	США	United States Govt	MSC USA Govt Dept
HAKUREI	2012-01	"	6283	Япония	NK	Япония	Japan Oil Gas & Metals	Japan Oil Gas & Metals
POLARCUS AMANI	2012-03	"	7709	Багамы	DNV	Украина	Polarcus DMCC	Polarcus DMCC
S. A. AGULHAS II	2012-04	"	12897	ЮАР	DNV	Финляндия	South Africa Govt	South Africa Govt Affairs
POLARCUS ADIRA	2012-06	"	7709	Багамы	DNV	Украина	Polarcus DMCC	Polarcus DMCC
KE XUE	2012-06	"	4711	КНР	CCS	КНР	н/д	Oceanology Academic Sciences
A K A D E M I K TRYOSHNIKOV	2012-12	"	12711	Россия	RS	Россия	Russia Govt	Arctic & Antarctic Research
RAMFORM TITAN	2013-05	"	20637	Багамы	DNV	Япония	PGS	PGS Geophysical AS
SANCO SWIFT	2013-07	"	8772	Гибралтар	DNV	Польша	Sanco Shipping AS	Dolphin Geophysical AS
DISCOVERY	2013-07	"	5954	Великобритания	LR	Испания	NERC	NMF - Sea Systems
S A M U D R A RATNAKAR	2013-09	"	6551	Индия	IRS DNV	Южная Корея	India Govt	Geological Survey of India
FUGRO VOYAGER	2013-09	"	4644	Сингапур	DNV	Индия	ICON Investments	Fugro Singapore Pte Ltd
FA XIAN 6	2013-09	"	10882	КНР	DNV CCS	КНР	Sinopec	SINOPEC
S I N D H U SADHANA	2013-12	"	4154	Индия	IRS	Индия	н/д	Institute of Oceanography Goa
RAMFORM ATLAS	2014-01	"	20637	Багамы	DNV	Япония	PGS	PGS Geophysical AS
X I A N G Y A N G HONG 10	2014-01	"	4502	КНР	CCS	КНР	н/д	Zhejiang Tehe Shipping Co Ltd
SANCO SWORD	2014-03	"	8772	Гибралтар	DNV	Польша	Sanco Shipping AS	Sanco Shipping AS
A M A Z O N WARRIOR	2014-06	"	21195	Панама	DNV	Германия	WesternGeco LLC	WesternGeco Fleet Management
HAI YANG SHI YOU 721	2014-07	"	13075	КНР	CCS	КНР	China National Offshore Oil	China Oilfield Services Ltd
INVESTIGATOR	2014-08	"	6082	Австралия	LR	Сингапур	Australia Govt	ASP Ship Management Pty Ltd
SONNE	2014-09	"	8554	Германия	GL	Германия	Germany Govt	Germany Govt
FUGRO SCOUT	2015-02	"	4641	Сингапур	DNV	Индия	ICON Investments	Fugro-McClelland Marine
MARJATA	2015-03	"	5000	Норвегия	н/д	Румыния	Norway Govt	Norway Govt Sjoforsvarets

Окончание табл. 7

Название	Год –месяц постройки	Статус	GT	Флаг	Класс	Страна постройки	Владелец	Оператор
A M A Z O N CONQUEROR	2015-03	Существует	22850	Панама	DNV	Германия	WesternGeco LLC	WesternGeco Fleet Management
POLAR EMPRESS	2015-05	"	10146	Норвегия	DNV	Норвегия	Rieber AS	Dolphin Geophysical AS
HAI YANG SHI YOU 707	2015-12	"	4102	КНР	CCS	КНР	China National Offshore Oil	China Oilfield Services Ltd
HAI YANG SHI YOU 760	2015-12	"	5941	КНР	CCS	КНР	China National Offshore Oil	China Oilfield Services Ltd
XIANG YANG HONG 03	2016-01	"	4813	КНР	CCS	КНР	China Govt	China Govt TIO
MAURY	2016-02	"	4746	США	ABS	США	United States Govt	MSC USA Govt Dept
R A M F O R M TETHYS	2016-03	Строится	20700	Багамы	DNV	Япония	PGS	PGS Geophysical AS
V A R A D A EMPRESS	2016-03	"	5767	н/д	DNV	Индия	Varada Marine AS	Neyah Ship Management & Cons
KAIMEI	2016-04	"	5500	Япония	NK FA	Япония	JAMSTEC	JAMSTEC
ISABU	2016-04	"	5900	Южная Корея	KR	Южная Корея	Korea South Govt KIOST	Korea South Govt KIOST
MTA TURKUAZ	2016-04	"	5000	Турция	TL	Турция	Turkey Govt	Turkey Govt
YUAN WANG 7	2016-04	"	27180	КНР	CCS	КНР	China Govt	China Satellite Launch
XIANG YANG HONG 01	2016-05	"	4800	КНР	CCS	КНР	н/д	China Govt FIO
PGS ARTEMIS	2016-06	"	7450	Кипр	н/д	Испания	н/д	н/д
ZHANG JIAN	2016-06	"	4430	КНР	н/д	КНР	China Govt	Shanghai Ocean University
R A M F O R M HYPERION	2016-08	"	20700	Багамы	DNV	Япония	PGS	PGS Geophysical AS
CARRASCO	2016-08	"	5716	Перу	DNV	Испания	Peru Govt	Peru Govt Min de Defensa
S H A N G H A I SHIPYARD 8009	2017-01	"	4820	КНР	CCS	КНР	н/д	China Govt Qingdao Institute
S H A N G H A I SHIPYARD 8010	2017-11	"	6803	КНР	CCS	КНР	China Govt	China Govt Guangzhou Marine
K R O N P R I N S HAAKON	2016-09	Заказано	9000	Норвегия	DNV	Италия	Norway Govt	Havforskninginstituttet
JIANGNAN H2623	2018-01	"	4750	КНР	CCS	КНР	Ocean Univeristy of China	Ocean Univeristy of China
CAMMELL LAIRD 1390	2019-01	"	10000	Фолклендские о-ва	LR	Великобритания	NERC	British Antarctic Survey
DAMEN SCHELDE 417	2019-04	"	20200	Австралия	LR	Румыния	н/д	н/д
Всего:	101	–	899175	–	–	–	–	–
Примечания: 1. Если указано DNV, то класс либо DNV, либо DNV GL. 2. н/д – нет данных.								

Анализ приведенных в табл. 7 сведений позволяет выделить следующие наиболее важные закономерности.

Количество построенных судов год от года увеличивалось:

● в 2000 – 2004 гг. было построено всего 10 судов суммарной валовой вместимостью 68478 т;

● в 2005 – 2009 гг. – 24 судна (214567 т);

● в 2010 – 2014 гг. – 42 судна (385175 т).

Распределение числа построенных судов в зависимости от валовой вместимости представлено в табл. 8.

Таблица 8

Валовая вместимость, т	Количество построенных судов
4000–5000	23
5000–6000	15
6000–7000	14
7000–8000	13
8000–10000	6
10000–12000	6
12000–13000	8
13000–18000	5
20000–28000	10

18 судов из приведенного перечня ходят под флагом КНР (171424 т), 13 – Багамов (158709 т), 11 – Норвегии (90727 т), 10 – Кипра (68945 т), 6 – США (45978 т), 2 – России (17422 т).

55 судов находятся в классе DNV и DNV GL (502804 т), 18 – CCS (172076 т), 6 – ABS (45978 т), 6 – BV (63378 т), 2 – RS (17422 т).

13 судов принадлежат китайскому правительству и различным государственным органам КНР (142456 т), 6 – PGS, Petroleum Geo-Services (110083 т), 6 – Polarcus, ОАЭ (42584 т), 5 – США (36052 т), 7 – WesternGeco LLC (78013 т).

ВЫВОДЫ

Результаты анализа тенденций развития современного научно-исследовательского флота и особенностей его эксплуатации указывают на

необходимость усиления роли государства при формировании и реализации решений по строительству новых НИС. Существующая в России технологическая база для проектирования и постройки исследовательского флота требует значительных капиталовложений, осуществлению которых должны предшествовать всесторонние исследования и анализ актуальных проблем и аспектов, присутствующих в данной отрасли. Одним из таких аспектов является мультидисциплинарный подход к исследованию Мирового океана, требующий, чтобы строящиеся суда были технически оснащенными и способными эффективно выполнять свои функции максимально длительное время с учетом стремительного развития информационных технологий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Научно-техническое оснащение НЭС «Академик Тreshников»: итоги первого научного рейса. Н.Н. Антипов, А.А. Артамонов, А.В. Воеводин, Е.М. Колтышев, М.Ю. Романов (АНИИ). – 2013.
2. Science at Sea. Meeting Future Oceanographic Goals with a Robust Academic Fleet. The National Academic Press. 2009.
3. Краснов В.Н. История научно-исследовательского флота Российской академии наук. – М.: Наука, 2005.
4. UNCTAD. Review of Maritime Transport. Обзоры морского транспорта.
5. Концепция управления национальным имуществом. Акад. Львов Д.С. – М.: Институт экономических стратегий, 2002.
6. База данных Sea-Web (www.sea-web.org).

ОБОЗРЕНИЕ: ПОД ТЕХНИЧЕСКИМ НАБЛЮДЕНИЕМ РС

Новый RST27 спущен на воду

25 марта 2016 г. на АО «Завод «Красное Сормово» состоялся спуск на воду очередного в серии танкера типа «река-море» проекта RST27 (стр. № 18). Судно строится под техническим наблюдением Регистра. Символ класса: **KM Ice1 R2 AUT1-ICS OMBO VCS ECO-S Oil tanker (ESP)**.

В торжественной церемонии приняли участие генеральный директор ООО «БФ Танкер» Дмитрий Олерский, генеральный директор Группы компаний «Морские и нефтегазовые проекты» Дмитрий Хритин, руководство судоверфи, представители РС.

Суда повышенного экологического класса проекта RST27

строятся под техническим наблюдением РС с 2011 г. и пользуются большим доверием со стороны судовладельцев, морских администраций и портовых властей, так как еще на стадии проектирования к ним применены дополнительные требования по предотвращению загрязнения в аварийных случаях. В настоящий момент с классом РС эксплуатируется 32 судна этого проекта. В процессе постройки на производственных площадках АО «Завод «Красное Сормово» и ОАО «Окская судоверфь» находится еще 6 судов. Это современные танкеры типоразмера «Волго-Дон макс» грузоместностью 6930 м³, предназначенные для перевозки

нефти и нефтепродуктов. Отличительной особенностью судов является возможность обеспечивать одновременную перевозку двух сортов груза.

Основные характеристики:

длина – 140,85 м;
ширина – 16,86 м;
высота борта – 6 м;
осадка – 4,2 м;
валовая вместимость – 5075;
дедвейт – 7000 т;
скорость хода – 10 уз.

Головное судно проекта RST 27 «ВФ ТАНКЕР-1» в 2012 г. было занесено в Список значительных судов, ежегодно публикуемый Британским Королевским обществом инженеров-кораблестроителей.



ПРОЧНОСТЬ СУДОВ И ПЛАВУЧИХ СООРУЖЕНИЙ

УДК 656.61.086

РАЗВИТИЕ РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ПОДХОДОВ ПО УТОЧНЕНИЮ ЛОКАЛЬНОЙ ЛЕДОВОЙ НАГРУЗКИ

Е.М. Апполонов, д-р техн. наук, проф., ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет» (СПбГМТУ)

В.А. Коршунов, канд. техн. наук, СПбГМТУ

Д.А. Пономарев, СПбГМТУ

А.А. Родионов, д-р техн. наук, проф. СПбГМТУ

Статья посвящена уточнению процедур назначения локальной ледовой нагрузки на основе расчетно-экспериментальных методов. Предложена методология определения локальных ледовых нагрузок на ледостойкие сооружения, основанная на расчетном обобщении результатов специально проводимых модельных испытаний и построении уточненной зависимости давления от площади. Разработан алгоритм определения параметров локальной ледовой нагрузки с использованием высокоточных математических моделей метода конечных элементов. Проведена апробация процедуры расчетного восстановления характера распределения ледового давления по измерительному окну физической модели, позволяющая существенно повысить точность распределения регистрируемого поля ледовых давлений.

Ключевые слова: ледовая нагрузка, метод конечных элементов, датчики-тензометры, ледостойкие конструкции.

DEVELOPMENT OF COMPUTATIONAL AND EXPERIMENTAL APPROACHES TO REFINEMENT OF LOCAL ICE LOAD

Ye.M. Appolonov, DSc., professor, FSEI State Marine Technical University of St. Petersburg

V.A. Korshunov, PhD, State Marine Technical University of St. Petersburg

D.A. Ponomarev, State Marine Technical University of St. Petersburg

A.A. Rodionov, DSc., professor, State Marine Technical University of St. Petersburg

This paper is dedicated to refinement of the procedures for the appointment of local ice loads based on calculation and experimental methods. The methodology for determining the local ice loads on the ice-resistant structures, based on the calculated generalization of results of specific model tests carried out and more precise pressure dependancy tracing, is introduced. An algorithm for determining the parameters of the local ice loads with the use of high-precision mathematical models of the finite element method has been developed. Calculation approbation of the ice pressure distribution calculated recovery procedure on the nature of the measuring window of a physical model is conducted. This can significantly improve the distribution accuracy of the ice pressure registered field.

***Keywords:** ice load, finite element method, sensors, ice-resistance structures.*

1. ВВЕДЕНИЕ

Нефтегазопромысловые сооружения на континентальном шельфе замерзающих морей подвержены прежде всего двум основным видам внешних нагрузок и воздействий: волновым в летнее время, когда акватория свободна ото льда, и ледовым в зимнее время, при наличии ледяного покрова. Для сооружений полярного шельфа доминирующими являются все же ледовые нагрузки, именно поэтому ледовое воздействие в большинстве случаев является определяющим при выборе тех или иных технических решений.

Расчетные нагрузки на ледостойкие сооружения традиционно разделяются на глобальные и локальные. Первые определяют требования к системе удержания сооружения (опорные основания, якорные связи и т.п.) при воздействии на него ледовых образований. Вторые регламентируют размеры конструкций, непосредственно взаимодействующих со льдом.

Величины расчетных нагрузок определяются соответствующими нормативными документами – правилами классификационных обществ, международными и национальными стандартами [1–6]. Совершенствование конструктивных решений, с одной стороны, и снижение материалоемкости, с другой, требуют постоянного уточнения расчетных ледовых нагрузок. Настоящая работа посвящена уточнению процедур назначения локальной ледовой нагрузки на основе расчетно-экспериментальных методов.

2. МЕТОДОЛОГИЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЛОКАЛЬНЫХ ЛЕДОВЫХ НАГРУЗОК НА ЛЕДОСТОЙКИЕ СООРУЖЕНИЯ

Существующие расчетные зависимости, которые определяют ледовые нагрузки, базируются на систематических экспериментальных данных о параметрах ледового покрова, физико-механических характеристиках льда и механизмах разрушения ледовых образований при их взаимодействии с сооружением. Существенная роль экспериментальных исследований в формировании перечисленных баз данных связана с объективными трудностями теоретического описания процесса разрушения льда. Не останавливаясь подробно на всех аспектах данной проблемы, отметим, что одним из наиболее значимых факторов является неравномерный характер распределения давлений по площади контакта сооружения со льдом.

Для глобальных ледовых нагрузок раскрытие данной неопределенности осуществляется с помощью испытаний в ледовом бассейне. В рамках данного подхода предполагается, что для заданного набора параметров ледового образования G_H (толщина ровного льда, геометрия торосов, толщина консоли-

дированного слоя тороса и т.д.) с помощью натуральных испытаний на стандартных образцах определены физико-механические параметры льда σ_H (пределы прочности льда на изгиб и сжатие, модуль упругости и т.д.). С помощью соответствующих методик в ледовом бассейне моделируется ледовое образование с параметрами G_M и физико-механические свойствами σ_M , причем последние также определяются с помощью испытаний стандартных образцов моделированного льда. В результате испытаний определяется глобальная ледовая нагрузка F_M , которая затем пересчитывается на расчетную ледовую нагрузку F_H с помощью методики, учитывающей соотношения между натурными и модельными параметрами F_H/G_M и σ_H/σ_M .

Известные трудности, связанные с невозможностью обеспечения одновременного подобия натурального и моделированного льда по всему набору физических свойств, компенсируются, с одной стороны, обоснованным выбором пар параметров, по которым обеспечивается подобие, с другой – накопленным обширным опытом проведения модельных испытаний и последующего пересчета на натуру.

Обратим внимание на следующие особенности применения изложенной технологии.

Наибольшее влияние на величину нагрузки, передаваемой от разрушаемого в процессе взаимодействия льда на сооружение, оказывают пределы прочности льда на изгиб σ^b и сжатие σ^c . Первым определяется величина суммарной силы, вызывающей разрушение льда изгибом и последующий сброс нагрузки на сооружение. Второй параметр отвечает за величины давлений в зоне контакта сооружения со льдом.

Для модельного льда удовлетворяется подобие по прочности на изгиб σ_H^b/σ_M^b , а соотношение σ_H^c/σ_M^c фиксируется по факту. Тем не менее, это не является препятствием для прогнозирования глобальной ледовой нагрузки по результатам модельных испытаний. По величине глобальной силы, действующей на сооружение, может быть оценено среднее давление в зоне контакта, которое фактически представляет собой эффективный предел прочности льда на сжатие $\sigma^{c-эф}$. За счет неравномерности эпюры давлений в зоне контакта $\sigma^{c-эф} < \sigma^c$, а соотношение $\kappa = \sigma^{c-эф}/\sigma^c$ представляет собой коэффициент неравномерности эпюры ледовой нагрузки.

Таким образом, испытания в ледовом бассейне не позволяют судить об абсолютной величине ледовых давлений, но дают объективное представление об уровне их неравномерности.

Обратимся с этих позиций к вопросу определения локальных ледовых давлений. Поскольку в ледовом бассейне не моделируется подобие по пределу прочности льда на сжатие и, соответственно, не моделируется физическая картина разрушения льда

при сжатии (раздроблении), традиционно считалось невозможным использование этих экспериментов для определения локальной ледовой нагрузки. Вместе с тем, проведение испытаний с натурным льдом при площадях контакта до $1 - 2 \text{ м}^2$ для пластин наружной обшивки и балок основного набора и до $5 - 10 \text{ м}^2$ для балочных систем (перекрытий) представляет собой весьма сложную и трудоемкую научно-исследовательскую задачу, не выполнимую применительно к процессу проектирования каждого конкретного ледостойкого сооружения. Поэтому абсолютное большинство существующих нормативных способов регламентации расчетных локальных ледовых нагрузок базируется на эмпирическом подходе, получившем название *pressure area curve (PAC)* (зависимость давление – площадь) [7]. Согласно данному подходу давление p , равномерно распределенное на площади контакта конструкции со льдом (A) некоторой функции площади A ,

$$p \sim f(A) = A^{-\alpha}, \quad (1)$$

где α – эмпирический коэффициент, $\alpha \approx 0,5$.

Для построения зависимости вида (1) используются представительные базы данных о проводившихся экспериментах по измерению параметров ледовой нагрузки при различных площадях зоны контакта конструкции со льдом [7]. Естественным, что для относительно малых площадей контакта имеется достаточный объем испытаний на малых и средних образцах для обоснованного прогнозирования величин средних давлений. С увеличением площади контакта, происходящем при переходе от нормирования прочности конструктивных элементов (пластин обшивки, балок основного набора) к балочным системам (перекрытиям), достоверность экспериментальных данных снижается, а обеспечение необходимого уровня безопасности достигается использованием консервативного подхода, связанного с определенным перетяжением сложных конструкций.

С учетом изложенных самых общих соображений в качестве достаточно логичного шага в направлении увеличения достоверности прогнозирования расчетных локальных ледовых нагрузок на основании (зависимость давление – площадь вида (1)) предлагается проводить специальные комплексные испытания в ледовом бассейне.

Пусть, в соответствии с традиционным подходом, для определения глобальной ледовой нагрузки на некоторое ледостойкое сооружение предусмотрены испытания в ледовом бассейне, создана модель сооружения, определены натурные и модельные параметры ледовых образований G_H/G_M и их физико-механических свойств σ_H/σ_M .

Ледовую нагрузку на модели предлагается замерять одновременно в трех измерительных окнах различной площади. В рамках геометрического подобия площади

окон соответствуют площадям натурального сооружения, рассматриваемым при расчете прочности пластин обшивки 1, балок основного набора 2, и перекрытия 3.

На рис.1 показана схема внешней поверхности модели для измерения глобальной и локальной нагрузок с тремя типами измерительных окон 1, 2, 3.

Глобальная ледовая нагрузка распределяется по площади A_g , которая определяется как

$$A_g = Ld, \quad (2)$$

где L – длина модели;
 d – высота ледовой нагрузки.

Локальные ледовые нагрузки для измерительных окон 1, 2 и 3 распределены по площадям соответственно:

$$A_{l1} = L_1d; A_{l2} = L_2d; A_{l3} = L_3d$$

Предлагается следующие соотношения размеров измерительных окон: все окна имеют одинаковую высоту; окно 1 имеет форму квадрата; длина окна 2 в четыре раза больше длины окна 1, $L_2 = 4L_1$; длина окна 3 в два раза больше длины окна 2, $L_3 = 2L_2$.

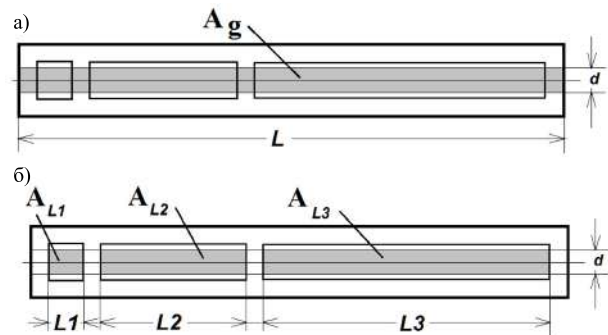


Рис. 1 Схема внешней поверхности модели для измерения глобальной и локальной нагрузок с тремя типами измерительных окон (1, 2, 3):

а – площадь приложения глобальной ледовой нагрузки;
б – площади приложения локальных ледовых нагрузок на измерительные окна 1, 2 и 3

В результате испытаний в ледовом бассейне производятся замеры глобальной нагрузки P_g и замеры локальных нагрузок P_1, P_2, P_3 , приходящихся на измерительные окна 1, 2 и 3 соответственно. Затем производится вычисление средних значений давлений, соответствующих глобальной нагрузке:

$$p_g = \frac{P_g}{A_g} \quad (3)$$

и соответствующих средних давлений локальной нагрузки на измерительные окна:

$$p_{l1} = \frac{P_1}{A_{l1}}, p_{l2} = \frac{P_2}{A_{l2}}, p_{l3} = \frac{P_3}{A_{l3}}. \quad (4)$$

Зависимость давления локальной нагрузки от площади характеризуется отношением среднего давления локальной нагрузки к среднему давлению глобальной нагрузки. В данном случае вычисляются три таких отношения, которые характеризуются коэффициентами неравномерности локальной нагрузки:

$$\kappa_1 = \frac{p_{11}}{p_g}, \kappa_2 = \frac{p_{12}}{p_g}, \kappa_3 = \frac{p_{13}}{p_g}, \quad (5)$$

Кроме того, по результатам испытаний образцов льда в полевых условиях известна величина σ_H^c , что дает информацию для образца и по давлению $p_o = \sigma_H^c$, по площади A_o , которая является площадью сечения образца льда, и по коэффициенту неравномерности $\kappa_o = p_o/p_g$.

В результате будут получены пять точек, определяющих зависимость давление – площадь вида (1), располагающиеся в следующей последовательности: (A_o, p_o) ; (A_1, p_1) ; (A_2, p_2) ; (A_3, p_3) ; (A_g, p_g) , а также значения коэффициентов неравномерности: κ_o , κ_1 , κ_2 и κ_3 .

Полученный набор значений будет отличаться от соответствующих величин, регламентируемых действующими для рассматриваемого сооружения нормативными требованиями/стандартами, причем наибольших отличий следует ожидать в области больших площадей. Анализ полученной совокупности данных позволит обоснованно, на едином методологическом подходе произвести уточнение величин расчетных локальных ледовых нагрузок на ледостойкое сооружение.

С целью повышения точности измерения величины и характера распределения локальной ледовой нагрузки на измерительное окно модели предлагается специальная методика измерений, которая характеризуется системой расположения датчиков-тензометров и численной процедурой обработки показаний этих датчиков.

3. МЕТОДИКА РАСЧЕТНОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ ХАРАКТЕРА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЛЕДОВОГО ДАВЛЕНИЯ ПО ИЗМЕРИТЕЛЬНОМУ ОКНУ

Основные положения этой методики изложены ниже на примере модели перекрытия ледостойкой конструкции, которая представляет собой опорный контур плоскостного перекрытия, прикрепленный с помощью стойки к шестикомпонентному динамометру. Динамометр служит для регистрации интегральных характеристик глобальной нагрузки. На опорном контуре перекрытия закреплена испытательная пластина.

В центральной части пластины предусмотрено квадратное испытательное окно размером 100×100 мм, площадью $A_1=100$, которое выполнено

путем утонения пластины до 3 мм. На рис.2 показана модель пластины, имитирующей обшивку и основные ее размеры.

Параметры локальной ледовой нагрузки определяются с помощью деформаций, определяемых по показаниям датчиков-тензометров.

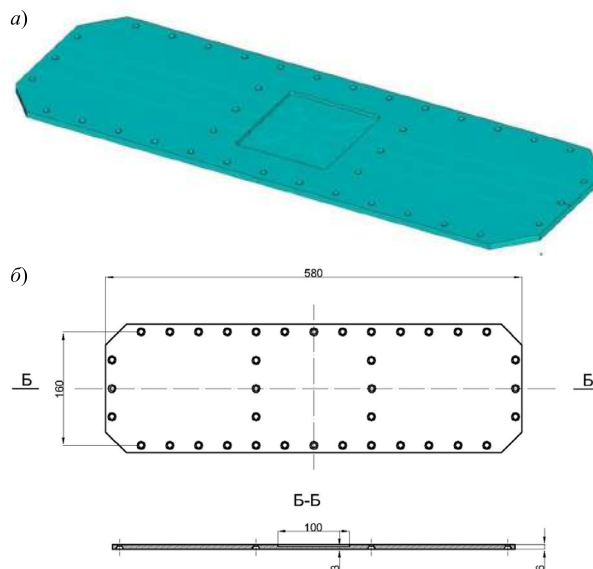


Рис. 2 Модель пластины, имитирующей обшивку с центральным измерительным окном:
а – общий вид; б – основные размеры, мм

Поверхность измерительного окна условно разбивается на девять пятен – квадратов. Тем самым принимается, что локальная ледовая нагрузка, действующая на измерительное окно, аппроксимируется с помощью набора пятен нагрузки. В пределах пятна давление считается равномерным. Схема деления измерительного окна на пятна нагрузки показана на рис. 3, при этом каждому пятну ставится в соответствие свой датчик-тензометр. Датчики-тензометры устанавливаются в центре каждого пятна с внутренней стороны пластины.

Размер чувствительной части датчика – база измерений определяется параметром $b=10$ мм. Схема расположения датчиков, а также их нумерация представлена на рис. 4.

Для получения всей нагрузки, действующей на измерительное окно, по показаниям датчиков-тензометров, установленных в пятнах, необходимо построить для измерительного окна матрицу коэффициентов влияния, которая будет связывать деформации, полученные для каждого датчика, со значениями давления:

$$\{p\} = [K]\{\varepsilon\}, \quad (6)$$

где $[K]$ – матрица коэффициентов влияния, в данном случае размерность матрицы коэффициентов влияния будет составлять 9×9 ;

$\{p\}$ – вектор давлений, компоненты которого представляют собой значения равномерного давления на каждое пятно;
 $\{\varepsilon\}$ – вектор замеренных деформаций для каждого пятна.

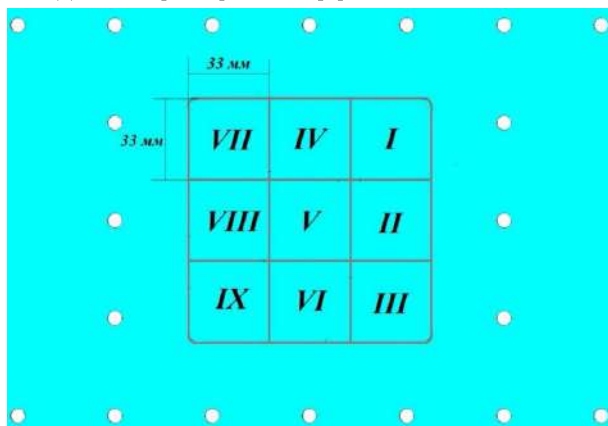


Рис. 3 Схема деления поверхности измерительного окна на пятна нагрузки (вид с внешней стороны пластины)

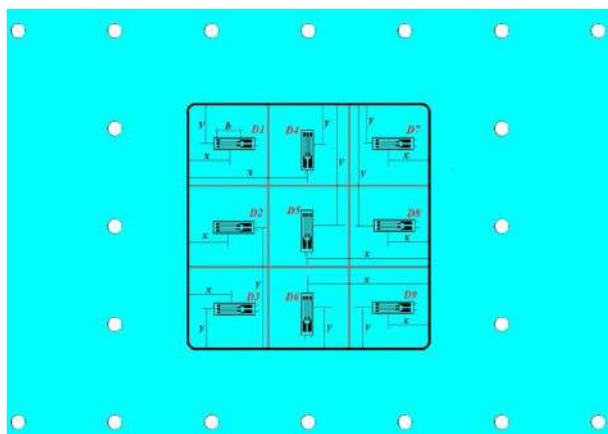


Рис. 4 Расположения датчиков-тензометров в центре каждого пятна (вид с внутренней стороны пластины)

Ниже для рассматриваемой модели предлагается численный способ получения матрицы коэффициентов влияния через вспомогательную матрицу $[\Delta]$, как:

$$[K] = [\Delta]^{-1}. \quad (7)$$

Коэффициенты матрицы $[A]$ определяются как:

$$\Delta_{ij} = \varepsilon_i \left| \begin{array}{l} \text{при } p_j = 1; \forall p_n = 0, n \neq j, \end{array} \right. \quad (8)$$

где ε_i – деформация в i -м датчике деформации, $i = 1 \dots 9$;
 p_j – давление на j -е пятно нагрузки, $j = 1 \dots 9$.

Вычисление коэффициентов матрицы $[\Delta]$ выполняется с помощью высокоточных математических моделей метода конечных элементов (МКЭ), реализованных в среде программного комплекса ANSYS [8]. На рис. 5 изображена расчетная модель МКЭ физической модели обшивки. Для наиболее

точного учета жесткостных характеристик конструкции конечно-элементная модель выполнена в твердотельной постановке с использованием конечного элемента типа *solid185*. Размер конечного элемента в районе измерительного окна принимался равным 1 мм, а в остальной области пластины – 3 мм, по толщине обшивки в районе измерительного окна использовано три элемента, а в остальной области шесть элементов. Общее количество элементов составляет 117744.

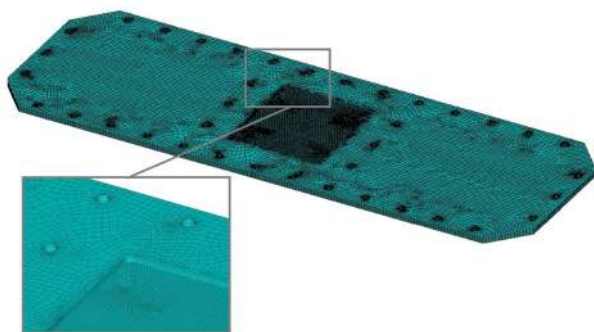


Рис. 5 Конечно-элементная модель испытательной пластины с квадратным измерительным окном

На рис. 6 показано расположение пятна нагрузки интенсивностью $p = 1$ кПа, приходящегося на пятно нагрузки I , соответствующего датчику деформации $D1$. Фрагмент результатов расчета в виде поля продольных деформаций ε_x при заданном единичном пятне нагрузки представлен на рис. 7. Результаты этого расчета позволяют заполнить один (первый) столбец матрицы $[\Delta]$ (см. зависимость (8)).

Поочередное приложение нагрузки на все пятна и расчетное с помощью модели МКЭ определение деформаций для всех датчиков дает полную матрицу $[\Delta]$. Далее по зависимости (7) вычисляется и матрица коэффициентов влияния $[K]$.

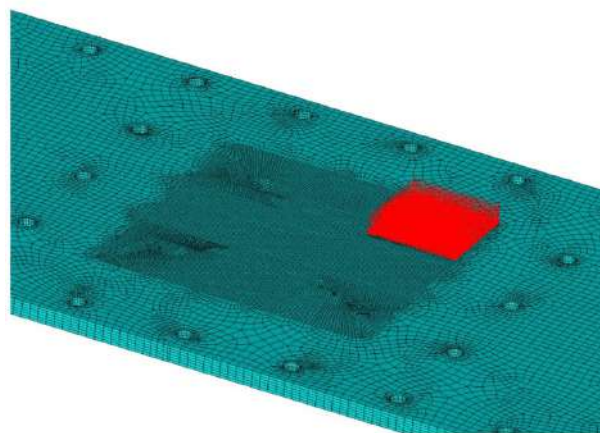


Рис. 6 Расположение пятна нагрузки, приходящегося на пятно нагрузки I , соответствующего датчику деформации $D1$

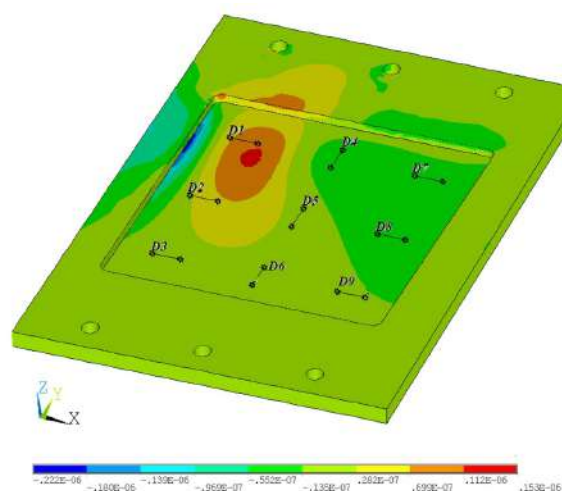


Рис. 7 Поля продольных деформаций ε_x в районе измерительного окна

С помощью матрицы коэффициентов влияния по замеренным в процессе физического эксперимента значениям деформаций для каждого пятна $\{\varepsilon\}$ по зависимости (6) определяется вектор давлений $\{p\}$ и, тем самым, уточненный характер распределения ледовой нагрузки по измерительному окну.

Следует заметить, что показания датчиков-тензометров и как следствие значения компонентов вектора $\{p\}$ являются непрерывными функциями времени, поэтому должны быть подвергнуты последующей статистической обработке.

4. ПРИМЕР ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЛОКАЛЬНОЙ ЛЕДОВОЙ НАГРУЗКИ

Оценка точности предложенной процедуры выполнялась с помощью численных моделей МКЭ. По площади квадратного измерительного окна прикладывалась заданная локальная нагрузка в виде поля давлений переменной интенсивности. По длине окна интенсивность давления изменялась по линейному закону (от 0 до 100 кПа). По высоте окна интенсивность давления принята постоянной. Полная приложенная нагрузка составила 0,50 кН.

Схема приложения заданной нагрузки на конечно-элементную модель испытательной пластины показана на рис. 8.

В результате проведенного расчета параметров напряженно-деформированного состояния модельной пластины, нагруженной заданной нагрузкой, получены все параметры состояния пластины. В итоге полная приложенная нагрузка на измерительное окно по расчетному эксперименту определяется как

$$P_1 = \{p\}^T A_1 = 0,499 \text{ кН.} \quad (9)$$

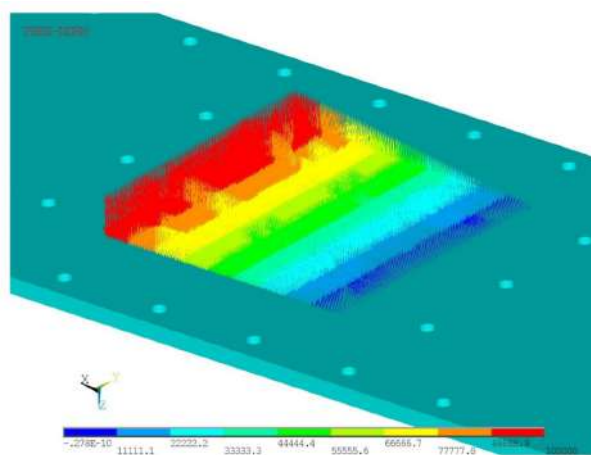


Рис. 8 Схема приложения заданной локальной нагрузки на испытательное окно

Среднее давление на обшивку в районе утонения будет равно

$$p_{\text{ср.1}} = \frac{P_1}{A_1} = 49,99 \text{ кПа.} \quad (10)$$

На рис. 9 показана гистограмма восстановленной нагрузки по пятнам.

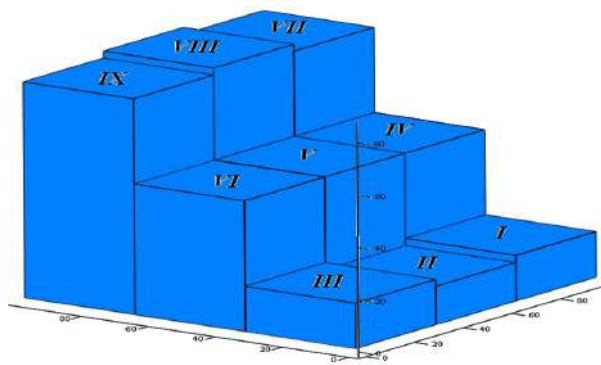


Рис. 9 Гистограмма восстановленной нагрузки по девяти пятнам

В таблице приведено сопоставление вычисленных по предлагаемой методике значений давлений по пятнам и осредненных по пятнам давлений исходной (заданной) нагрузки. Осреднение проводилось по ординате давления в центре пятна. Видно, что погрешность в определении величины нагрузки на пятно не превышает 11 %, что представляется вполне удовлетворительным для целей проводимого исследования.

Можно видеть, что предлагаемый способ регистрации локальной ледовой нагрузки на бортовое перекрытие позволяет определить с точностью до размера пятна величину нагрузки, действующей на пластину наружной обшивки. По величине нагрузки в пятне можно судить о напряженно-деформируемом состоянии наружной обшивки.

Сопоставление вычисленных и заданных значений давлений по пятнам измерений

№ пятна	Вычисленное значение, кПа	Заданное значение, кПа	Погрешность, %
1	17,34	16,5	5
2	14,74	16,5	-11
3	17,46	16,5	6
4	49,99	49,5	1
5	50	49,5	1
6	49,97	49,5	1
7	82,57	82,5	1
8	8,25	82,5	-1
9	82,59	82,5	1

Разработанный алгоритм определения параметров локальной ледовой нагрузки на квадратное измерительное окно 1 может быть применен и для восстановления ледовой нагрузки на измерительное окно 2.

ВЫВОДЫ

Разработка надежных способов ледовой защиты морских инженерных сооружений, новых методов и средств эффективного проектирования морской техники для добычи углеводородов на арктическом шельфе требует точного и достоверного прогнозирования ледовых нагрузок.

Современные правила классификационных обществ, международные и национальные стандарты, регламентирующие методики определения расчетных локальных ледовых нагрузок на ледостойкие сооружения, основаны на обобщении широкого набора экспериментальных данных. Они отличаются значительной степенью консервативности и не позволяют в полной мере учесть особенности конкретного объекта.

Вместе с тем, при определении расчетных глобальных ледовых нагрузок учет особенностей сооружения достигается за счет проведения модельных испытаний в ледовом бассейне. На основании

испытаний проводятся проработки, направленные на снижение глобальной нагрузки за счет оптимизации параметров ледостойкого сооружения. Однако попыток проведения модельных испытаний для уточнения локальных ледовых нагрузок ни в России, ни в мире до настоящего времени не предпринималось.

Для решения этой задачи предложена методология определения локальных ледовых нагрузок на ледостойкие сооружения, основанная на расчетном обобщении результатов специально проводимых модельных испытаний и построении уточненной зависимости давления от площади.

Построена и апробирована процедура расчетного восстановления характера распределения ледового давления по измерительному окну физической модели, позволяющая существенно повысить точность распределения регистрируемого поля ледовых давлений.

Дальнейшие исследования следует направить на совершенствование методики пересчета модельных нагрузок на реальные объекты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Международный стандарт ISO/FDIS 19906 «Нефтяная и газовая промышленность - Конструкции сооружений арктического шельфа», 2010 г.
2. ГОСТ Р ИСО 19906. Нефтяная и газовая промышленность. Сооружения арктического шельфа. – М.: Стандартинформ, 2011.
3. ABS Rules for Building and Classing Mobile Offshore Drilling Units, Appendix 1: Strengthening of Mobile Offshore Drilling Units for Navigation in Ice.
4. Правила классификации, постройки и оборудования плавучих буровых установок и морских стационарных платформ. – СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2014.
5. Finnish-Swedish Ice Class Rules, 2012.
6. Germanischer Lloyd. Rules and Guidelines. IV Industrial Services. 6 Offshore Installations. 7 Guidelines for the Construction of Fixed Offshore Installations in Ice Infested Waters. 2005.
7. Palmer A.C., Dempsey J.P., Masterson D.M. A revised ice pressure-area curve and a fracture mechanics explanation. Cold Regions Science and Technology, vol. 56 May (2009) pp. 73–76.
8. ANSYS release 15.0 documentation. ANSYS Inc., 2014.

УДК 629.542.2

ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО РАЗВИТИЮ ТРЕБОВАНИЙ К СУДАМ, ЭКСПЛУАТАЦИЯ КОТОРЫХ ПРЕДУСМАТРИВАЕТ ПОСАДКУ НА ГРУНТ

А.И. Азовцев, д-р техн. наук, проф., ФБОУ ВО «Морской государственный университет имени адмирала Г.И. Невельского», Владивосток

В.И. Евенко, ФАУ «Российский морской регистр судоходства», Санкт-Петербург

В.А. Кулеш, д-р техн. наук, проф., ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет», Владивосток

М.А. Кутейников, д-р техн. наук, ФАУ «Российский морской регистр судоходства», Санкт-Петербург

А.С. Огай, канд. техн. наук., доц., ФБОУ ВО «Морской государственный университет имени адмирала Г.И. Невельского», Владивосток

В.А. Петров, канд. техн. наук., доц., ФБОУ ВО «Морской государственный университет имени адмирала Г.И. Невельского», Владивосток

В статье рассмотрены суда, производящие погрузку и выгрузку при контакте с грунтом, выполнен обзор мирового и российского опыта, предложена новая классификация таких судов. Определены расчетные нагрузки и предложены требования к районам усиления прочности и конструкциям этих судов. Произведена проверка предложенных требований на примерах некоторых судов.

Ключевые слова: суда на грунте, опыт, классификация, нагрузки, требования.

PROPOSAL FOR RULE REQUIREMENTS DEVELOPMENT FOR SHIPS OPERATING IN CONTACT WITH GROUND

A.I. Azovtsev, DSc, professor, FSEI "Admiral Nevelskoy Maritime State University", Vladivostok

V.I. Evenko, FAI "Russian Maritime Register of Shipping", St. Petersburg

V.A. Kulesh, DSc, professor, FSAEI "Far Eastern Federal University", Vladivostok

M.A. Kuteynikov, DSc, FAI "Russian Maritime Register of Shipping", St. Petersburg

A.S. Ogai, PhD, associate professor, FSEI "Admiral Nevelskoy Maritime State University", Vladivostok

V.A. Petrov, PhD, associate professor, FSEI "Admiral Nevelskoy Maritime State University", Vladivostok

This article considers ships, which load and unload at contact with ground. The review of world and Russian experience is presented. The new classification of such types of ship is offered. Design loads are determined and special requirements to reinforced region and such ships' structure are offered. The offered requirements are checked on several ships.

Keywords: Ships NAABSA, experience, classification, loads, requirements.

ВВЕДЕНИЕ

Мировая практика судоходства достаточно широко использует принцип осушения судов на грунте для проведения грузовых операций. Особенно это характерно для устьев рек и районов мирового океана с большими перепадами уровня моря в результате приливов и отливов. Данная практика традиционно используется и особенно важна для освоения удаленных регионов России – Дальнего Востока и Крайнего Севера. Все технологии и оборудование, а также опыт, необходимые для обеспечения

эффективного, безопасного и экономически выгодного освоения данных территорий, имеются. Вместе с тем, для проведения эффективной и долговременной морской деятельности следует учитывать как опыт, так и существующие проблемы.

Многие классификационные общества, в том числе и Российский морской регистр судоходства (РС), оговаривают специальные требования к судам, эксплуатация которых предусматривает посадку на грунт. Правила некоторых обществ содержат специальные разделы, а в ряде случаев предусматривают и дополнительные символы класса для таких судов. В отечественной практике имеется некоторая задержка как в норматив-

но-техническом, так и в нормативно-правовом обеспечении проектирования, постройки и эксплуатации подобных судов. В данной работе сформулированы предложения по возможной классификации таких судов и регламентации размеров конструктивных связей. Работа выполнялась в рамках НИР «Разработка нормативно-технических требований Правил РС по обеспечению безопасности специализированных судов при погрузке-выгрузке с использованием принципа осушения» по заказу РС.

Авторы выражают признательность Грозову А.В., Каленчуку С.В., Карпову П.П., Киму Л.В., Огаю С.А., Сурову О.Э., Янченко В.А и другим коллегам, участвовавшим в разных этапах данной работы.

1. ОПЫТ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ЭКСПЛУАТАЦИИ

Отечественные суда, использующие принцип частичного или полного осушения на грунте, относятся как к гражданскому, так и военному флоту. Такие суда ранее могли использоваться по двойному назначению. Число проектов сравнительно небольшое, однако отдельные серии судов доходили до нескольких сотен единиц. На рис. 1, а представлена самоходная баржа из серии «Славянка» [1], а на рис. 1, б – малый десантный корабль (МДК) [2]. Суда имеют упрощенные обводы. Принципиальное отличие судов в форме килевой линии – у МДК она более приспособлена к контактам с грунтом в условиях волнения. При сравнительно небольшой длине МДК (50 м) все корпусные конструкции в средней части имеют продольную систему набора.

Анализ показал, что последующее развитие отечественных малых десантных кораблей было направлено на скоростные суда, в том числе на воздушной подушке и даже экранопланы. Большие десантные корабли постепенно утрачивали возможности контактов с грунтом, превращаясь в носителей скоростной плавучей и вертолетной техники.

Развитие специализированных гражданских судов продолжалось в направлении повышения их грузоподъемности, мореходности, дальности и автономности плавания. В качестве примера можно отметить суда из серии «Сосновка» (см. рис. 2, а).

Развитие подобных судов в определенной степени сдерживается отставанием в их отечественной классификации и регламентации конструктивных особенностей. Анализ мирового опыта судоходства в Тихом и Индийском океанах показал широкий спектр решений в отношении посадки судов на грунт. В основном он относится к судам небольших размеров. Одна из главных концепций для судов, использующих принцип осушения на грунте в условиях качки, – не допускать прямых контактов днищевой обшивки и винто-рулевого комплекса (ВРК) с грунтом за счет конструктивных решений, в том числе внешней защиты. Суда средних размеров широко используют посадку на грунт во многих устьях европейских рек. Для них характерны сравнительно обустроенные места и отсутствие качки. Пример использования наиболее крупных судов относится к американскому опыту (см. рис. 2, б). В данном случае суда выполняют функции снабжения штата Аляска в сочетании с уникальным гидротехническим сооружением – терминалом. Перепады уровня моря здесь доходят до 13 м, а условия посадки на грунт сочетаются со сложной ледовой обстановкой.

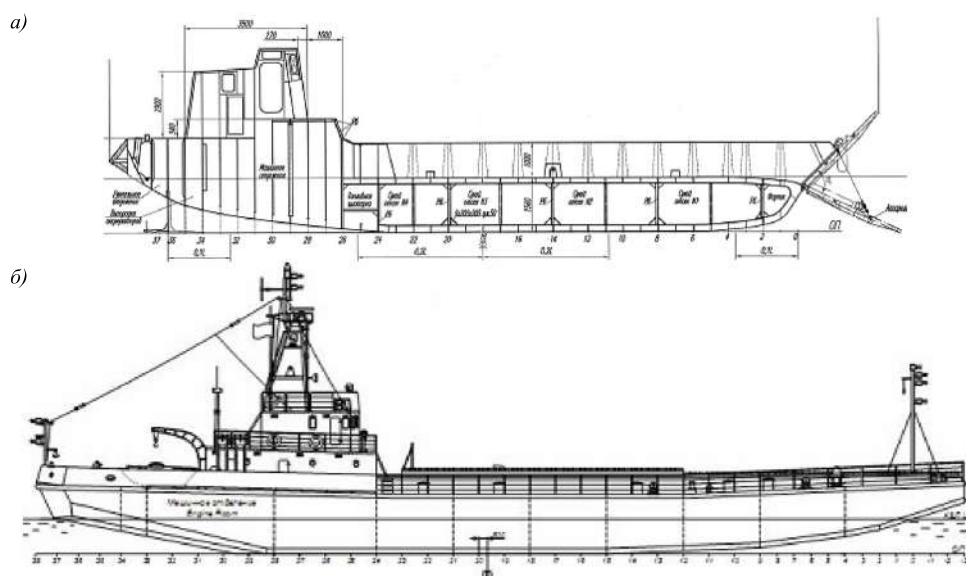


Рис. 1 Специализированные отечественные суда:
а – самоходная баржа проекта 20150; б – МДК проекта 106К



Рис. 2 Примеры накатных судов в состоянии полного осушения:
 а – судно из серии «Сосновка» (проектант – Морское инженерное бюро);
 б – американское судно *North Star* (65000 т) на грунте в порту Анкоридж [3]

Анализ повреждений судов показывает, что при посадке на грунт в условиях качки и отсутствия внешних конструктивных усилений, снижающих прямое действие грунта на корпус судна, степень повреждений и их объемы могут выходить за уровень эксплуатационных. Так, судно «Курилгео» (водоизмещение 450 т, построено в 2007 г., Китай) получило тяжелые повреждения днища, охватывающие всю длину, а также деформацию пятки ахтерштевня с заклиниванием руля (см. рис. 3). Кроме днища повреждения охватывали значительную часть скулы. Судно пришлось буксировать на ремонт от места повреждения (Курильские острова) до порта Находка. Подобные повреждения чаще происходят в условиях, когда износы связей незначительны.

2. КЛАССИФИКАЦИЯ

Некоторые классификационные общества предусматривают дополнительные символы класса для судов, использующих посадку на грунт [4]:

BV – применяет символы **BRG** или **STRENGTHBOTTOM** к судам с подкреплением конструкций днища для погрузки/выгрузки в положении «на берегу» или «на дне при отливе». Требования сведены в специальную главу правил;

RINA – применяет символы **SFI** или **STRENGTHBOTTOM** к судам, приспособленным для погрузки и выгрузки в положении осушки;

CCS – применяет комплексный символ **Bottom Strengthened for Operating Aground** к судам, имеющим подкрепления днища для операций с посадкой на грунт;

PRS – применяет символ **LAL** для судна, которое имеет подкрепления для лежания на грунте во время грузовых операций.

Ряд обществ (например, LR и DNV) имеют специальные разделы в своих правилах, но не присваивают дополнительный символ в класс судна, ограничиваясь записями в Свидетельства. РС пока не имеет особого раздела в правилах, но оговаривает специальные требования в главах 2.3 «Одинарное дно» и 2.4 «Двойное дно» части II «Корпус» [8]. Дополнительно циркулярным письмом [5] РС преду-



Рис. 3 Пример тяжелых повреждений т/х «Курилгео» при осушении:
 а – в носовой части; б – деформирование пятки ахтерштевня и заклинивание пера руля

смотрено выделение судов, нормальная эксплуатация которых предусматривает посадку на грунт – суда NAABSA (*Not Always Afloat But Safely Aground* – не всегда на плаву, но безопасно на грунте).

Специальные требования или разделы правил могут существенно отличаться по форме и объему содержания. Они могут ограничиваться словесными указаниями, требованиями в табличных формах и дополнениями с регламентирующими формулами. Последнее наиболее прогрессивно (например, у BV). Однако очевидно, что важнейшим параметром в формулах являются расчетные нагрузки или давления от грунта. Правила BV [6] непосредственно используют традиционные давления моря на тихой воде и на расчетном волнении с их суммированием. Последнее не представляется удачным, так как расчетные нагрузки грунта при осушении явно не связаны с волновыми давлениями в открытом море. Формулы в правилах BV для нагрузок не увязаны с формами корпуса (днища) и с какими-либо свойствами грунта. Более прогрессивный подход для расчетных давлений грунта имеется у DNV [7], где давления зависят от

весового водоизмещения судна при контакте и ширины плоской части днища в районе контакта. Однако у DNV эти условия относятся не к гражданским судам, а к военным – *Naval Landing Craft* (2004).

Выполненный анализ специфики эксплуатации судов с обсушением в различных районах позволил предложить новую классификацию, которая отражена в табл. 1.

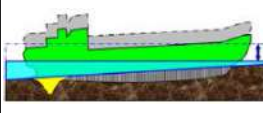
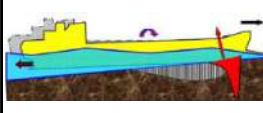
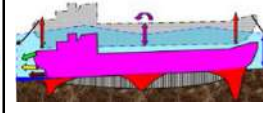
Особенностью предложений является дополнение знака (NAABSA или SFA) цифрами 1, 2 или 3, отражающими уровень специализации и безопасности судна. Этот принцип аналогичен обозначению ледовых классов судов в правилах РС [8]. Предполагается, что в перспективе и места осушения судов также следует сертифицировать с учетом уровня безопасности.

Аббревиатуру NAABSA часто используют в отношении безопасности мест осушения. В отношении судов более точной представляется SFA (*Strength For Aground*).

Такая система позволит классифицировать не только суда, но и сертифицировать места для их

Таблица 1

Эксплуатационные характеристики судов NAABSA или SFA в соответствии с уровнем специализации и безопасности

Характеристика, условия работы судов при осушении	1	2	3
			
Поступательная скорость	Нет	Допускается	Допускается
Степень осушения	Частичная/полная	Частичная/полная	Полная
Удар носом	Нет	Первичный	Систематически
Удар кормой	Нет	Нет	Систематически
Удар средним районом корпуса	Нет	Нет	Эпизодически
Способ стягивания с грунта	Нет	Упор винта	Упор винта + спец. устройство*
Общая прочность (проверка)	На реакцию в корме	На удар в носу	На удары по длине корпуса
Утолщение/усиление связей	Проверка расчетом	Требуется	Требуется
Внешние усиления днища	Не требуются	Рекомендуются	Требуется
Усиления грузовой палубы	Не требуются	Проверка расчетом	Требуется
Вспомогательные источники энергии	Не требуются	Рекомендуются	Требуется*
Контрольные приборы качки	Не требуются	Рекомендуются	Требуется*
Проектные ограничения	Требуется	Требуется	Требуется
Эксплуатационные ограничения	Требуется	Требуется	Требуется
Общая характеристика	Статическое обсушение	Десантирование на грунт	Ударное осушение
* – если таким оборудованием не обеспечено место осушения.			

безопасной осушки. Например, место NAABSA 3 является безопасным только для судов с уровнем 3. Место NAABSA 1 безопасно для всех судов с категорией NAABSA вне зависимости от уровня.

С учетом вышесказанного предлагается следующая классификация:

NAABSA1 или SFA1 – допускается частичное или полное осушение подводной части корпуса в закрытых от волнения акваториях на ровных однородных песчано-галечных или песчано-илистых грунтах при отсутствии поступательного движения;

NAABSA2 или SFA2 – в дополнение к условиям, регламентируемым для NAABSA1, допускается наличие поступательного движения и ударного контакта носовой части днища с грунтом при ограниченных параметрах волнения и качки;

NAABSA3 или SFA3 – в дополнение к условиям, регламентируемым для NAABSA2, допускается осушение в заданной точке на удалении от уреза воды в закоренном состоянии в условиях качки, сопровождаемой ударными контактами с грунтом в любой точке днища.

3. МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РЕГЛАМЕНТАЦИИ

Правила РС [8] включают широкий спектр нормирующих зависимостей для обшивок, балок набора и корпуса. Как правило, для эксплуатационных нагрузок используется методология нормирования по допускаемым напряжениям, а для экстремальных нагрузок – нормирование по предельному состоянию. Поэтому при решении вопросов регламентации размеров связей использованы эти подходы.

Для судов, производящих посадку на грунт, характерно появление значительных концевых реакций грунта на корпус. В судостроении при продольных спусках судов с наклонных стапелей известна аналогичная задача с возникновением силы баксового давления, которая имеет порядок 14 – 30 % от спускового веса в начальной стадии всплытия. При проектировании спуска удельное давление на насалки ограничивается 15 – 18 кг/см² [9].

При проектировании плавучих доков используется понятие «коэффициента полноты эпюры доковой массы судна», отражающее неравномерность распределения погонной нагрузки. Наибольшее значение этого коэффициента равно 2/3 [8].

Сложным и малоизученным является вопрос о локальных давлениях в зоне контакта с грунтом. Расчетное сопротивление песчаных и галечных грунтов может изменяться в широком диапазоне от 100 до 600 кПа. Песчано-илистые грунты имеют более низкое сопротивление. Сопротивление грунтов нарастает с увеличением глубины внедрения и при

ударных воздействиях. В определенной мере аналогом грунту является лед. Ряд классификационных обществ, в том числе РС [10], используют эмпирическую зависимость для локальных ледовых давлений на морские сооружения

$$p = \sigma_c (1 + 2\sqrt{2/A_1}) \leq 10 \text{ МПа}, \quad (1)$$

где σ_c – предел прочности льда на сжатие;
 A_1 – расчетная площадь контакта, м².

Подобную формулу можно применить и для грунта. При этом следует учитывать, что предел прочности льда значительно превосходит сопротивление указанных грунтов, но по неоднородности структуры может значительно уступать грунтам.

Особым является вопрос запасов на износ. Скорости коррозионного износа обшивки при взаимодействии с грунтом не изучены, но очевидно, что могут быть большими. Традиционные для проектирования надбавки на износ Δs могут оказаться избыточными и не связанными с допускаемыми износами в эксплуатации судов [11]. Устранение этих недостатков обеспечивается прямым использованием коэффициентов допускаемых остаточных толщин в регламентирующих формулах в виде множителя $-(m_0 - 0,05)^{-1}$. Значение 0,05 связано с запасом на период класса РС.

4. РАЙОНЫ УСИЛЕНИЙ

Днище судов разделяется на три района усиления по длине корпуса: носовой – A , средний – B и кормовой – C . Расстояние от носового перпендикуляра до кормовой границы района усиления A определяется по формуле (принятые обозначения показаны на рис. 4.)

$$L_A = 0,3L(1 + 0,175\psi_0) - 20h_K \geq 2L_3. \quad (2)$$

Возвышение верхней границы носового района усиления над килевой линией

$$h_A = 0,1\psi L - h_K, \quad (3)$$

где ψ – расчетный угол дифферента при качке, рад.

Для среднего района усиления возвышение должно быть не менее:

$$h_B = (0,5B - B_K)\text{tg}\theta - h_K, \quad (4)$$

но может быть не более $h_{ДС}$,

где B_K – удаление от ДП ближайшего к борту фальшкиля, м;
 $h_{ДС}$ – высота днища и скулы до верхней кромки флоров у борта при лекальных обводах и до точки подъема килевого днища при упрощенных обводах, м;
 θ – расчетный угол крена при качке в месте посадки на грунт.

Для кормового района усиления формулы по структуре аналогичны формулам (2) и (3).

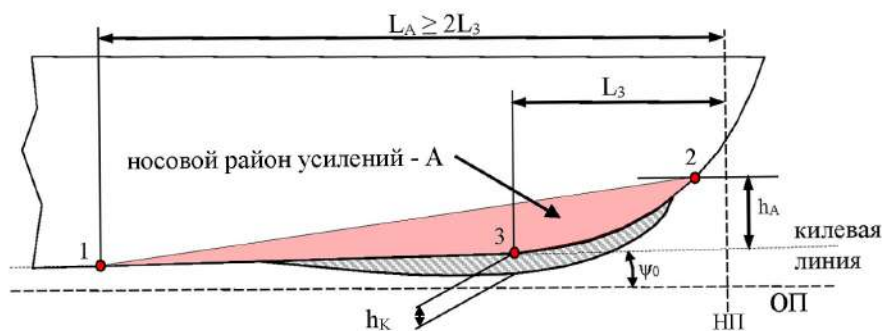


Рис. 4 Схема к определению границ носового района усилений:

1 — точка удаления от перпендикуляра; 2 — верхняя граница;

3 — точка для определения высоты внешней конструктивной защиты

При отсутствии качки (суда NAABSA1) углы крена и дифферента следует принимать равными возможным эксплуатационным значениям на тихой воде для конкретного судна с увеличением их на величины соответствующих углов наклона грунта в возможных местах посадки.

Внешняя конструктивная защита судов, работающих в режиме NAABSA, может включать фальшкили различной конфигурации форм сечений и мест размещения под днищем (см. рис. 5). Решения по конструкции и размещению фальшекилей должны приниматься с учетом их главной функции — первичное восприятие нагрузок со стороны грунта и смягчение условий контакта грунта с корпусом.

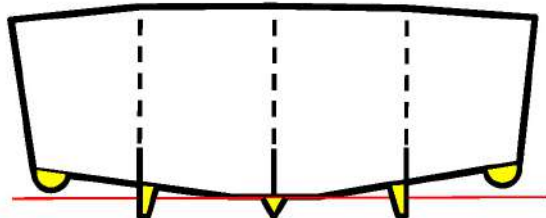


Рис. 5 Варианты фальшекилей

5. РАСЧЕТНЫЕ НАГРУЗКИ

Концевые реакции грунта в общем случае могут определяться по формуле:

$$R_N^m = \Delta_N \left[\frac{\text{tg}(\psi_N - \psi_0 - \psi_S - \psi_{0N})}{6} \frac{L}{d_N} \right] + R_{0N}, \quad (5)$$

где Δ_N — наибольшее водоизмещение судна, т, для режимов NAABSA;

d_N — осадка судна на миделе, соответствующая Δ_N ;

ψ_N — угол наклона грунта вдоль судна;

ψ_0 — угол конструктивного дифферента;

ψ_S — угол дифферента от распределения весовой нагрузки; ψ_{0N} и R_{0N} — угол дополнительного дифферента при выходе судна на грунт в движении и соответствующая реакция.

Величина R_{0N} и соответствующая сила трения должны быть ограничены возможностью стягивания судна с грунта упором винта и специальными устройствами. При посадке судна на грунт без поступательного движения и при идеальном сочетании углов теоретически возможно отсутствие концевой реакции по формуле (5). Нормативные значения изгибающих моментов и перерезывающих сил для корпуса судна приведены в табл. 2. Данные значения при наличии соответствующих расчетных обоснований могут быть уменьшены. Однако для судов с ударными контактами с грунтом приведенные значения следует учитывать при определении ограничивающих условий (скоростей, волнения) для процедуры обсушения.

Расчетная нагрузка, кН, на отсеки корпуса в состоянии полного обсушения

$$Q_{0S} = k_{\phi} g \Delta_N \frac{L_{0S}}{L_{BN}}, \quad (6)$$

где $k_{\phi} = 1,5$ — коэффициент неравномерности эпюры масс судна;

L_{0S} — длина отсека/трюма судна;

L_{BN} — расчетная длина днища по килевой линии.

При проектировании и проверках прочности отсеков судна рекомендуется дополнительно учитывать неравномерность распределения нагрузки по отсеку.

Расчетные давления, кПа, на конструктивные элементы — пластины и балки набора, непосредственно воспринимающие действие грунта,

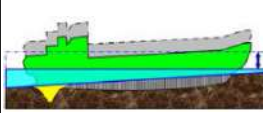
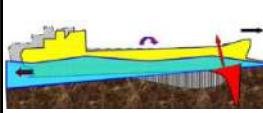
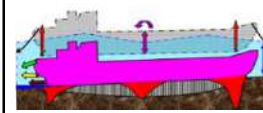
$$p_i = 10d_N (1 + 4/\sqrt{A_i}), \quad (7)$$

где $10d_N$ — принимаемое номинальное давление для днища судна, кПа;

A_i — площадь зоны локального деформирования/разрушения данного элемента, м².

Таблица 2

Максимальные изгибающие моменты и перерезывающие силы корпуса судов NAABSA или SEA в соответствии с уровнем специализации и безопасности

Обозначение, размерность	1	2	3
			
M_N , кН·м N_N , кН	$-0,363\Delta_N L$ $2,45\Delta_N$	$-0,629\Delta_N L$ $3,27\Delta_N$	$-0,921\Delta_N L$ $4,09\Delta_N$

6. ТРЕБОВАНИЯ К ТОЛЩИНАМ ОБШИВКИ И ЛИСТОВЫХ СВЯЗЕЙ

Толщина обшивки днища и скулы, мм, в районах прямого воздействия грунта и отсутствия внешней конструктивной защиты должна быть не менее

$$s = 15,8ak_\alpha \sqrt{\frac{k_p p}{k_\sigma R_{eH}}} (m_0 - 0,05)^{-1}, \quad (8)$$

где a – размер меньшей стороны пластины (шпация основного набора), м;

b – размер большей стороны пластины, м;

$\alpha = a/b$ – соотношение сторон пластины;

$k_\alpha = \left(\frac{1 - \alpha + \pi\alpha/6}{1 - \alpha + \pi\alpha/2} \right)$ – коэффициент соотношения сторон пластины;

k_p – коэффициент запаса для пластин равный 1,5;

p – расчетное давление грунта, кПа, определяемое по формуле (7) при $A_i = a \times b$;

$k_\sigma = 0,95 - 0,42L/100$ – при поперечной системе набора в среднем районе корпуса и равный 0,9 – в других случаях;

R_{eH} – верхний предел текучести, МПа;

m_0 – коэффициент допускаемых остаточных толщин обшивки в эксплуатации, равный 0,80 для районов специальных усиления корпуса.

При наличии в данном районе корпуса внешней конструктивной защиты толщина обшивки днища и скулы в этом районе может быть определена по формуле (8) при значениях $k_p = 1$ и $m_0 = 0,7$. В любом случае толщина обшивки днища и скулы должна удовлетворять требованию правил РС к минимальным толщинам.

Для судов, работающих в режимах NAABSA2 и NAABSA3, в районах ударных нагрузок и при отсутствии внешней конструктивной защиты толщина обшивки днища и скулы по условию ограничения бухтин дополнительно должна быть не менее

$$s = \frac{k_p p a b}{\pi f_0 R_{eH}} (m_0 - 0,05)^{-1}, \quad (9)$$

где $f_0 = 0,06a$ – допускаемый остаточный прогиб бухтин при освидетельствованиях.

При установке промежуточного набора толщина обшивки днища и скулы может быть уменьшена по специальному согласованию.

Толщины листовых конструкций – стенок флоров, днищевых стрингеров, вертикального киля и прилегающих к обшивке днища и скулы листов поперечных и продольных переборок должны удовлетворять требованиям правил РС к минимальным толщинам.

Листовые конструкции должны подкрепляться ребрами жесткости, ориентированными вертикально или перпендикулярно к наружной обшивке. Интервалы между ребрами жесткости, как правило, не должны превышать регламентируемой правилами РС нормальной шпации в данном районе корпуса.

В случае отклонений толщин листовых связей от указанных условий рекомендуется проверка в соответствии с положениями и требованиями к ледовым усилениям правил РС. При этом расчетные давления должны определяться по формуле (7) при $A = a^2/2$, где a – расстояние между ребрами жесткости или шпация, что меньше.

7. ТРЕБОВАНИЯ К БАЛКАМ НАБОРА

В районах прямого воздействия грунта на обшивку и отсутствия внешней конструктивной защиты предельный момент сопротивления, см³, поперечного сечения балок основного набора должен быть не менее определяемого по формуле

$$W_0 = \frac{1000k_p p a l^2}{mk_\sigma R_{eH}} k_\alpha k_k (m_0 - 0,05)^{-1}, \quad (10)$$

где k_p – коэффициент запаса для экстремальных нагрузок на балки, равный 1,35;

p – расчетное давление грунта, кПа, определяемое по формуле (7) при $A_i = 2a \times l$;

a – расстояние (шпация) между балками набора, м;

l – длина пролета балки, м;

$\alpha = a/l$ – соотношение шпации и длины пролета;
 $k_\alpha = 1 - \alpha^2/2 + \alpha^3/8$ – коэффициент;
 $k_k = 0,914$ – коэффициент учета перераспределения (концентрации у опор) нагрузки;
 $m_0 = 0,80$ – коэффициент допускаемого остаточного момента сопротивления;
 $m = 12$ – коэффициент изгибающего момента;
 $k_\sigma = 0,95 - 0,42L/100$ – для продольных балок среднего района и 0,9 – для прочих;
 R_{eH} – верхний предел текучести, МПа.

Дополнительно площадь поперечного сечения стенки, см², балки основного набора должна быть не менее определяемой по формуле

$$f_c = \frac{5k_{pal}(1 - \alpha/2)}{0,57k_\sigma R_{eH}} (m_0 - 0,05)^{-1}. \quad (11)$$

При наличии в данном районе корпуса внешней конструктивной защиты предельный момент сопротивления и площадь поперечного сечения стенки балки в этом районе может быть определена по формулам (10) и (11) при значениях $k_p = 1$ и $m_0 = 0,7$.

Определение фактического предельного момента сопротивления и площади поперечного сечения балок набора может быть выполнено по формулам, приведенным в главе 3.10 «Ледовые усиления судов ледового плавания и ледоколов» части II «Корпус» правил РС [8].

Для судов NAABSA1 вместо формул (10) и (11) требования к минимальному моменту сопротивления и площади сечения стенок балок могут определяться по базовым формулам правил РС при $m = 12$, $\sigma_n = R_{eH}$ и $\tau_n = 0,57R_{eH}$.

При установке промежуточного набора требования к моментам сопротивления и площадям поперечных сечений стенок балок основного набора могут быть снижены по специальному согласованию.

Требования к параметрам балок рамного набора, которые можно отнести к однопролетным, допускается определять по формулам (10) и (11), при этом: $k_p = 1,15$, расчетное давление грунта определяется при $A_i = 2a \times 1$ без учета возможного противодействия грузов; a – расстояние (интервал) между балками рамного набора, м; $k_k = 1$. При определении фактической площади поперечного сечения стенки балки рамного набора площадь сечения по некомпенсированным вырезам должна вычитаться (нетто-сечение).

8. ПРОЧНОСТЬ ОТСЕКОВ КОРПУСА, ШТЕВНЕЙ И ФАЛЬШКИЛЕЙ

Как правило, балки днищевых рамного набора имеют сложную систему связей и их не следует

относить к однопролетным балкам. Прочность рамного набора может быть проверена на основании расчетов днищевых перекрытий как стержневой системы. При наличии пиллерсов и раскосов прочность должна проверяться в составе всего отсека корпуса как стержневой системы. Расчетные нагрузки на перекрытие/отсек судна определяются по формуле (6). По результатам расчетов определяются сечения с наибольшими приведенными напряжениями. При построечных размерах связей эти напряжения, МПа, не должны превышать:

$(0,95 - 0,42L/100)(m_0 - 0,05)R_{eH}$ – для продольного набора среднего района;

$0,9(m_0 - 0,05)R_{eH}$ – в других случаях.

Сжимающие нагрузки на пиллерсы и раскосы определяются непосредственно в результате расчетов, при этом размеры их сечений должны удовлетворять условиям прочности и устойчивости по правилам РС.

При расчетах прочности перекрытий/отсеков допускается учитывать влияние элементов внешней конструктивной защиты корпуса при условии, что они непрерывны по всей длине перекрытия/отсека. Дополнительно в составе отсеков могут также учитываться непрерывные комингсы люков.

Пример анализа напряжений половины отсека корпуса с учетом пиллерсов представлен на рис. 6. Он показывает, что обустройство двух наружных фальшкилей позволяет значительно (в два раза) снизить уровень напряжений.

Дополнительно сформулированы требования к проверке прочности форштевня, ахтерштевня и фальшкилей. Штевни судов, работающих в режиме NAABSA, в нижней части перехода в киль рекомендуются с выступающим за внешнюю поверхность обшивки или наружным брусом. Прочность штевней может проверяться как криволинейной балки переменного сечения на восприятие расчетной нагрузки, которая должна приниматься не менее величины концевой реакции грунта по формуле (5). Коэффициент допускаемых приведенных напряжений 0,675. Для ахтерштевней рекомендуется подъем пятки от старпоста в направлении кормы.

Крепление фальшкилей к наружной обшивке следует осуществлять через промежуточные элементы – накладные полосы с учетом практики крепления привальных брусков и скуловых килей по правилам РС. При этом сварное соединение фальшкиля должно быть относительно слабее сварного соединения накладной полосы с обшивкой. Проектирование фальшкилей по предельному состоянию допускается на срок эксплуатации меньше нормативного срока службы судна.

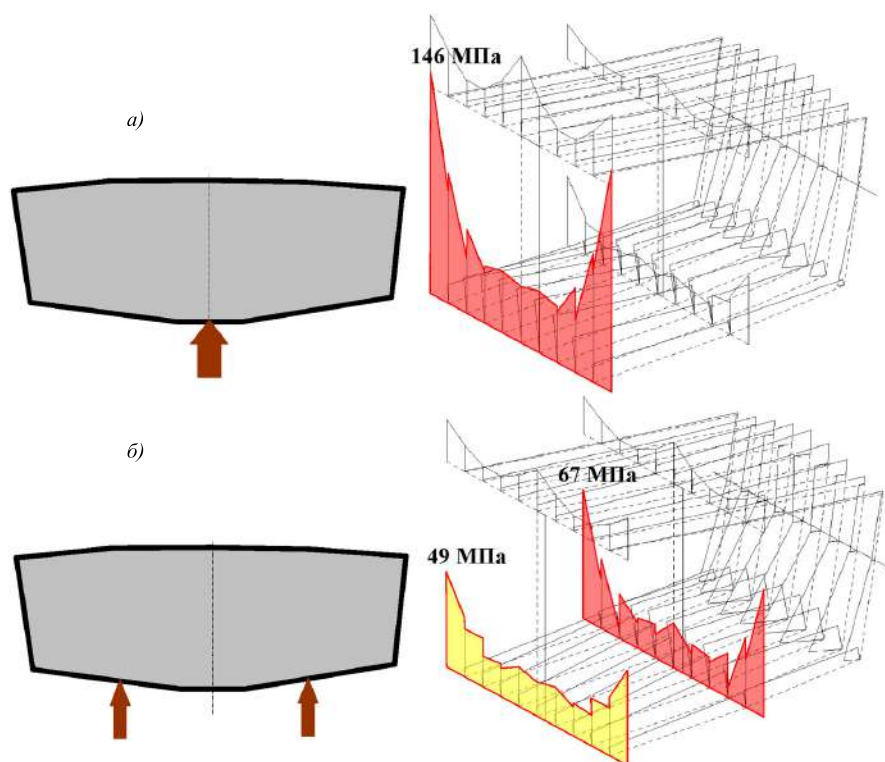


Рис. 6 Анализ напряжений отсека корпуса судна проекта 692:

а – при посадке на горизонтальный киль;

б – при посадке на два фальшкиля

9. ПРОВЕРКА ОБЩЕЙ ПРОДОЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ

Суда, нормальная эксплуатация которых предусматривает посадку на грунт, должны удовлетворять требованиям разд. 1.4 «Продольная прочность» части II «Корпус» правил РС [8]. Учитывая значительные концевые реакции на корпус дополнительно, вне зависимости от длины, для судов NAABSA2 и NAABSA3 следует выполнять проверку остаточных (фактических) предельных моментов сопротивлений корпуса, которые не должны быть меньше допустимого остаточного предельного момента сопротивления поперечных сечений корпуса. Необходимость такой проверки для судов NAABSA1 определяется по согласованию с РС.

Допускаемый остаточный предельный момент сопротивления (см^3) поперечного сечения корпуса определяется по формуле

$$W_{\text{прост}} i = 1,1 \frac{|0,92 M_{Ni} + M_{SW}|}{R_{eH}} 10^3, \quad (12)$$

где M_{Ni} – расчетный изгибающий момент, $\text{кН}\cdot\text{м}$, по табл. 2;

i – индекс уровня специализации и безопасности судна NAABSA;

R_{eH} – верхний предел текучести материала палубы (днища), МПа.

Остаточные (фактические) предельные моменты сопротивлений поперечных сечений судов в эксплуатации определяются на основе данных дефектаций с учетом замеров остаточных толщин и остаточных деформаций связей корпуса.

На стадии проектирования или модернизации судна остаточные предельные моменты сопротивлений поперечных сечений корпуса к концу срока службы могут определяться приближенно при следующих допущениях:

- средние износы всех связей корпуса доходят до 30 %;
- днище имеет деформации в расчетном сечении на ширине в сумме до 50 %;
- корпус судна находится в состоянии прогиба от концевой реакции грунта;
- сжатые гибкие связи палубы и верхней части бортов исключаются;
- растянутые связи днища с деформациями исключаются.

Суда четвертого из указанных проектов формально не предназначены для осушения на грунте, однако их малая осадка и качества корпуса в принципе позволяют претендовать на высокий уровень приспособленности к рассматриваемым условиям работы. Кроме того, эти суда в 10 раз тяжелее судов предшествующего проекта, что существенно расширяет зону размерного ряда.

Результаты тестирования сведены в табл. 3. Видно, что расчетные давления для пластин обшивки превышают номинальные в 5 – 6 раз. Требуемые (расчетные) толщины обшивки во всех случаях превышают минимальные регистрационные толщины на 8 – 35 %. Отличие увеличивается с ростом размеров судов.

- Таблица 3

[illegible]

Определение расчетных толщин по критерию предельного состояния, как правило, обеспечивает возможность снижения веса конструкций за счет резервов пластической прочности. Для судов длиной менее 100 м дополнительное требование по условию образования бухтин типа «тычков» не ведет к увеличению требований к толщине.

Предложенная регламентация в целом не противоречит опыту проектирования судов. Очевидно, что в практике проектирования заметную роль будет играть килеватость днища и другие конструктивные решения, например внешняя защита. Их учет требует дальнейших исследований и предполагается, что до накопления опыта снижение требований к толщинам обшивки должно оставаться предметом специального рассмотрения РС.

Для балок основного набора требования по условиям изгибной прочности перекрывают требования по условиям сдвиговой прочности. Нормирование по предельному состоянию, как и в случае с обшивкой, выявляет более существенные запасы, чем нормирование по допускаемым напряжениям.

Значительное, почти 2-кратное, отступление относится к наиболее крупному судну проекта 15881. Формально это говорит о недопустимости полного осушения. Однако при эксплуатационных ограничениях на загрузку судна в режиме NAABSA и при условии учета противодействия балласта в днищевых отсеках возможно положительное решение. Прием балласта в двойное дно ведет к некоторому повышению веса судна, что также требует специальных расчетных обоснований.

В части рамного набора и прочности отсеков все суда практически удовлетворяют предлагаемым требованиям. При проектировании рамного набора предпочтение следует отдавать методике допускаемых напряжений с выявлением мест наибольших напряжений. При нормировании рекомендуется использовать приведенные напряжения для учета изгибной и сдвиговой прочности в их совокупности. Уровень допускаемых напряжений не должен превышать таковой для балок основного набора.

Проблемы могут возникать с увеличением уровня специализации и безопасности судов NAABSA. Например, дефицит до 12 % есть у наименьшего из судов NAABSA2. На практике такая проблема может быть решена при условии износа обшивки в носовом районе менее 20 %, либо путем ее замены или подкрепления, а также при наложении обоснованных эксплуатационных ограничений по волнению и скорости поступательного движения при выходе судна на грунт.

В части общей продольной прочности все рассмотренные суда могут претендовать на уровень NAABSA1, в том числе и судно длиной 114 м с ограничениями. Суда длиной до 50 м имеют

значительные запасы общей прочности и на начало эксплуатации могут претендовать как на уровень NAABSA2, так и на уровень NAABSA3. Однако срок их соответствия может быть существенно ниже нормативного срока службы. Часто такие суда имеют малые толщины и поперечную систему набора палубы и бортов (проекты 20150 и 698), которые с ростом износа быстро снижают устойчивость пластин. Если дополнительно к износам учесть возможные деформационные повреждения днища, то указанные значительные запасы будут ограниченными во времени.

В целом представленные результаты тестирования показывают приемлемый для практики уровень рекомендованных расчетных нагрузок и принципов оценки запасов прочности. Однако они показали, что для судов, работающих в режимах NAABSA, особое значение имеют ограничения для капитанов и проверки общей прочности судов в эксплуатации. Последнее крайне важно для судов больших размеров. Косвенно это подтверждается и тем, что классификационные общества BV и LR, имея специальные главы в своих правилах, не распространяют их действие на суда длиной более 90 м.

ВЫВОДЫ

В результате работы выполнен обзор мирового и отечественного опыта эксплуатации судов, использующих принцип осушения на грунте (режим NAABSA). Специфика отечественного судоходства отличается широким спектром условий использования такой техники.

На основе анализа опыта классификации, проектирования, постройки и эксплуатации таких судов предложена их новая классификация, удовлетворяющая отечественным нуждам.

Разработаны предложения по расчетным нагрузкам и нормативным требованиям, включая конструктивные особенности и регламентирующие зависимости для размеров связей.

Проверка предложенных требований выполнена в широком диапазоне размеров судов с водоизмещением от 80 до 8900 т. Она показала их адекватность опыту и приемлемый для практики уровень рекомендованных расчетных нагрузок и принципов оценки запасов прочности.

Результаты работы вносят вклад в развитие нормативно-методических требований РС, но не могут охватить широкий спектр вопросов, связанных с безопасностью эксплуатации судов данной группы. Для этого нужны более масштабные исследования, включая натурные эксперименты (например [12]), заинтересованность государст-

венных и коммерческих структур в развитии судоходства и освоении удаленных побережий, их ресурсов. Большое значение для безопасности имеют «человеческий фактор» и необходимость повышения уровня профессиональной квалификации судоводителей для данной группы судов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вспомогательные суда морского флота России: Каталог: ЦНИИМФ. – СПб, 1998.
2. Корабли ВМФ СССР. Справочник в четырех томах. Том IV. Десантные и минно-тральные корабли. – СПб.: «Галей Принт», 2007.
3. <http://cdn2.shipspotting.com/photos/middle/4/7/6/1252674.jpg>
4. МАКО. Символика классификации судов. Справочник. – СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2015.
5. Циркулярное письмо Российского морского регистра судоходства. № 340-21-810ц от 07.04.2015.
6. Rules for the Classification of Steel Ships. Bureau Veritas. BV. 2012.
7. Rules for High Speed, Light Craft and Naval Surface Craft. Det Norske Veritas. DNV. Part 5 Chapter 7, Naval Landing Craft, 2004.
8. Правила классификации и постройки морских судов. – СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2015.
9. Курдюмов А.А., Гайсенко А.А., Глоzman М.К., Готов В.К., Козляков В.В. и др. Спуск судов. – Л.: Судостроение, 1966.
10. Правила классификации, постройки и оборудования плавучих буровых установок и морских стационарных платформ. – СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2015.
11. Правила классификационных освидетельствований судов в эксплуатации. – СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2015.
12. Мамонтов А.И., Шмелёв А.М., Фролова А.О. Натурный эксперимент: определение давления на корпус судна при контакте с грунтом // Морские интеллектуальные технологии. – 2015. – № 4 (30). Т.2. – С.8–18.

УДК 629.12.001.2

ЧИСЛЕННАЯ ПРОВЕРКА МЕТОДИКИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ РАМНОГО БОРТОВОГО НАБОРА НАДВОДНОГО КОРАБЛЯ НА ОСНОВЕ ТРЕБОВАНИЙ ПРАВИЛ КЛАССИФИКАЦИОННЫХ ОБЩЕСТВ

В.Н. Тряскин, д-р техн. наук, проф., ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет», e-mail: tryaskin.vn@yandex.ru, Санкт-Петербург

И.В. Дехтярь, аспирант, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет», e-mail: irina.dekhtyar@yandex.ru

Представлена численная проверка методики проектирования поперечного рамного бортового набора надводного корабля – рамных шпангоутов, расположенных между палубами и платформами за пределами машинно-котельного отделения, с использованием поисковой процедуры параметрического проектирования. Ограничения формируются на основе требований Правил классификации и постройки надводных кораблей Бюро Веритас и Правил классификации и постройки морских судов (в части ледовых усилений) Российского морского регистра судоходства.

Ключевые слова: параметрическое проектирование, неразрезная балка, математическое программирование, рамная балка, функция цели.

NUMERICAL VERIFICATION OF DESIGN METHODOLOGY BASED ON THE CLASSIFICATION SOCIETIES REQUIREMENTS IN APPLICATION TO WEB FRAMES OF NAVAL SHIPS

V.N. Tryaskin, DSc, professor, FSEI State Marine Technical University of St. Petersburg, e-mail: tryaskin.vn@yandex.ru

I.V. Dekhtyar, postgraduate, FSEI State Marine Technical University of St. Petersburg, e-mail: irina.dekhtyar@yandex.ru

This article considers the problem of numerical verification of transverse web frames parametrical design. Such structures are web frames between decks and platforms outside engine room. The problem is reduced to nonlinear optimization task. Restrictions in the form of inequalities are based on the requirements of Bureau Veritas Rules and Russian Maritime Register of Shipping Rules as applied to ice strengthening.

Keywords: parametrical designing, continuous beam, mathematical programming, web frame, goal function.

1. КОНСТРУКЦИЯ БОРТА НАДВОДНОГО КОРАБЛЯ

Бортовые конструкции надводных кораблей класса «фрегат» и выше во всех районах корпуса судна по длине имеют продольную систему набора. Продольные бортовые балки располагаются на расстоянии 300 – 500 мм приблизительно по нормали к наружной обшивке. Рамные шпангоуты, которые опираются на палубы или платформы, устанавливаются в плоскости флоров днищевых перекрытий (через 1,5 – 2,0 м). Рамный шпангоут выполняется из сварного таврового профиля, высота стенки которого увеличивается к нижнему опорному сечению. При пересечении с промежуточными палубами рекомендуется обеспечивать непрерывность стенки и пояска.

В машинно-котельном отделении (МКО), как правило, одна из промежуточных палуб или платформ отсутствует (пропадает). В плоскости этой палубы с каждого борта устанавливаются стрингеры. Назначение бортовых стрингеров – создание промежуточных упругих опор для рамных шпангоутов. Чтобы бортовые стрингеры эффективно выполняли эту функцию, вместо некоторых рамных шпангоутов (на расстоянии 3,0 – 4,5 м) устанавливаются усиленные рамы.

Стенка рамного шпангоута при пересечении с бортовым стрингером разрезается.

В нижнем опорном сечении рамный шпангоут соединяется с флором при помощи приставной или встроенной кницы. Свободный поясok рамного шпангоута соединяется с крайним междудонным листом или с настилом второго дна через переходную вставку.

Соединение рамных шпангоутов с рамными бимсами палуб и платформ в практике конструкторских бюро принято осуществлять при помощи встроенных (вварных) книц или книц, являющихся продолжением стенки рамного бимса. Соединение с приставными кницами допускаются при значительной разнице высот одной из соединяемых балок, а также при соединении рамных шпангоутов с рамными бимсами промежуточных палуб.

2. ТРЕБОВАНИЯ К РАМНЫМ БАЛКАМ БОРТОВОГО НАБОРА¹

2.1. Расчетные нагрузки

При проектировании бортовых конструкций корпуса корабля должна учитываться следующая

совокупность расчетных нагрузок: статические нагрузки (давления) на тихой воде p_s ; дополнительные (квазистатические) волновые давления p_w ; статические p_{SF} и волновые p_{WF} давления при аварийной посадке корабля, обусловленной аварийным затоплением отсека (группы отсеков); гидродинамическое давление при бортовом слеминге p_{SL} ; ледовые нагрузки, которые характеризуются контактным давлением p_{Ice} , высотой b_{Ice} и длиной l_{Ice} зоны контакта корпуса корабля со льдом.

Волновые дополнительные нагрузки для неповрежденного состояния корабля определяются для нескольких возможных случаев движения корабля:

на встречном волнении;

на попутном волнении;

косым курсом по направлению к распространению волнения с учетом крена и дифферента.

Проектирование поперечного набора целесообразно выполнять отдельно для каждого типа нагрузки. Расчетными будут те нагрузки, которые приводят к наибольшим размерам балок бортового набора.

2.2. Расчетные модели

При проектировании рамного бортового набора, расположенного за пределами МКО, используется модель неразрезной балки. На разных участках по высоте борта (в разных твиндеках) размеры рам различаются в связи с изменением расчетной нагрузки. В общем случае (учитывая особенности формы корпуса корабля) на каждом участке борта рамные балки представляют собой криволинейный стержень, размеры поперечного сечения которого изменяются по пролету. Эта конструктивная особенность может быть учтена при компоновке расчетной модели. Соотношение высоты балки и пролета таково, что при раскрытии статической неопределенности, например, в рамках метода трех моментов, необходимо учитывать влияние сдвига.

Расчетная модель, которая должна рассматриваться при проектировании рамного бортового набора в МКО, значительно более сложная. Она представляет собой перекрытие, включающее вертикальные непризматические криволинейные стержни – рамные шпангоуты и усиленные рамы, и горизонтальный стержень переменного сечения – бортовой стрингер.

В настоящей статье рассматривается задача о проектировании рамного набора борта, расположенного за пределами МКО, т.е. задача проектирования рамных шпангоутов с использованием модели неразрезной или однопролетной балки.

2.3. Нормативы прочности и расчетные зависимости

Требования к прочности рамного шпангоута формулируются применительно к нетто-размерам. Добавки на износ составляют 0,0 – 0,5 мм – согласно

¹Требования к рамным балкам заимствованы из правил Бюро Веритас (BV) [1] и Российского морского регистра судоходства (РС) [2] в части ледовых усилений.

требованиям правил BV [1] и 1,2 – 2,52 мм – согласно требованиям правил РС [2] для рамных шпангоутов, расположенных в районе ледовых усилений.

Требования к размерам рамных шпангоутов при расчете на эксплуатационные нагрузки в [1] получены в предположении работы элементов шпангоутов в упругой стадии. Согласно этим требованиям, нормальные и касательные напряжения не должны превосходить величин, определяющихся следующими условиями:

$$\frac{R_y}{\gamma_R \gamma_m} \geq \sigma; 0,5 \frac{R_y}{\gamma_R \gamma_m} \geq \tau, \quad (1)$$

где R_y – предел текучести стали;
 $\gamma_R = 1,15$ и $\gamma_m = 1,02$ – коэффициенты запаса, учитывающие неопределенность определения расчетных напряжений и предела текучести материала.

С учетом этих нормативов требуемый момент сопротивления нетто w , см³, и нетто-площадь сечения стенки A_{sh} , см², определяются по формулам:

$$w = \gamma_R \gamma_m \beta_b \frac{\gamma_{S2} \lambda_{bs} p_S + \gamma_{W2} \lambda_{bw} p_W}{m R_y} s l^2 10^3, \quad (2)$$

$$A_{sh} = 10 \gamma_R \gamma_m \beta_s \frac{\gamma_{S2} \lambda_{ss} p_S + \gamma_{W2} \lambda_{sw} p_W}{R_y} s l, \quad (3)$$

где γ_{S2} , γ_{W2} – частные коэффициенты запаса, учитывающие неопределенности (погрешности) определения нагрузок на тихой воде и на волнении, характеристик поперечного сечения балок набора;
 β_b , β_s – коэффициенты, характеризующие условия закрепления балок в опорных сечениях;
 λ_{bs} , λ_{bw} , λ_{ss} , λ_{sw} – коэффициенты, учитывающие характер изменения нагрузки по пролету рамного шпангоута;
 l – расчетный пролет, м;
 s – расстояние между рамными шпангоутами, м.

Размеры рамных шпангоутов при расчете на аварийные нагрузки определяются условиями предельной прочности:

$$w = \gamma_R \gamma_m \beta_b \frac{\gamma_{S2} \lambda_{bs} p_{SF} + \gamma_{W2} \lambda_{bw} p_{WF}}{16 c_p R_y} s l^2 10^3, \quad (4)$$

$$A_{sh} = 10 \gamma_R \gamma_m \beta_s \frac{\gamma_{S2} \lambda_{ss} p_{SF} + \gamma_{W2} \lambda_{sw} p_{WF}}{R_y} s l, \quad (5)$$

где c_p – соотношение между пластическим и упругим моментом сопротивления (при отсутствии точных данных допускается принимать $c_p = 1,16$).

Требования к размерам рамных шпангоутов при воздействии нагрузки от слеминга в соответствии с требованиями правил BV устанавливаются проверочным расчетом с использованием МКЭ-модели (в данной статье не рассматриваются).

При расчетах на ледовые нагрузки правилами РС формулируются требования к предельному моменту сопротивления поперечного сечения рамного шпангоута W_p и площади сечения, воспринимающей предельную перерезывающую силу A_p из условия предельной прочности. Упрощенно их можно представить в следующем виде:

$$W_p \geq k_p W_{p0}(p_{Ice}; b_{Ice}; l_{Ice}; s_0; s; R_y; l), \quad (6)$$

$$A_p \geq A_{p0}(p_{Ice}; b_{Ice}; l_{Ice}; s_0; s; R_y; l), \quad (7)$$

где $k_p W_{p0}(p_{Ice}; b_{Ice}; l_{Ice}; s_0; s; R_y; l)$ – требуемый пластический момент нетто-сопротивления и $A_{p0}(p_{Ice}; b_{Ice}; l_{Ice}; s_0; s; R_y; l)$ – требуемая площадь сечения нетто-профиля, воспринимающая предельную перерезывающую силу (p_{Ice} ; b_{Ice} ; l_{Ice}) и параметров конструкции (расстояния между продольными балками s_0 , расстояния между рамными шпангоутами s , предела текучести стали R_y), определяемые согласно 3.10.4.7.1 и 3.10.4.7.2 правил РС [2].

2.4. Ограничения на размеры элементов рамных балок

При анализе правил BV и РС [1, 2] получены следующие рекомендации для рамных балок бортового набора:

1 нетто-момент сопротивления рамного шпангоута в рассматриваемом твиндеке не может быть меньше, чем в выше расположенном, смежном с ним;

2 размеры элементов поперечного набора зависят от размеров балок продольного набора через соотношение

$$h_w < k h_0, \quad (8)$$

где h_w – высота балки поперечного рамного набора;
 h_0 – высота балки продольного набора;
 $k = 1,7$ – в общем случае;
 $k = 2,0$ для ледовых усилений;

3 высота стенки шпангоута от днища к палубе может постепенно уменьшаться, максимально допустимое изменение высоты составляет 8 см на 1 м;

4 каждый шпангоут в нижнем опорном сечении должен оканчиваться кницей.

3. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ РАМНЫХ ШПАНГОУТОВ В РАЙОНАХ ЗА ПРЕДЕЛАМИ МКО

Параметрическое проектирование конструкций – процесс определения размеров конструктивных элементов, удовлетворяющих требованиям нормативных документов [3].

Математическая модель задачи проектирования:

$$GF(X) \rightarrow Extr \quad (9)$$

при ограничениях:

$$h_j(X) = 0, j = 1, \dots, m, \quad (10)$$

$$g_j(X) \geq 0, j = m + 1, \dots, p \quad (11)$$

и граничных условиях:

$$(x_i)_{min} \leq x_i \leq (x_i)_{max}, i = 1, \dots, k, \quad (12)$$

где $X = [x_1, \dots, x_k]^T$ – вектор-столбец независимых переменных – варьируемых конструктивных параметров;

$GF(X)$ – функция цели;
 $h_j(X)$ – ограничение в виде равенств;
 $g_j(X)$ – ограничения-неравенства [3].

В соответствии с основными положениями методологии автоматизированного проектирования конструкций корпуса судна/корабля, предложенной в [3], проектирование рамного набора реализуется после проектирования листовых элементов и балок основного набора. Таким образом, к началу рассматриваемого этапа мы располагаем информацией о толщине бортовой обшивки и размерах бортовых продольных балок. Задача проектирования балок основного набора рассмотрена в [4].

Исходные данные задачи следующие:

n – количество участков, на которые разбивается рамный шпангоут палубами и платформами;

l_i – пролет шпангоута на i -м участке, м, $i = 1, \dots, n$;

t_i – толщина наружной обшивки на i -м участке, мм, $i = 1, \dots, n$;

$h_{0,i}$ – высота продольной бортовой балки на i -м участке, мм, $i = 1, \dots, n$;

$P_s, P_w, P_{SF}, P_{WF}, P_{Ice}, b_{Ice}, l_{Ice}$ – параметры расчетных нагрузок на каждом участке, кПа;

R_y – предел текучести материала рамных шпангоутов, МПа;

s – расстояние между рамными шпангоутами, м.

В качестве варьируемых параметров примем: $x_i = A_{0,i}$ – среднее значение площади сечения изолированного профиля рамного шпангоута на участке i , см². Тогда вектор варьируемых переменных $X = \{x_i\}^T, i = 1, \dots, n$.

Целевая функция:

$GF(X) = \sum_{i=1}^n x_i l_i$, см²м – характеристика массы поперечного рамного набора, которая минимизируется при следующих возможных ограничениях-неравенствах:

$$g_{1,i}(X) = \left(\frac{x_i}{C_w}\right)^{1,5} - 10^3 \gamma_R \gamma_m \beta_b \frac{\gamma_{S2} \lambda_{sb} P_{s,i} + \gamma_{W2} \lambda_{wb} P_{w,i}}{m R_y} \times \\ \times s l_i^2 \geq 0, i = 1, \dots, n; \quad (13)$$

$$g_{2,i}(X) = \alpha_{sh} x_i - 10 \gamma_R \gamma_m \beta_s \frac{\gamma_{S2} \lambda_{sb} P_{s,i} + \gamma_{W2} \lambda_{wb} P_{w,i}}{R_y} \times \\ \times s l_i \geq 0, i = 1, \dots, n; \quad (14)$$

$$x_{i(\min)} \leq x_i \leq x_{i(\max)}, i = 1, \dots, n. \quad (15)$$

Значения коэффициентов утилизации площади по моменту сопротивления C_w и параметра α_{sh} , определяющих функциональную связь между площадью сечения изолированного профиля x_i , нетто-моментом сопротивления сечения с присоединенным пояском $W_i = (x_i / C_w)^{1,5}$ и площадью сечения стенки балки (площадью среза) $A_{sh,i} = \alpha_{sh} x_i$ соответственно, могут быть найдены по данным сортамента на сварные составные профили, которые

широко используются при проектировании рамного набора надводных кораблей.

Коэффициент расчетного изгибающего момента в первом приближении может быть принят по рекомендациям правил [1] $m = 12$.

Ограничения снизу на значения варьируемых параметров следует принять с учетом соотношения высот стенок балок основного набора и рамных балок: $h_w \geq 1,7 h_0$, используя данные сортамента на сварные составные профили $A_0 = f(h_w)$.

Ограничения сверху можно не учитывать.

Аналогичным образом формируются ограничения-неравенства при проектировании рамных шпангоутов на аварийную нагрузку с учетом формул (8) – (10).

Требования к размерам рамных шпангоутов при воздействии нагрузки от слеминга в соответствии с требованиями правил BV устанавливаются проверочным расчетом с использованием МКЭ-модели [5].

На ледовые нагрузки проектируется рамный шпангоут только на участке, расположенном в районе ледовых усилений. Основываясь на требованиях правил РС в части ледовых усилений – формулы (6) и (7), можно получить следующие ограничения:

$$g_{1,i}(X) = C_p \left(\frac{x_i}{C_w}\right)^{1,5} - k_p W_0 \times \quad (16)$$

$$\times (p_{Ice}; b_{Ice}; l_{Ice}; a_i; a_1; R_{eH}; l_i) \geq 0,$$

$$g_{2,i}(X) = \alpha_{sh} x_i - A_0(p_{Ice}; b_{Ice}; l_{Ice}; a_i; a_1; R_{eH}; l_i) \geq 0, \quad (17)$$

где индекс i касается только участка, где возможны воздействия льда (ледовый пояс). В ограничении (16) C_p – коэффициент, определяющий соотношение между пластическим и упругим моментом сопротивления (на начальном этапе проектирования может быть принят равным 1,16).

Учитывая рекомендации, представленные в 2.4.1, задача должна быть дополнена ограничением

$$g(X) = x_{i+1} - x_i \geq 0, i = 1, \dots, n. \quad (18)$$

Поскольку высота стенки рамного шпангоута в соответствии с условием, представленным в 2.4.2, зависит от принятой высоты продольной бортовой балки, в состав ограничений необходимо включить ограничение

$$g(X) = h_w(x_i) - h_{w,min} \geq 0, i = 1, \dots, n. \quad (19)$$

При этом зависимость высоты стенки рамы от площади сечения изолированного профиля $h_w(x_i)$ можно установить по данным сортамента на сварной тавровый профиль.

Рекомендации, представленные в 2.4.3, могут быть формализованы в виде ограничения-неравенства

$$g(X) = \frac{1000 l_i}{8} - [h_w(x_{i+1}) - h_w(x_i)] \geq 0, i = 1, \dots, n. \quad (20)$$

Задача, представленная в виде совокупности зависимостей (8) – (20), может быть успешно решена с использованием инструмента *Microsoft Excel* «Поиск решения». В результате находятся значения площади сечения составного таврового нетто-профиля на разных участках по высоте борта. В табл. 1 приведены значения площадей сечения, см^2 , изолированного профиля рамного набора борта при расчете на эксплуатационные нагрузки.

Таблица 1

Варьируемые параметры $X = \{x_i\} =$	f_{01}	f_{02}	f_{03}	f_{04}
	x_1	x_2	x_3	x_4
Решение	75,96	41,36	34,34	22,66
Верхняя граница	-	-	-	-
Нижняя граница	11,20	11,20	11,20	11,20
Принятые значения	76,00	42,00	35,00	23,00

От полученных значений площадей сечений необходимо перейти к значениям высот профилей. Для этого следует построить зависимость высоты стенки рамы от площади сечения изолированного профиля $h_w(x_i)$, которую можно установить по данным сортамента на сварной тавровый профиль. На рисунке представлена обработка сортаментных данных на сварные тавровые профили (№ 16а – 80а).

Зависимость высоты стенки рамы от площади сечения изолированного профиля

Следующим этапом будет подбор профиля с ориентацией на полученное решение и данные

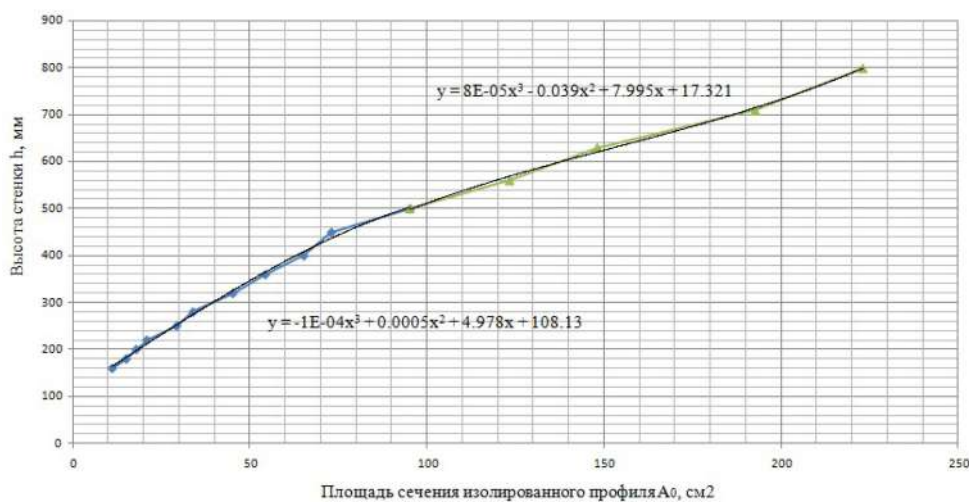
сортамента на составные сварные тавровые профили (табл. 2). При этом предварительно необходимо увеличить требуемые значения площадей сечения для учета добавки на коррозионный износ его элементов. Для этого нужно умножить найденные значения на коэффициент $\omega_c > 1,0$. Оценки значений этого коэффициента можно получить по результатам обработки сортаментных данных для сварных тавровых профилей или по формулам, приведенным в правилах РС.

Таблица 2

Значения высоты профиля, мм				
Пролет	Пролет 1	Пролет 2	Пролет 3	Пролет 4
Решение	417	324	299	246
Принятые значения	420	320	320	250

Поскольку при выборе профиля происходит некоторое изменение значений варьируемых переменных, то необходимо выполнить проверочный расчет, чтобы убедиться, что такие значения варьируемых параметров не привели к нарушению ограничений задачи.

В дальнейшем предполагается усложнение постановки задачи проектирования рамных шпангоутов конструкций надводного корабля – применение метода трех моментов с учетом влияния сдвига и переменности характеристик стержней по пролету при раскрытии статической неопределенности.



Зависимость высоты стенки рамы от площади сечения изолированного профиля

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Rules for the classification of naval ships. – France: Bureau Veritas, 2011. – 224 p.
2. Правила классификации и постройки морских судов. – СПб.: Российский морской регистр судоходства. Т. 1, 2015. – 506 с.
3. Тряскин В.Н. Автоматизированное параметрическое проектирование конструкций корпуса судна: учебное пособие / В.Н. Тряскин. – СПб.: СПбГМТУ, 2010. – 152 с.
4. Тряскин В.Н. Параметрическое проектирование балочных элементов конструкций корпуса судна // ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, Труды конференции по строительной механике корабля, посвященной памяти академика Ю.А. Шиманского, 2003. – 107 с.
5. Тряскин В.Н. Методология автоматизированного проектирования конструкций корпуса судна: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук: 05.08.03. – Санкт-Петербург, 2007. – 339 с.

ОБОЗРЕНИЕ: ПОД ТЕХНИЧЕСКИМ НАБЛЮДЕНИЕМ РС

Новая серия траулеров строится
на класс РС

На класс РС на производственных площадках Прибалтийского судостроительного завода «Янтарь» (Калининград) началось строительство новой серии траулеров-сейнеров проекта SK-3101R.

Проект SK-3101R разработан норвежской компанией *Skipskompetanse*. Траулер предназначен для лова донным и пелагическим тралом, снюрреводом и кошельковой сетью. Выловленная рыба будет храниться в шести охлаждаемых морской водой грузовых танках (тип RSW) вместимостью около 800 м³. Передовая технология хранения позволит сохранять улов свежим в течение семи суток. Это будет первый подобный траулер-сейнер, строящийся на отечественном предприятии.

Основные характеристики:

длина габаритная – 50,6 м;

ширина – 12 м;

высота борта – 10 м;

мощность главного двигателя

– около 2200 кВт;

валовая вместимость – 1140;

дедвейт – 1260 т.

Символ класса РС: **KM⊗Ice3 AUT1 fishing vessel**. Спуск на воду головного судна запланирован на июнь 2017 г. Вся серия будет поставлена заказчику в 2018 г.

Завершен ремонт ППБУ

На заводе *Yantai CIMC Raffles Offshore Shipyard*, г. Яньтай, КНР, под техническим наблюдением РС завершился ремонт полупогружных плавучих буровых установок (ППБУ) шестого поколения «Полярная Звезда» и «Северное Сияние». В торжественной церемонии передачи ППБУ заказчику, которая состоялась 15 апреля 2016 г., принял участие генеральный директор РС Константин Пальников.

В процессе технического наблюдения за ремонтом и заменой оборудования специалисты РС провели доковые освидетельствование ППБУ, освидетельствование корпусных конструкций, судовых механизмов и устройств в разобранном виде. Успешно прошли испытания и проверка в действии механизмов, оборудования и судовых систем, а также ходовые испытания платформ. В настоящий момент завершено их

предъявление к очередному освидетельствованию, и ППБУ готовы продолжать свою работу.

Конструктивно «Полярная звезда» и «Северное сияние» представляют собой самоходные морские сооружения катамаранного типа с двумя понтонами и шестью стабилизирующими колоннами, поддерживающими верхнее строение. Платформы способны проводить разведочное и эксплуатационное бурение газовых и нефтяных скважин глубиной до 7500 м на глубине моря от 70 до 500 м при наличии битого льда толщиной до 70 см. Их оборудование рассчитано на эффективную и безопасную эксплуатацию при температуре наружного воздуха до – 30 °С.

Платформы «Полярная звезда» и «Северное сияние» были построены под техническим наблюдением РС на Выборгском судостроительном заводе и предназначены для работы в арктических условиях. Символ класса РС: **KM⊗AUT1-ICS EPP semi-submersible ice-resistant MODU**. До ремонта их эксплуатация велась на морском шельфе в районе Сахалина.



МОРЕХОДНЫЕ КАЧЕСТВА СУДОВ

УДК 629.054

ПРИБОРЫ КОНТРОЛЯ ОСТОЙЧИВОСТИ. СОВРЕМЕННЫЕ ТРЕБОВАНИЯ

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

В.С. Одегов, ФАУ «Российский морской регистр судоходства», Санкт-Петербург,
e-mail: odegov.vs@rs-class.org

Проанализированы бортовые программы расчета остойчивости. Рассмотрены тенденции развития бортового программного обеспечения для расчетов остойчивости и прочности, требования Регистра к приборам контроля загрузки и остойчивости.

Ключевые слова: нефтеналивные суда, танкер, химовоз, газовоз, прибор контроля остойчивости, бортовая программа, остойчивость, аварийная остойчивость.

STABILITY CONTROL INSTRUMENTS. UP-TO-DATE REQUIREMENTS

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

V.S. Odegov, FAI "Russian Maritime Register of Shipping", St. Petersburg, e-mail: odegov.vs@rs-class.org

The article analyses onboard stability loading instruments. This article considers trends of onboard computer software to carry out stability and strength calculations, the RS requirements to the loading and stability control instruments.

Keywords: oil tankers, tanker, chemical tanker, gas carrier, stability control device, onboard instrument, stability, damage stability.

ВВЕДЕНИЕ

Компьютерные системы, предназначенные для проведения различных расчетов, в настоящее время проникли во все отрасли проектирования и эксплуатации судов. Количество расчетов, проводимых с помощью таких программ, удобство их использования растут год от года и достигли такого уровня, что программы могут применяться для решения оперативных задач членом экипажа, прошедшим непродолжительную подготовку и не имеющим специального образования. В то же время разработка такого программного обеспе-

чения и его оптимизация требуют тщательной работы специалистов, а его качество и точность подтверждаются путем сертификации классификационными обществами. Вместе с развитием программного обеспечения изменяются и требования, предъявляемые к нему. Статья ставит своей целью помочь разобраться в требованиях к бортовым программам, их недавним изменениям и процедуре одобрения.

Развитие электронно-вычислительной техники и новые технологии предлагают новые возможности использования современных программно-аппаратных комплексов на борту судна. В состав программного обеспечения могут

входить программы, обслуживающие интегрированные системы автоматики судна, датчики, навигационные комплексы, программы производящие расчеты количества груза, принимаемого на борт, расчеты безопасных режимов плавания и многие другие. Бортовые программы расчетов прочности и остойчивости, именуемые в нормативных документах Российского морского регистра судоходства (далее – Регистр) «прибор контроля загрузки» (*Loading Instrument*) и «прибор контроля остойчивости» (*Stability Instrument*), используются на судне для расчетов прочности и остойчивости, формирования планов перевозок, контроля эксплуатационных параметров в текущем состоянии загрузки с целью предотвращения их выхода за допускаемые пределы. В случае, если программное обеспечение интегрировано с системой замеров уровня в цистернах, как правило, оно имеет возможность работать в автономном режиме (для составления плана перевозки) и в режиме *on-line* совместно с датчиками уровня, установленными в цистернах судна. Информация о заполнении цистерн автоматически поступает в программу расчета посадки и остойчивости текущего состояния судна. Использование информации, передаваемой датчиками уровня, исключает ошибки при пересчете объема заполнения и массы перевозимого продукта.

1. БОРТОВЫЕ ПРОГРАММЫ РАСЧЕТА ОСТОЙЧИВОСТИ

Существующие в настоящее время программы контроля остойчивости можно условно разделить на три типа, в зависимости от подхода к расчету аварийной остойчивости судна в текущем случае загрузки [1]. К первому типу относятся программы, не имеющие возможности расчета аварийной остойчивости. Ко второму типу относится программное обеспечение, оценивающее остойчивость путем сравнения аппликаты центра тяжести или метацентрической высоты судна с предельной кривой KG/GM , построенной на стадии проектирования с учетом применимых к судну требований к остойчивости и аварийной остойчивости. К третьему типу относятся программы, осуществляющие прямой расчет остойчивости, в том числе расчет аварийной остойчивости в заранее определенных случаях повреждения. Если во всех вариантах повреждения судно сохраняет требуемый запас остойчивости, то для такого случая загрузки программа дает «зеленый свет».

Существующие требования к аварийной остойчивости морских судов можно разделить на требования к вероятностному индексу деления на отсеки и детерминистические требования.

Требования к вероятностному индексу деления на отсеки содержатся в части B-1 главы II-1

Международной конвенции по охране человеческой жизни на море 1974 г. (МК СОЛАС-74) и применяются к пассажирским судам независимо от их длины и грузовым судам длиной более 80 м, за исключением тех из них, на которые распространяются требования к аварийной остойчивости, содержащиеся в других конвенциях, кодексах и руководствах ИМО [2].

При вероятностном подходе, после расчета требуемого индекса деления на отсеки проводится сравнение его величины с достижимым индексом, вычисленным для реального судна. Расчет достижимого индекса деления на отсеки основан на оценке вероятности выживания судна после получения соответствующих повреждений. На основании расчета проектантом строится предельная кривая, показывающая максимальные значения аппликаты центра тяжести, при которых выполняются требования к вероятностному индексу. После объединения такой предельной кривой с кривой, построенной на основании критериев остойчивости неповрежденного судна, их огибающая может быть включена в судовую документацию и программу контроля остойчивости. В результате, при проведении расчетов остойчивости для случая загрузки, отличающегося от типового, использование такой кривой контроля остойчивости позволит оценить соответствие остойчивости судна всем применимым требованиям.

Детерминистический подход представляет собой оценку выполнения требований к остойчивости судна в случае получения им повреждения определенного размера в установленных районах корпуса. Требования включают в себя минимально допустимые значения площади под диаграммой статической остойчивости, ее протяженности, величины максимального плеча восстанавливающего момента, метацентрической высоты и возвышения отверстий, через которые возможно дальнейшее распространение воды по судну. Детерминистические требования применяются к нефтеналивным судам, химовозам, судам, перевозящим сжиженные газы наливом и судам снабжения, то есть тем, к которым не применяются требования части B-1 главы II-1 МК СОЛАС-74. Согласно части V «Деление на отсеки» Правил классификации и постройки морских судов Регистра детерминистические требования также применяются к судам, имеющим в символе класса знак деления на отсеки или ледовые классы **Arc4–Arc9**.

Метод построения кривой контроля остойчивости при детерминистическом подходе отличается от метода, используемого при вероятностном подходе. Поскольку на аварийную остойчивость влияние оказывает также уровень заполнения повреждаемых цистерн и плотность содержащихся

в них жидкостей, проектант составляет матрицу случаев затопления, состоящую из множества комбинаций случаев загрузки и вариантов повреждения. Нанеся на поле диаграммы аппликаты центра тяжести случаев загрузки, для которых требования к аварийной остойчивости выполняются во всех случаях повреждения, и построив соответствующую огибающую, проектант получает диаграмму контроля остойчивости.

Точность такой кривой контроля аварийной остойчивости при детерминистическом подходе зависит от количества случаев загрузки, использованных при ее построении. Поскольку при различных уровнях заполнения цистерн и плотностях перевозимых грузов аварийная остойчивость судна изменяется, судовая документация наливных судов может содержать большие семейства кривых, применение которых в эксплуатации сопряжено с трудностями.

Учитывая вышеизложенные факторы, использование программ контроля остойчивости второго типа на наливных судах не рекомендуется. Более точный и достоверный результат достигается использованием программ третьего типа, производящих оценку аварийной остойчивости для каждого случая загрузки при получении судном предзаданного набора типовых случаев повреждения.

2. ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ БОРТОВОГО ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТОВ ОСТОЙЧИВОСТИ И ПРОЧНОСТИ

За последние годы произошли значительные изменения в области программного обеспечения, устанавливаемого на борту судна и служащего для формирования плана перевозки и выполнения расчетов по остойчивости и прочности. В основе этих изменений лежит необходимость видеть в составе бортовых компьютеров высококачественные программы, способные не только проводить безошибочные расчеты, но и обеспечить пользователю удобную и эргономичную работу. Известны разработки отечественных и зарубежных фирм, в которых важными особенностями, отражающими тенденции развития программного обеспечения, можно считать:

- использование единого информационного пространства (проектант-верфь-классификационное общество) для подготовки баз данных, описывающих судно;
- возможность создания виртуальной модели загрузки судна и имитации ситуации расстановки грузов в ограниченном пространстве (3D-модель размещения). В этом случае при разработке программ анализируются особенности эксплуатации морских судов и сооружений различного типа для сочетания удобства интерфейса пользователя и

реализации новых расчетных методик. Наряду с функцией размещения обычных грузов, для судов, перевозящих тяжеловесные, негабаритные грузы и накатные грузы, удобным представляется возможность интерактивного пространственного размещения произвольных трехмерных грузов в ограниченном пространстве с визуальным 3D контролем (рис.1). В этом случае пользователь может выбрать режим автоматического размещения произвольных грузов (плотной упаковки), а также режим проверки «пересечения» грузов между собой;

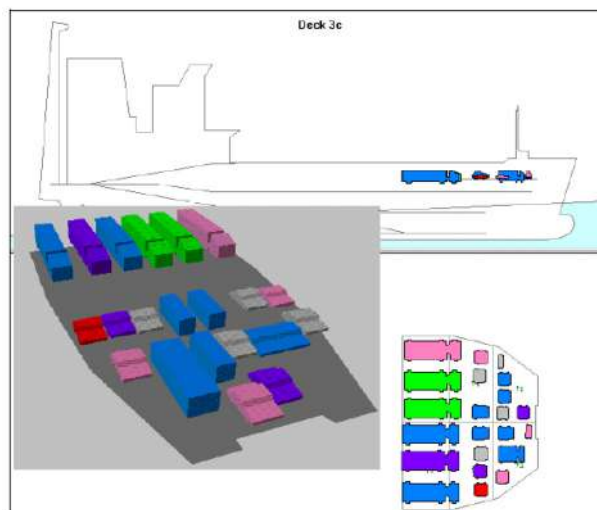


Рис. 1 Пример экрана бортовой программы с моделированием размещения грузов на палубе судна

- моделирование аварийной ситуации, связи помещений на судне с учетом наличия и характеристик перетоков и операций по борьбе за живучесть (см. рис. 2); автоматизацию расчетов аварийной остойчивости, прогнозирование времени затопления помещений и выработку рекомендаций по выходу из аварийной ситуации;
- автоматизацию загрузки и балластировки судов и плавучих сооружений. Такая возможность бортовой программы актуальна для точной балластировки различных судов и плавучих сооружений при изменении загрузки, например, при сборке объектов на плаву или загрузке особо крупных негабаритных грузов накатным методом. При укрупнении объекта для осуществления операций стыковки и сварки отдельных конструкций на плаву с помощью программы формируются схемы балластировки для точного позиционирования свариваемых модулей (см. рис. 3);
- возможность взаимодействия бортовых программ расчета с навигационными программно-аппаратными комплексами, управляющими, контролирующими и информационными системами судна для выдачи рекомендаций об изменении курса, скорости хода или других целей;

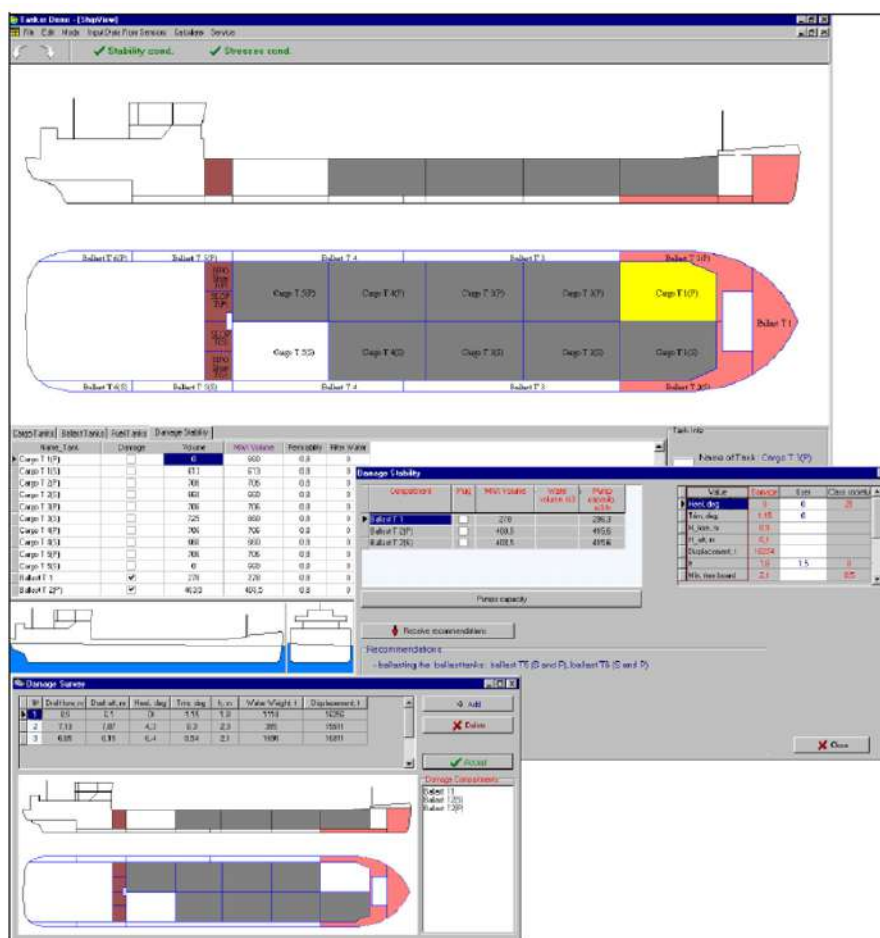


Рис. 2. Пример экрана бортовой программы с повреждениями судна и рекомендациями по выравниванию

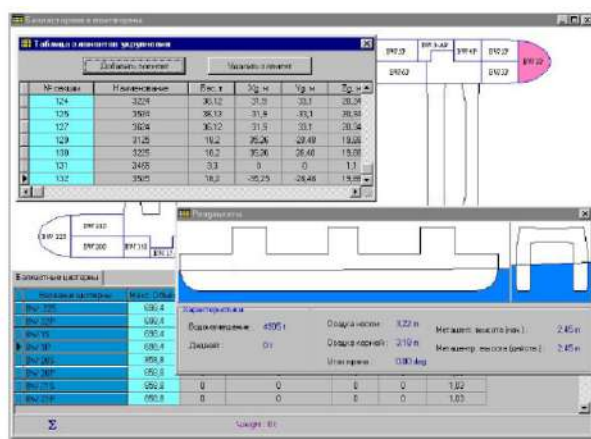


Рис. 3. Пример экрана бортовой программы формирования схемы балластировки плавучей буровой платформы на этапе сборки

3. ВЕТТИНГ-КОНТРОЛЬ

Известны случаи, когда при проведении веттинг-контроля (*ship vetting*) за техническим состоянием судов и уровнем профессионализма экипажей со стороны потенциальных фрахтователей к программам расчета остойчивости предъявляются требования, которые напрямую не содержатся в правилах классификационных обществ, но имеются в нормативных документах различных международных организаций. Веттинг-инспекцию танкерного флота проводят ведущие нефтяные компании, в число которых входят *British Petroleum, ExxonMobil, Shell, Chevron, Repsol, Total, ConocoPhillips, BHP, Lukoil* и другие. Каждая из этих компаний анализирует информацию о судне, подходящем для фрахтования с коммерческой точки зрения. На основании этого анализа вырабатываются рекомендации о пригодности судна для безопасной перевозки груза. Результаты таких инспекций заносятся в базу данных SIRE (*Ship*

- реализацию в судовой сети многопользовательского режима.

Inspection Report), доступную через интернет для всех членов OCIMF (*Oil Companies International Marine Forum*), что может определять выбор того или иного судна для фрахта нефтяными компаниями. Одним из вопросов, на который обращается существенное внимание при веттинг-контроле, является наличие на борту одобренной программы расчета аварийной остойчивости, могущей продемонстрировать оперативную оценку параметров безопасности для различных случаев повреждения судна.

Дополнительным преимуществом для судовладельца, устанавливающего на борту программное обеспечение для контроля эксплуатационных параметров остойчивости и прочности, следует считать наличие информационного пространства программы, общего со службой экстренного реагирования и классификационным обществом. Это позволяет сократить количество передаваемой информации, повысить точность и скорость выработки рекомендаций по устранению аварийной ситуации или оперативность рассмотрения документации классификационным обществом. Работа занимает минимальное время и дает конкретные результаты.

4. ТРЕБОВАНИЯ РЕГИСТРА К ПРИБОРАМ КОНТРОЛЯ ЗАГРУЗКИ И ОСТОЙЧИВОСТИ

С точки зрения нормативных документов приборы контроля (*Instruments*) делятся на приборы, содержащие программы, предназначенные для контроля параметров прочности судна (*Loading Instrument*) и приборы с программами, обеспечивающими контроль параметров остойчивости (*Stability Instruments*). Большинство разработчиков программного обеспечения стараются объединить эти возможности в одном программном комплексе, но, с точки зрения классификационных обществ, к перечисленным приборам предъявляются различные требования по наличию на борту судна и программному обеспечению.

Требования к наличию на борту.

Прибор контроля загрузки.

Для судов с широким раскрытием палубы, химовозов и судов, которые могут эксплуатироваться с неравномерной загрузкой длиной более 100 м, правилами Регистра требуется наличие на борту одобренного прибора контроля загрузки (п. 1.4.9.5 части II «Корпус» Правил классификации и постройки морских судов).

Программа контроля остойчивости.

Начиная с 1 января 2016 г. все нефтеналивные суда, суда, перевозящие опасные химические грузы наливом и суда для перевозки сжиженных газов наливом должны быть снабжены прибором контроля остойчивости, позволяющим проводить оценку остойчивости судна на соответствие применимым

требованиям как остойчивости неповрежденного судна, так и аварийной остойчивости.

Это новое требование введено резолюциями Комитета по безопасности мореплавания и Комитета по защите морской среды Международной морской организации (ИМО) в текст международных конвенций и кодексов. Резолюция МЕРС.248(66) вводит требование, касающееся нефтеналивных судов, в Международную конвенцию по предотвращению загрязнения с судов (МАРПОЛ 73/78); резолюции МЕРС.250(66) и MSC.369(93) требования, касающиеся химовозов, – в Международный кодекс постройки и оборудования судов, перевозящих опасные химические грузы наливом; резолюция MSC.370(93) требования, касающиеся газовозов, – в Международный кодекс постройки и оборудования судов, перевозящих сжиженные газы наливом.

Требования указанных резолюций были включены в Правила классификации и постройки морских судов, Правила классификации и постройки химовозов и Правила классификации и постройки судов, перевозящих сжиженные газы наливом Регистра с 1 января 2016 г. Требования резолюций ИМО распространяются не только на суда, находящиеся в постройке, но и на суда в эксплуатации. Суда, построенные до 1 января 2016 г., должны быть снабжены одобренным прибором контроля остойчивости до ближайшего периодического освидетельствования, но не позднее 1 января 2021 г.

Требования к программному обеспечению.

Процедура одобрения двух типов программ схожа. Главным управлением Регистра проверяется соответствие результатов расчетов бортовых программ ранее рассмотренным проектным документам, после чего на борту судна инспектором подтверждается достаточность аппаратного обеспечения и нормальное функционирование программного комплекса.

Требования к программному обеспечению можно разделить на несколько групп:

- функциональные возможности:

для программ контроля загрузки это: вычисление действующих перерезывающих сил и изгибающих моментов, отображение результатов расчета и сравнение с их допускаемыми значениями;

для программ контроля остойчивости это: вычисление данных по водоизмещению судна, посадке, расчет критериев остойчивости;

- точность вычислений:

в правилах приведены величины допускаемых погрешностей вычислений параметров. Для программ контроля загрузки данные по допускаемым погрешностям указаны в приложении II части II «Корпус» Правил классификации и постройки морских судов Регистра; для программ контроля остойчивости – в разд. 12 части II «Корпус»

Правил технического наблюдения за постройкой судов и изготовлением материалов и изделий для судов Регистра;

- защита данных:

данные, относящиеся к конструкции судна, водоизмещению и положению центра тяжести судна «порожном» и критериям остойчивости должны быть защищены от внесения изменений в процессе эксплуатации;

- вывод данных:

бортовые программы служат для подготовки отчетных документов, подтверждающих соответствие случая загрузки критериям остойчивости и прочности, поэтому правила также содержат требования к перечню выходных данных и предупреждению пользователя о возможном невыполнении критериев;

- прочее:

к прочим требованиям можно отнести требования к резервному копированию данных, наличию быстрых команд выхода и т.д.

При использовании единого информационного пространства, появляющегося с момента начала проектирования судна, одобренные классификационным обществом методики, лежащие в основе расчетов, связанных с безопасностью мореплавания, могут открывать дополнительные

полезные возможности: расчет доковых операций (расстановка судов в доке, расчет баллаستировки и прочности дока); составление схемы утилизации судна на плаву с расчетом посадки-стойчивости при отделении частей; компоновка плавучего средства из отдельных модулей на плаву с расчетом посадки-стойчивости на каждом шаге и т.п. Исходные данные по геометрии формы корпуса судов и плавучих сооружений могут передаваться в программу в электронном виде непосредственно из систем автоматизированного проектирования судна.

Подобное единое информационное поле, объединяющее всех участников жизненного цикла судна, позволяет значительно ускорить оценку уровня безопасности судна при его эксплуатации, а также процесс проектирования последующих судов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. IMO Intact Stability Code, 2008.
2. SOLAS, Consolidated Edition, 2014.
3. Правила классификации и постройки морских судов. – СПб., Российский морской регистр судоходства, 2016.
4. Правила технического наблюдения за постройкой судов и изготовлением материалов и изделий для судов. – СПб., Российский морской регистр судоходства, 2016.

ОБОЗРЕНИЕ: РС РАСШИРЯЕТ ПРИСУТСТВИЕ В ВОСТОЧНОЙ АЗИИ

РС подписал соглашение о делегировании полномочий с Морской администрацией Гонконга. Событию предшествовал проведенный Администрацией аудит, подтвердивший соответствие РС требованиям Кодекса ИМО о признанных организациях и применимого национального законодательства Гонконга.

Гонконг входит в пятерку крупнейших судовых реестров по тоннажу зарегистрированных судов. Флаг состоит в белых списках региональных мемо-

рандумов портового контроля и имеет низкий процент задержаний судов. Морская администрация Гонконга осуществляет регулярный мониторинг и оценку показателей деятельности флота посредством специальной системы контроля качества (*Fleet Quality Control System* — FSQC). Повышенные требования имеются и в отношении признанных организаций, которые могут осуществлять конвенционные освидетельствования судов по поручению Морской администрации Гонконга.

В рамках стратегии расширения присутствия в восточноазиатском регионе РС также открыл новый офис на территории Специального административного района Гонконг. По словам генерального директора РС Константина Пальникова, «получение признания Гонконга — этой уважаемой Морской администрации — является очередным подтверждением высокого качества оказываемых РС услуг, а открытие офиса в Гонконге позволит создать необходимые предпосылки для более активного продвижения услуг РС в регионе».

УДК 629.54

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МАКСИМАЛЬНОЙ УДЕРЖИВАЮЩЕЙ СИЛЫ И УГЛА КРЕНА ЭСКОРТНЫХ БУКСИРОВ В СООТВЕТСТВИИ С ТРЕБОВАНИЯМИ ПРАВИЛ РС

А.И. Немзер, ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург

А.В. Юрканский, канд. техн. наук, ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург

М.А. Кутейников, д-р техн. наук, ФАУ «Российский морской регистр судоходства», Санкт-Петербург,

e-mail: kuteynikov.ma@rs-class.org

М.Е. Захаров, ФАУ «Российский морской регистр судоходства», Санкт-Петербург,

e-mail: zaharov.me@rs-class.org

Статья посвящена разработке математической модели и программного обеспечения для расчета кинематических и динамических параметров, характеризующих процесс эскортирования с помощью специальных (эскортных) буксиров. Как наиболее важные из этих параметров рассматриваются максимальная удерживающая сила (максимальное боковое усилие, приложенное к корме эскортируемого судна), скорость эскортирования, время маневрирования (время перехода эскортного буксира с одного борта эскортируемого судна на другой). Отмечена необходимость соблюдения условий безопасности, характеризующихся допустимыми углами крена, дрейфа, отклонения троса от ДП буксируемого судна, а также максимально допустимыми значениями натяжения буксирного троса и усилия лебедки. Рассматривается вариант оснащения эскортного буксира двумя поворотными колонками. Математическая модель движения буксира составлена на основании данных по судам с близкими к эскортным буксирам геометрическими характеристиками и аналогичным типом движительно-рулевого комплекса. Работа выполнялась в развитие требований Правил РС.

Ключевые слова: эскортный буксир, процесс эскортирования, удерживающая сила.

SOFTWARE DEVELOPMENT TO DETERMINE MAXIMUM HOLDING FORCE AND HEEL ANGLE OF ESCORT TUGS WITH REGARD TO RS RULES

A.I. Nemzer, FSUE "Krylov State Research Centre", St. Petersburg

A.V. Yurkanskiy, PhD, FSUE "Krylov State Research Centre", St. Petersburg

M.A. Kuteynikov, DSc, FAI "Russian Maritime Register of Shipping", St. Petersburg

M.E. Zaharov, FAI "Russian Maritime Register of Shipping", St. Petersburg

The article covers mathematical model and software development to calculate kinematic and dynamic parameters being characteristic of escorting process using specific (escort) tugs. The most high-valuable of these parameters are considered as follows: the maximum holding force (maximum side force applied to the escorted ship stern), escorting speed, manoeuvring time (transit time for an escorted tug from one side of an escorted vessel to another). Compliance with safety conditions is required, which are characterized with permissible angles of heel, drift, rope deviation from the DP (centerline) of a vessel in tow, as well as the maximum permissible values of the tow line tension and winch forces. The option of fitting an escort tug with two thrusters is considered. Mathematical model of tug propulsion is made on the basis of data on ships with geometric characteristics related to escort tugs and type of propulsion and steering system. The work has been performed in furtherance (elaboration) of the RS Rules requirements.

Keywords: Escort tug, escorting process, holding force.

Основная цель выполненной работы состояла в разработке математической модели и программного обеспечения для расчета кинематических и динамических параметров, характеризующих процесс эскортирования с помощью специальных (эскортных) буксиров, оборудованных поворотными колонками (ПК).

Схема эскортирования – совместного движения эскортируемого (транспортного) судна и эскортного буксира показана на рис. 1.

Реализация математической модели должна позволить определить следующие параметры:

- положение эскортного буксира по отношению к эскортируемому судну;
- натяжение буксирного троса, позволяющее найти максимальную удерживающую силу, направленную перпендикулярно диаметральной плоскости эскортируемого судна;
- угол крена буксира при эскортировании;
- угол отклонения буксирного троса от диаметральной плоскости эскортируемого судна;
- время маневрирования буксира от одного борта эскортируемого судна до другого «в зеркальную позицию» при максимальном значении натяжения

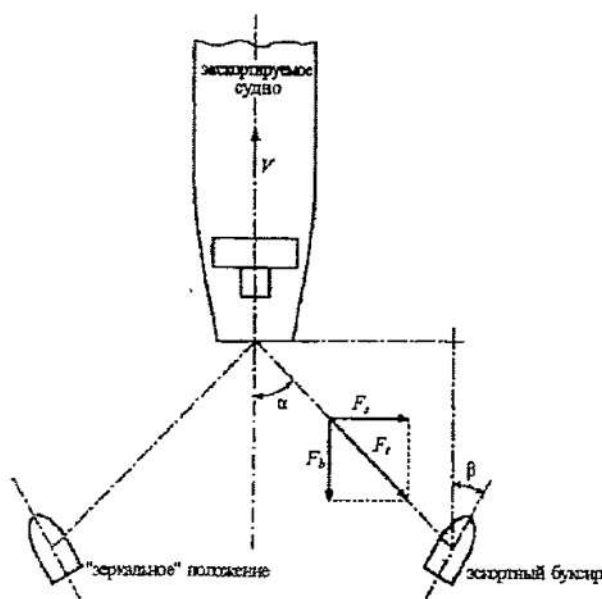


Рис. 1 Схема эскортирования

буксирного троса и максимальном отклонении троса от диаметральной плоскости эскортируемого судна;

- угол крена буксира при внезапной остановке главных двигателей.

Для решения поставленной задачи была составлена математическая модель движения эскортного буксира, представляющая собой следующую систему обыкновенных дифференциальных уравнений, базирующуюся на уравнениях динамики, приведенных в [1, 2]:

$$(\rho V + \lambda_{11}) \frac{dv_x}{dt} = -\rho V v_z \omega_y - \lambda_{34} \omega_x \omega_y + X^r + X^k + X^{\text{трое}};$$

$$(\rho V + \lambda_{33}) \frac{dv_z}{dt} = \rho V v_x \omega_y - \lambda_{34} \frac{d\omega_x}{dt} - \lambda_{35} \frac{d\omega_y}{dt} + Z^r + Z^k + Z^{\text{трое}};$$

$$(J_x + \lambda_{44}) \frac{d\omega_x}{dt} = -\lambda_{34} \frac{dv_z}{dt} \rho g V h \sin(\theta) - 2N_0 \frac{d\theta}{dt} + M_x^r + M_x^k + M_x^{\text{трое}}.$$

$$(J_y + \lambda_{55}) \frac{d\omega_y}{dt} = -\lambda_{35} \frac{dv_z}{dt} + M_y^r + M_y^k + M_y^{\text{трое}}.$$

Для вычисления траектории движения эскортного буксира относительно эскортируемого судна использовались следующие кинематические соотношения:

$$\frac{d\zeta}{dt} = v_x \cos \varphi - v_z \cos \theta \sin \varphi;$$

$$\frac{d\eta}{dt} = v_x \sin \varphi + v_z \cos \theta \cos \varphi;$$

$$\frac{d\varphi}{dt} = -\omega_y \cos \theta;$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega_x.$$

В приведенных уравнениях:

V – водоизмещение;

ρ – плотность морской воды;

g – ускорение свободного падения;

v_x – проекция вектора продольной скорости буксира;

v_z – проекция вектора поперечной скорости буксира;

ω_x – угловая скорость вращения относительно продольной оси (скорость изменения крена);

ω_y – угловая скорость вращения относительно вертикальной оси (скорость поворота);

h – поперечная метацентрическая высота;

X^r, Z^r – проекции гидродинамических сил вязкостной природы, действующих на корпус;

M_x^r, M_z^r – проекции гидродинамических моментов вязкостной природы, действующих на корпус;

X^k, Z^k – проекции гидродинамических сил, обусловленных работой ПК;

M_x^k, M_z^k – проекции гидродинамических моментов, обусловленных работой ПК;

$X^{\text{трое}}, Z^{\text{трое}}$ – проекции составляющих сил, от троса;

$M_x^{\text{трое}}, M_z^{\text{трое}}$ – проекции составляющих моментов, от троса;

N_0 – коэффициент сопротивления бортовой качки;

$\lambda_{11}, \lambda_{33}$ – присоединенные массы корпуса;

$\lambda_{34}, \lambda_{35}$ – присоединенные статические моменты;

$\lambda_{44}, \lambda_{55}$ – присоединенные моменты инерции корпуса;

J_x, J_y – моменты инерции массы относительно продольной и вертикальной осей системы координат, связанной с буксиром;

θ – угол крена;

φ – угол курса эскортного буксира относительно эскортируемого судна, т.е. угол дрейфа буксира β .

Гидродинамические силы и моменты вязкостной природы, действующие на корпус, вычисляются для заданных значений L, B, T , коэффициента общности δ_v и коэффициента общности мидельшпангоута β_v . При этом используются безразмерные соотношения $L/B, T/L, T/B$, коэффициент продольной общности корпуса и приведенный коэффициент общности погруженной кормовой части диаметральной плоскости σ .

При этом также учитывается зависимость точки приложения гидродинамической силы вязкостной природы относительно основной плоскости от соотношения B/T и угла дрейфа β .

Инерционные гидродинамические силы и моменты, действующие на корпус и определяемые значениями присоединенных масс, статических моментов и моментов инерции корпуса определялись с использованием [1, 2].

Гидродинамические силы и моменты, обусловленные работой поворотных колонок (ПК), учитывают возможность движения эскортного буксира в произвольном режиме: от свободного хода до швартовного, при условии обтекания ПК под местным углом дрейфа с учетом влияния корпуса. Кроме того, учитывается взаимное влияние ПК, связанное как с совместной перекачкой, так и их расположением, а также принимается во внимание наличие или отсутствие насадки на гребном винте.

Математическая модель учитывает проекции сил и моментов от троса, связывающего эскортируемое судно с буксиром.

Для определения коэффициента сопротивления бортовой качки используется [2].

Ряд исходных данных – коэффициент полноты площади ватерлинии α , коэффициент полноты мидель-шпангоута β , координаты центра величины x_c, y_c , поперечная метacentрическая высота h могут быть определены по результатам расчета остойчивости эскортного буксира [3].

При выполнении расчета эскортирования используются следующие ограничения на кинематические параметры буксировки:

- угол отклонения троса от ДП эскортируемого судна $\gamma_{\text{ТО}}$ – в соответствии с правилами Регистра $\gamma_{\text{ТО}} = 60^\circ$;
- угол дрейфа буксира β – в соответствии с морской практикой принимается $\beta = 35^\circ$;
- угол крен θ – по результатам расчета остойчивости буксира принимается угол максимума диаграммы статической остойчивости или угла заливания, в зависимости от того, какой меньше [3].

В качестве допустимого усилия в тросе принимается разрывное усилие в тросе или допустимое усилие на лебедке, в зависимости от того, какое меньше.

При выполнении расчетов скорость эскортируемого судна считается постоянной (она может быть произвольной, но в соответствии с правилами Регистра принимается равной 8 или 10 уз) [4]. Поиск максимальной удерживающей силы осуществляется перебором по двум параметрам: углу поворота движителя и его оборотам (следует отметить, что определенное при этом значение оборотов ПК может отличаться от значений оборотов, соответствующих прямому ходу). Угол крена, который имеет место при внезапной остановке движителей, определяется для положения буксира, соответствующего максимальной удерживающей силе.

Также из этого положения осуществляется маневр перехода в «зеркальную позицию». Маневр осуществляется в два этапа. Первый этап заключается в переводе буксира в кильватер эскортируемого судна. Для этого обороты гребных винтов изменяются до значений, соответствующих прямому ходу при данной скорости; одновременно с этим ПК переключаются в нулевое положение. При достижении буксиром кильватера эскортируемого судна начинается второй этап, заключающийся в переключке ПК на противоположный борт с тем же значением угла переключки и заданием тех же оборотов, что были до начала маневра.

Основная форма данных (интерфейс ввода данных) для выполнения расчетов показана на рис. 2.

Кроме того, обязательными для ввода являются следующие данные:

- длина по ватерлинии;
 - ширина;
 - осадка на миделе;
 - высота борта;
 - водоизмещение;
 - метacentрическая высота;
 - диаметр винта;
 - тяга на швартовом режиме;
 - максимальная скорость;
 - максимальные обороты;
 - длина троса;
 - допустимое усилие троса;
 - скорость эскортирования;
 - максимальный угол крена;
 - максимальный угол отклонения троса;
 - максимальный угол дрейфа.
- Если пользователь не вводит обязательные

The screenshot shows a software application window titled 'Файл - Справка'. It contains a form with the following sections:

- Параметры корпуса (Hull parameters):** Includes fields for 'Длина по ватерлинии, м' (Length along the waterline, m), 'Ширина, м' (Width, m), 'Осадка на миделе, м' (Draft at the midship, m), 'Высота борта, м' (Deck height, m), 'Водоизмещение, м³' (Displacement, m³), 'Коэффициент полноты миделя' (Midship coefficient), 'Коэффициент полноты ватерлинии' (Waterline coefficient), 'А_с, м²' (A_s, m²), 'i°' (i°, with a value of 17 entered), 'Поперечная метacentрическая высота, м' (Transverse metacentric height, m), 'Статический дифферент, градус' (Static trim, degrees), and a 'Комментарий' (Comment) text area.
- Параметры движителя (Propeller parameters):** Includes 'Количество' (Quantity), 'Диаметр винта, м' (Propeller diameter, m), a checkbox for 'Направленная нагрузка' (Directed load), 'Тяга на швартовном режиме, кН' (Tug at mooring mode, kN), 'Максимальная скорость, узел' (Maximum speed, knot), 'Максимальные обороты, об/мин' (Maximum RPM), 'Расстояние, м' (Distance, m), 'Продольное' (Longitudinal), 'Вертикальное' (Vertical), 'Макс. угол поворота, градус' (Max. turning angle, degrees), and 'Скорость переключки, град/с' (Switching speed, degrees/s).
- Параметры троса (Rope parameters):** Includes 'Длина, м' (Length, m), 'Разрывное усилие, кН' (Breaking force, kN), 'Точка крепления на буксире, м' (Attachment point on the tug, m), 'Продольное' (Longitudinal), and 'Вертикальное' (Vertical).
- Ограничения (Constraints):** Includes 'Максимальный угол крена, градус' (Max. heel angle, degrees), 'Максимальный угол отклонения троса, градус' (Max. rope deflection angle, degrees), 'Максимальный угол дрейфа, градус' (Max. drift angle, degrees), and 'Скорость эскортирования, узел' (Escort speed, knot).

A 'Расчет' (Calculate) button is located at the bottom right of the form.

Рис. 2 Основная форма данных для расчета остойчивости эскортного буксира

данные, то расчет не возможен. Если остальные данные не введены, то они рассчитываются автоматически, как наиболее характерные для объектов данного класса.

Результаты расчета представлены на рис. 3.

Результаты расчета представлены текстовой информацией в верхнем левом углу и графиками. На графиках использованы следующие обозначения:

F_t – натяжение буксирного троса;

F_s – удерживающая сила;

F_b – тормозящая сила.

Кроме того, пользователь может посмотреть анимацию маневрирования буксира на имеющейся вкладке «Анимация маневра» (см. рис. 4).

В таблице приведены результаты тестового примера, показывающие возможность определения тех кинематических и динамических параметров, которые характеризуют процесс эскортирования транспортных судов с помощью эскортного буксира, оборудованного ПК.

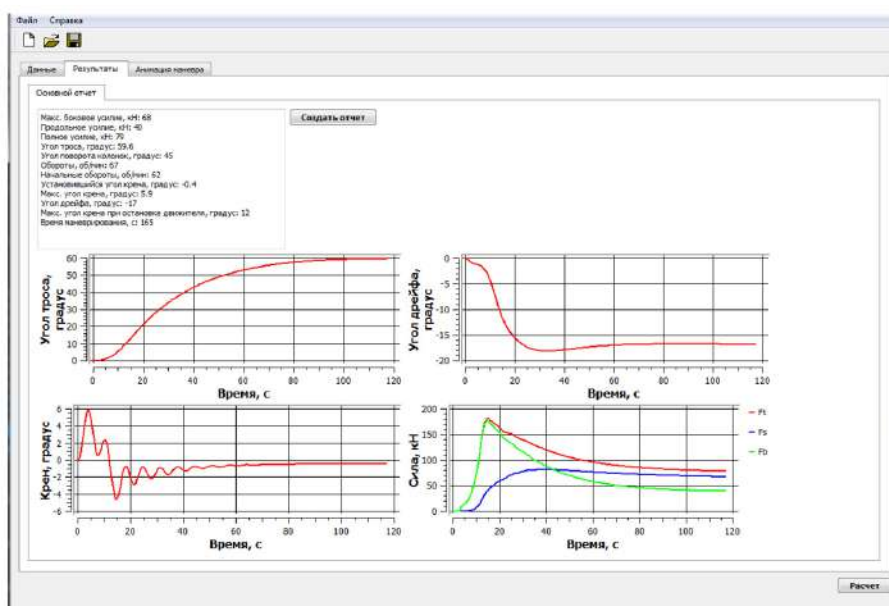


Рис. 3 Результаты расчета остойчивости

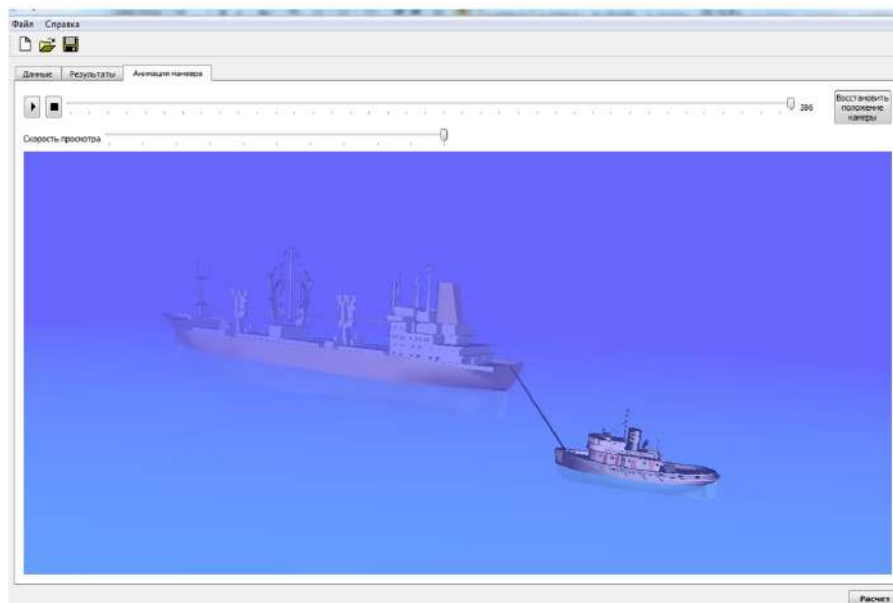


Рис. 4 Вкладка «Анимация маневра»

Параметр	Значение	Параметр	Значение
Параметры корпуса		Параметры движителей	
Длина по ватерлинии, м	35	Расположение, м	[-16,6; 0]
Ширина, м	12,6	Макс. угол поворота, град	45
Осадка на миделе, м	4,6	Скорость перекладки, град/с	12
Высота борта, м	2	Скорость эскортирования, уз	10
Коэффициент полноты миделя	0,9	Параметры троса	
Коэффициент полноты ватерлинии	0,7	Длина, м	100
Ак, м ²	11,3	Допустимое усилие, кН	1000
i^*	17	Точка крепления на буксире, м	[16,6; 7,6]
Положение ц.в., м	[0; 3,45]	Ограничения	
Метацентрическая высота, м	0,5	Максимальный угол крена, град	38
Статический дифферент, град	0	Максимальный угол отклонения троса, град	60
Параметры движителей		Максимальный угол дрейфа, град	35
Количество	2	Результаты	
Диаметр винта, м	2,5	Макс. удерживающая сила, кН	202
Направляющая насадка	Присутствует		
Тяга на швартовом режиме, кН	308,5		
Максимальная скорость, уз	17,5		
Максимальные обороты, об/мин	208		

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Справочник по теории корабля. Т. 3: Управляемость и маневренность / Под ред. Я.И. Войткунского. – Л.: Судостроение, 1985.
2. Справочник по теории корабля. Т. 2: Мореходность / Под ред. Я.И. Войткунского. – Л.: Судостроение, 1985.
3. Правила классификации и постройки морских судов. Т. 3. – СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2012.
4. Программа расчета по проверке остойчивости эскортных буксиров, 2014.

УДК 629.12.073.243.4

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ СИЛ ВТОРОГО ПОРЯДКА, ОБУСЛОВЛЕННЫХ РАЗНОСТЬЮ ЧАСТОТ И ВОЗНИКАЮЩИХ ПРИ ПОПЕРЕЧНОЙ КАЧКЕ ШПАНГОУТНЫХ КОНТУРОВ НА ТИХОЙ ВОДЕ

В.Ю. Семенова, д-р техн. наук, проф., ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский Государственный морской технический университет», Санкт-Петербург, e-mail: sem_viktoria@mail.ru; viktosemenova@yandex.ru

Киав Тхура, аспирант, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский Государственный морской технический университет», Санкт-Петербург, e-mail: ktra29188@gmail.com

Рассматривается двумерная нелинейная потенциальная задача о колебаниях шпангоутного контура в жидкости бесконечной глубины. Нелинейные силы, обусловленные разностью частот, определяются с точностью до второго порядка малости при учете соответствующих нелинейных граничных условий на контуре и свободной поверхности жидкости. Проводится апробация разработанного метода и программы. Рассматривается исследование влияния изменения геометрических параметров контура на значения нелинейных сил.

Ключевые слова: нелинейные силы второго порядка, метод интегральных уравнений, разность частот, нелинейное граничное условие на свободной поверхности жидкости.

THE DETERMINATION OF NONLINEAR SECOND-ORDER FORCES, DUE TO FREQUENCY DIFFERENCE AND OCCURRING DURING THE TRANSVERSE MOTIONS OF THE CONTOURS IN CALM WATER

V.Y. Semyonova, DSc, professor, FSEI State Marine Technical University of St. Petersburg, e-mail: sem_viktoria@mail.ru; viktosemenova@yandex.ru

Kiav Tkura, postgraduate, FSEI State Marine Technical University of St. Petersburg, e-mail: ktra29188@gmail.com

The article deals with two-dimensional nonlinear problem of the potential motions of the contour in the fluid of infinite depth. Nonlinear forces due to the difference of the frequency, are determined up to the second order, taking into account the corresponding nonlinear boundary conditions on the contour and the free surface of the liquid. The developed method and program are tested. The study of the influence of geometric parameters of the contour on the values of nonlinear forces is considered.

Keywords: nonlinear forces of the second order, method of integral equations, the difference of frequencies, non-linear boundary condition at the free surface of the liquid.

ВВЕДЕНИЕ

Уточнение структуры гидродинамических сил необходимо для построения методов и алгоритмов расчета нелинейной качки судов на волнении. Данное уточнение возможно реализовать благодаря учету компонентов высшего порядка малости в нелинейных граничных условиях и в интеграле Лагранжа-Коши для давления. Дальнейший учет нелинейных гидродинамических сил высших порядков малости в дифференциальных уравнениях качки судна даст возможность впоследствии учесть взаимодействие различных видов качки, представить законы его движения в полигармоническом виде и уточнить его кинематические характеристики.

Нелинейная задача второго порядка о колебаниях контура в жидкости безграничной глубины была полностью решена в [3], где были определены все

категории нелинейных сил, пропорциональных удвоенному значению частоты. Между тем, к отдельным категориям нелинейных сил относятся силы, обусловленные разностью и суммой частот. Данные силы имеют место в условиях нерегулярного волнения.

В статье рассматривается определение нелинейных сил, обусловленных разностью частот. Результаты решения данной задачи в дальнейшем, позволят построить алгоритмы расчета нелинейной качки в условиях нерегулярного волнения и определить соответствующие амплитуды.

1. ОПИСАНИЕ РАСЧЕТНОГО МЕТОДА

Предположим, что шпангоутный контур заданной формы совершает вынужденные, гармонические

поперечно-горизонтальные (ПГК), вертикальные (ВК) и бортовые (БК) колебания на тихой воде в жидкости безграничной глубины. Будем считать, что движение контура во времени происходит по следующим законам:

$$\eta_g(t) = \eta_{m1}e^{-j\omega_1 t} + \eta_{m2}e^{-j\omega_2 t}; \quad \zeta_g(t) = \zeta_{m1}e^{-j\omega_1 t} + \zeta_{m2}e^{-j\omega_2 t}; \quad \theta(t) = \theta_{m1}e^{-j\omega_1 t} + \theta_{m2}e^{-j\omega_2 t}; \quad (1)$$

Используя метод малого параметра [3], потенциал скорости движения жидкости второго порядка, обусловленный разностью частот, будет иметь вид:

$$\Phi^{(2)} = (\phi_{22}^{(2)} + \phi_{33}^{(2)} + \phi_{44}^{(2)} + \phi_{23}^{(2)} + \phi_{24}^{(2)} + \phi_{34}^{(2)})e^{-j(\omega_1 - \omega_2)t}, \quad (2)$$

где $\phi_{22}^{(2)}, \phi_{33}^{(2)}, \phi_{44}^{(2)}$ – потенциалы второго порядка, обусловленные изолированными видами колебаний;
 $\phi_{23}^{(2)}, \phi_{24}^{(2)}, \phi_{34}^{(2)}$ – потенциалы, обусловленные взаимодействием ПГК, ВК и БК.

Помимо уравнения Лапласа, принципа излучения и условия на бесконечной глубине, данные потенциалы должны удовлетворять граничным условиям непротекания на контуре:

$$\frac{\partial \phi_{33}^{(2)}}{\partial n} = -\frac{j}{2} \frac{\partial^2 \bar{\phi}_{32}^{(1)}}{\partial s \partial \eta} + \frac{j}{2} \frac{\partial^2 \bar{\phi}_{31}^{(1)}}{\partial s \partial \eta}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial \phi_{22}^{(2)}}{\partial n} = \frac{j}{2} \frac{\partial^2 \bar{\phi}_{22}^{(1)}}{\partial s \partial \zeta} - \frac{j}{2} \frac{\partial^2 \bar{\phi}_{21}^{(1)}}{\partial s \partial \zeta}, \quad (4)$$

$$\frac{\partial \phi_{44}^{(2)}}{\partial n} = -\frac{j}{2} \left\{ \frac{\partial \bar{\phi}_{42}^{(1)}}{\partial s} + \eta \frac{\partial^2 \bar{\phi}_{42}^{(1)}}{\partial s \partial \eta} + \zeta \frac{\partial^2 \bar{\phi}_{42}^{(1)}}{\partial s \partial \zeta} \right\} + \frac{j}{2} \left\{ \frac{\partial \bar{\phi}_{41}^{(1)}}{\partial s} + \eta \frac{\partial^2 \bar{\phi}_{41}^{(1)}}{\partial s \partial \eta} + \zeta \frac{\partial^2 \bar{\phi}_{41}^{(1)}}{\partial s \partial \zeta} \right\}; \quad (5)$$

$$\frac{\partial \phi_{23}^{(2)}}{\partial n} = \frac{j}{2} \left[\frac{\partial}{\partial s} \frac{\partial \bar{\phi}_{32}^{(1)}}{\partial \zeta} - \frac{\partial}{\partial s} \frac{\partial \bar{\phi}_{22}^{(1)}}{\partial \eta} \right] - \frac{j}{2} \left[\frac{\partial}{\partial s} \frac{\partial \bar{\phi}_{31}^{(1)}}{\partial \zeta} - \frac{\partial}{\partial s} \frac{\partial \bar{\phi}_{21}^{(1)}}{\partial \eta} \right]; \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \phi_{24}^{(2)}}{\partial n} = & \frac{j}{2} \left[\omega \frac{\partial \eta}{\partial s} - \left[\eta \frac{\partial}{\partial s} \frac{\partial \bar{\phi}_{22}^{(1)}}{\partial \eta} + \zeta \frac{\partial}{\partial s} \frac{\partial \bar{\phi}_{22}^{(1)}}{\partial \zeta} + \frac{\partial \bar{\phi}_{22}^{(1)}}{\partial s} \right] + \frac{\partial \bar{\phi}_{42}^{(1)}}{\partial s} \right] - \\ & - \frac{j}{2} \left[\omega \frac{\partial \eta}{\partial s} - \left[\eta \frac{\partial}{\partial s} \frac{\partial \bar{\phi}_{21}^{(1)}}{\partial \eta} + \zeta \frac{\partial}{\partial s} \frac{\partial \bar{\phi}_{21}^{(1)}}{\partial \zeta} + \frac{\partial \bar{\phi}_{21}^{(1)}}{\partial s} \right] + \frac{\partial \bar{\phi}_{41}^{(1)}}{\partial s} \right] \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \phi_{34}^{(2)}}{\partial n} = & \frac{j}{2} \left[\omega \frac{\partial \zeta}{\partial s} - \left[\eta \frac{\partial}{\partial s} \frac{\partial \bar{\phi}_{32}^{(1)}}{\partial \eta} + \zeta \frac{\partial}{\partial s} \frac{\partial \bar{\phi}_{32}^{(1)}}{\partial \zeta} + \frac{\partial \bar{\phi}_{32}^{(1)}}{\partial s} \right] - \frac{\partial \bar{\phi}_{42}^{(1)}}{\partial s} \right] - \\ & - \frac{j}{2} \left[\omega \frac{\partial \zeta}{\partial s} - \left[\eta \frac{\partial}{\partial s} \frac{\partial \bar{\phi}_{31}^{(1)}}{\partial \eta} + \zeta \frac{\partial}{\partial s} \frac{\partial \bar{\phi}_{31}^{(1)}}{\partial \zeta} + \frac{\partial \bar{\phi}_{31}^{(1)}}{\partial s} \right] + \frac{\partial \bar{\phi}_{41}^{(1)}}{\partial s} \right]. \end{aligned} \quad (8)$$

Граничные условия на свободной поверхности жидкости при изолированных колебаниях имеют вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \phi_{mm}^{(2)}}{\partial \zeta} - K_3 \phi_{mm}^{(2)} = M_{mm}^{(2)} = & j \frac{(\omega_1 - \omega_2)}{g} \left\{ \frac{\partial \phi_{m1}^{(1)}}{\partial \eta} \frac{\partial \bar{\phi}_{m2}^{(1)}}{\partial \eta} + \frac{\partial \phi_{m1}^{(1)}}{\partial \zeta} \frac{\partial \bar{\phi}_{m2}^{(1)}}{\partial \zeta} \right\} - \\ & - \frac{j\omega_1}{2g} \left\{ \phi_{m1}^{(1)} \left(\frac{\partial^2 \bar{\phi}_{m2}^{(1)}}{\partial \zeta^2} - K_2 \frac{\partial \bar{\phi}_{m2}^{(1)}}{\partial \zeta} \right) \right\} + \frac{j\omega_2}{2g} \left\{ \bar{\phi}_{m2}^{(1)} \left(\frac{\partial^2 \phi_{m1}^{(1)}}{\partial \zeta^2} - K_1 \frac{\partial \phi_{m1}^{(1)}}{\partial \zeta} \right) \right\}. \end{aligned} \quad (9)$$

При взаимосвязанных колебаниях $m, k = 2, 3, 4; m < k$:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \phi_{mk}^{(2)}}{\partial \zeta} - K_3 \phi_{mk}^{(2)} = M_{mk}^{(2)} = & j \frac{(\omega_1 - \omega_2)}{g} \left\{ \frac{\partial \phi_{m1}^{(1)}}{\partial \eta} \frac{\partial \bar{\phi}_{k2}^{(1)}}{\partial \eta} + \frac{\partial \phi_{k1}^{(1)}}{\partial \eta} \frac{\partial \bar{\phi}_{m2}^{(1)}}{\partial \eta} + \frac{\partial \phi_{m1}^{(1)}}{\partial \zeta} \frac{\partial \bar{\phi}_{k2}^{(1)}}{\partial \zeta} + \frac{\partial \phi_{k1}^{(1)}}{\partial \zeta} \frac{\partial \bar{\phi}_{m2}^{(1)}}{\partial \zeta} \right\} - \\ & - \frac{j\omega_1}{2g} \left\{ \phi_{m1}^{(1)} \left(\frac{\partial^2 \bar{\phi}_{k2}^{(1)}}{\partial \zeta^2} - K_2 \frac{\partial \bar{\phi}_{k2}^{(1)}}{\partial \zeta} \right) + \bar{\phi}_{k1}^{(1)} \left(\frac{\partial^2 \phi_{m2}^{(1)}}{\partial \zeta^2} - K_2 \frac{\partial \phi_{m2}^{(1)}}{\partial \zeta} \right) \right\} + \\ & + \frac{j\omega_2}{2g} \left\{ \phi_{m2}^{(1)} \left(\frac{\partial^2 \bar{\phi}_{k1}^{(1)}}{\partial \zeta^2} - K_1 \frac{\partial \bar{\phi}_{k1}^{(1)}}{\partial \zeta} \right) + \bar{\phi}_{k2}^{(1)} \left(\frac{\partial^2 \phi_{m2}^{(1)}}{\partial \zeta^2} - K_2 \frac{\partial \phi_{m2}^{(1)}}{\partial \zeta} \right) \right\}, \end{aligned} \quad (10)$$

где

$$K_1 = (\omega_1)^2/g; \quad K_2 = (\omega_2)^2/g; \quad K_3 = (\omega_1 - \omega_2)^2/g. \quad (11)$$

В условиях (3) – (11) потенциалы первого порядка для каждого вида колебаний определяются на основании решения соответствующих линейных задач [3].

Для определения всех потенциалов второго порядка используется комбинированный метод интегральных уравнений Гельмгольца [4], основанный на введении следующих комбинаций:

$$\phi_{mm}^{(2)} = \phi_{mm1} + \phi_{mm2}; \quad \phi_{mk}^{(2)} = \phi_{mk1} + \phi_{mk2}, \quad (12)$$

где потенциалы ϕ_{mm1} , ϕ_{mk1} учитывают граничное условие на свободной поверхности, а ϕ_{mm2} , ϕ_{mk2} – на контуре. Тогда, можно записать:

$$\frac{\partial \phi_{mm2}}{\partial n} = \frac{\partial \phi_{mm}^{(2)}}{\partial n} - \frac{\partial \phi_{mm1}}{\partial n}, \quad \frac{\partial \phi_{mk2}}{\partial n} = \frac{\partial \phi_{mk}^{(2)}}{\partial n} - \frac{\partial \phi_{mk1}}{\partial n}. \quad (13)$$

Для определения функций ϕ_{mm1} , ϕ_{mk1} используется модифицированный метод Вехаузена-Лайтона [5], согласно которому:

$$\begin{aligned} \phi_{mm1} + i\tilde{\phi}_{mm1} = & \frac{(ReA_{mm} + jImA_{mm})}{K' - K_3} [e^{jK'\eta_1} + ije^{jK'\eta_1}] - j \frac{(ReA_{mm} + jImA_{mm})}{\pi} \left[\frac{e^{iK'\tilde{\zeta}} E_1(iK'\tilde{\zeta})}{K' + K_3} + \frac{e^{-iK'\tilde{\zeta}} E_1(-iK'\tilde{\zeta})}{K' - K_3} \right] + \\ & + 2i \int_{\eta_1}^{\infty} \tilde{M}_{mm} e^{-iK_3(\tilde{\zeta} - l)} dl + \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{M}_{mm} e^{-iK_3(\tilde{\zeta} - l)} E_1(-iK_3(\tilde{\zeta} - l)) dl + (j - i) \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{M}_{mm} e^{-iK_3(\tilde{\zeta} - l)} dl, \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \text{где } \tilde{M}_{mm} = & M_{mm}^{(2)} - (ReA_{mm} + jImA_{mm})e^{jK'\eta_1}; \\ K' = & K_1 - K_2; \\ A_{mm} = & \frac{j}{g}(\omega_1 - \omega_2)2K_1K_2A_{m1}A_{m2}e^{j(\delta_{m1} - \delta_{m2})}. \end{aligned}$$

Аналогичным образом определяются и соответствующие потенциалы при взаимосвязанных колебаниях:

$$\begin{aligned} \phi_{mk1} + i\tilde{\phi}_{mk1} = & \frac{(ReA_{mk} + jImA_{mk})}{K' - K_3} [e^{jK'\eta_1} + ije^{jK'\eta_1}] - j \frac{(ReA_{mk} + jImA_{mk})}{\pi} \left[\frac{e^{iK'\tilde{\zeta}} E_1(iK'\tilde{\zeta})}{K' + K_3} + \frac{e^{-iK'\tilde{\zeta}} E_1(-iK'\tilde{\zeta})}{K' - K_3} \right] + \\ & + 2i \int_{\eta_1}^{\infty} \tilde{M}_{mk} e^{-iK_3(\tilde{\zeta} - l)} dl + \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{M}_{mk} e^{-iK_3(\tilde{\zeta} - l)} E_1(-iK_3(\tilde{\zeta} - l)) dl + (j - i) \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{M}_{mk} e^{-iK_3(\tilde{\zeta} - l)} dl, \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \text{где } \tilde{M}_{mk} = & M_{mk}^{(2)} - (ReA_{mk} + jImA_{mk})e^{jK'\eta_1}; \\ A_{mk} = & \frac{j}{g}(\omega_1 - \omega_2)2K_1K_2(A_{m1}A_{k2}e^{j(\delta_{m1} - \delta_{k2})} + A_{m2}A_{k1}e^{j(\delta_{k1} - \delta_{m2})}). \end{aligned}$$

В выражениях (14) – (15) :

A_m , A_k , δ_m , δ_k – амплитудные и фазовые характеристики соответствующих потенциалов первого порядка;

E_1 – интегрально-показательная функция;

A_{mm} , A_{mk} – пределы правых частей граничных условий на свободной поверхности на бесконечном удалении от контура, представляющие собой осциллирующие функции.

Все потенциалы второго порядка ϕ_{mk2} , ϕ_{mm2} определяются на основании решения следующей системы интегральных уравнений:

$$\begin{aligned} -\phi_{mk2}(\eta, \zeta) + \frac{1}{2\pi} \int_L^L \phi_{mk2}(\eta_1, \zeta_1) \frac{\partial G}{\partial n}(\eta, \zeta, \eta_1, \zeta_1) ds = & \frac{1}{2\pi} \int_L^L \frac{\partial \phi_{mk2}}{\partial n} G(\eta, \zeta, \eta_1, \zeta_1) ds; \\ -\phi_{mm2}(\eta, \zeta) + \frac{1}{2\pi} \int_L^L \phi_{mm2}(\eta_1, \zeta_1) \frac{\partial G}{\partial n}(\eta, \zeta, \eta_1, \zeta_1) ds = & \frac{1}{2\pi} \int_L^L \frac{\partial \phi_{mm2}}{\partial n} G(\eta, \zeta, \eta_1, \zeta_1) ds; \end{aligned} \quad (16)$$

где функция Грина имеет вид

$$\begin{aligned} G(\eta, \zeta, \eta_1, \zeta_1) = & Re_j \left\{ \log \left(\frac{\tilde{\zeta} - \zeta^*}{\tilde{\zeta} - \zeta_1^*} \right) + 2 \int_0^{\infty} \frac{e^{-jk(\tilde{\zeta} - \tilde{\zeta}^*)}}{K_3 - k} dk - j2\pi e^{-jK_3(\tilde{\zeta} - \tilde{\zeta}^*)} \right\}, \\ \tilde{\zeta} = & \eta + j\zeta; \quad \zeta^* = \eta_1 - j\zeta_1; \quad \tilde{\zeta}^* = \eta_1 - j\zeta_1. \end{aligned} \quad (17)$$

После определения всех потенциалов второго порядка легко определить давление, действующее на контур и все гидродинамические силы, возникающие при взаимодействии трех видов колебаний. Выражения для давлений второго порядка при изолированных и взаимосвязанных колебаниях будут иметь вид:

$$p_{33}^{(2)} = -\rho \left(-j(\omega_1 - \omega_2)\phi_{33}^{(2)} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \phi_{31}^{(1)}}{\partial \eta} \frac{\partial \bar{\phi}_{32}^{(1)}}{\partial \eta} + \frac{\partial \phi_{31}^{(1)}}{\partial \zeta} \frac{\partial \bar{\phi}_{32}^{(1)}}{\partial \zeta} \right) - \frac{b}{2} \left(\omega_1 \frac{\partial \phi_{31}^{(1)}}{\partial \zeta} + \omega_2 \frac{\partial \bar{\phi}_{32}^{(1)}}{\partial \zeta} \right) \right); \quad (18)$$

$$p_{22}^{(2)} = -\rho \left(-j(\omega_1 - \omega_2)\phi_{22}^{(2)} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \phi_{21}^{(1)}}{\partial \eta} \frac{\partial \bar{\phi}_{22}^{(1)}}{\partial \eta} + \frac{\partial \phi_{21}^{(1)}}{\partial \zeta} \frac{\partial \bar{\phi}_{22}^{(1)}}{\partial \zeta} \right) - \frac{b}{2} \left(\omega_1 \frac{\partial \phi_{21}^{(1)}}{\partial \zeta} + \omega_2 \frac{\partial \bar{\phi}_{22}^{(1)}}{\partial \zeta} \right) \right); \quad (19)$$

$$\begin{aligned} p_{44}^{(2)} = & -\rho \left(-j(\omega_1 - \omega_2)\phi_{44}^{(2)} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \phi_{41}^{(1)}}{\partial \eta} \frac{\partial \bar{\phi}_{42}^{(1)}}{\partial \eta} + \frac{\partial \phi_{41}^{(1)}}{\partial \zeta} \frac{\partial \bar{\phi}_{42}^{(1)}}{\partial \zeta} \right) - \frac{1}{2} \left(\omega_1 \left(\eta \frac{\partial \phi_{41}^{(1)}}{\partial \zeta} - \zeta \frac{\partial \phi_{41}^{(1)}}{\partial \eta} \right) + \omega_2 \left(\eta \frac{\partial \bar{\phi}_{42}^{(1)}}{\partial \zeta} - \zeta \frac{\partial \bar{\phi}_{42}^{(1)}}{\partial \eta} \right) \right) \right) - \\ & - \rho \frac{1}{2} (\omega_1 \phi_{41}^{(1)} + \omega_1 \bar{\phi}_{42}^{(1)}); \end{aligned} \quad (20)$$

$$p_{23}^{(2)} = -\rho \left(-j(\omega_1 - \omega_2)\phi_{23}^{(2)} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \phi_{21}^{(1)}}{\partial \eta} \frac{\partial \bar{\phi}_{32}^{(1)}}{\partial \eta} + \frac{\partial \phi_{21}^{(1)}}{\partial \zeta} \frac{\partial \bar{\phi}_{32}^{(1)}}{\partial \zeta} + \frac{\partial \phi_{31}^{(1)}}{\partial \eta} \frac{\partial \bar{\phi}_{22}^{(1)}}{\partial \eta} + \frac{\partial \phi_{31}^{(1)}}{\partial \zeta} \frac{\partial \bar{\phi}_{22}^{(1)}}{\partial \zeta} \right) - \right. \\ \left. - \frac{b}{2} \left(\omega_1 \frac{\partial \phi_{31}^{(1)}}{\partial \eta} + \omega_2 \frac{\partial \bar{\phi}_{32}^{(1)}}{\partial \eta} \right) - \frac{b}{2} \left(\omega_1 \frac{\partial \phi_{21}^{(1)}}{\partial \zeta} + \omega_2 \frac{\partial \bar{\phi}_{22}^{(1)}}{\partial \zeta} \right) \right); \quad (21)$$

$$p_{24}^{(2)} = -\rho \left(-j(\omega_1 - \omega_2)\phi_{24}^{(2)} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \phi_{21}^{(1)}}{\partial \eta} \frac{\partial \bar{\phi}_{42}^{(1)}}{\partial \eta} + \frac{\partial \phi_{21}^{(1)}}{\partial \zeta} \frac{\partial \bar{\phi}_{42}^{(1)}}{\partial \zeta} + \frac{\partial \phi_{41}^{(1)}}{\partial \eta} \frac{\partial \bar{\phi}_{22}^{(1)}}{\partial \eta} + \frac{\partial \phi_{41}^{(1)}}{\partial \zeta} \frac{\partial \bar{\phi}_{22}^{(1)}}{\partial \zeta} \right) - \right. \\ \left. - \frac{b}{2} \left(\omega_1 \frac{\partial \phi_{41}^{(1)}}{\partial \eta} + \omega_2 \frac{\partial \bar{\phi}_{42}^{(1)}}{\partial \eta} \right) - \frac{1}{2} \left(\omega_1 \left(\eta \frac{\partial \phi_{21}^{(1)}}{\partial \zeta} - \zeta \frac{\partial \phi_{21}^{(1)}}{\partial \eta} \right) + \omega_2 \left(\eta \frac{\partial \bar{\phi}_{22}^{(1)}}{\partial \zeta} - \zeta \frac{\partial \bar{\phi}_{22}^{(1)}}{\partial \eta} \right) \right) \right) - \rho \frac{1}{2} (\omega_1 \phi_{21}^{(1)} + \omega_1 \bar{\phi}_{22}^{(1)}); \quad (22)$$

$$p_{34}^{(2)} = -\rho \left(-j(\omega_1 - \omega_2)\phi_{34}^{(2)} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \phi_{31}^{(1)}}{\partial \eta} \frac{\partial \bar{\phi}_{42}^{(1)}}{\partial \eta} + \frac{\partial \phi_{31}^{(1)}}{\partial \zeta} \frac{\partial \bar{\phi}_{42}^{(1)}}{\partial \zeta} + \frac{\partial \phi_{41}^{(1)}}{\partial \eta} \frac{\partial \bar{\phi}_{32}^{(1)}}{\partial \eta} + \frac{\partial \phi_{41}^{(1)}}{\partial \zeta} \frac{\partial \bar{\phi}_{32}^{(1)}}{\partial \zeta} \right) - \right. \\ \left. - \frac{b}{2} \left(\omega_1 \frac{\partial \phi_{41}^{(1)}}{\partial \eta} + \omega_2 \frac{\partial \bar{\phi}_{42}^{(1)}}{\partial \eta} \right) - \frac{1}{2} \left(\omega_1 \left(\eta \frac{\partial \phi_{31}^{(1)}}{\partial \zeta} - \zeta \frac{\partial \phi_{31}^{(1)}}{\partial \eta} \right) + \omega_2 \left(\eta \frac{\partial \bar{\phi}_{32}^{(1)}}{\partial \zeta} - \zeta \frac{\partial \bar{\phi}_{32}^{(1)}}{\partial \eta} \right) \right) \right) - \rho \frac{1}{2} (\omega_1 \phi_{31}^{(1)} + \omega_1 \bar{\phi}_{32}^{(1)}); \quad (23)$$

Силы и моменты, действующие на контур, определяются путем интегрирования вышеприведенных давлений по смоченной поверхности контура.

2. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

На основании изложенного метода была разработана программа расчета нелинейных сил второго порядка, обусловленных разностью частот. В целях ее апробации, расчеты сил по разработанному методу были сопоставлены с соответствующими расчетами по программе, реализующей решение данной задачи на основании гибридного метода [2]. Из всех приведенных на рис. 1 – 3 сопоставлений

видно отличное согласование результатов, полученных при использовании разных методов.

В работе проводилось исследование влияния изменения геометрических параметров шпангоутных контуров (отношения осадки к полуширине T/b и коэффициента полноты площади β) на все категории нелинейных сил и моментов. Расчеты проводились для трех серий шпангоутных контуров бульбообразной серии с коэффициентом $\beta = 0,7$ и при значениях $T/b = 0,6; 0,8; 1; 1,4; 1,8$; U-образной серии с коэффициентом $\beta = 0,9$ и значениях $T/b = 0,6; 0,8; 1; 1,4; 1,8$ и серии шпангоутов с отношением $T/b = 1$ и коэффициентами полноты $\beta = 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1$ [1]. Характерные результаты приведены на рис. 4–8 в зависимости от изменения безразмерного волнового числа $\delta_2 = K_2 b/2$ от 0,1 до 2. При этом $\delta_1 = K_1 b/2 = 2,05$.

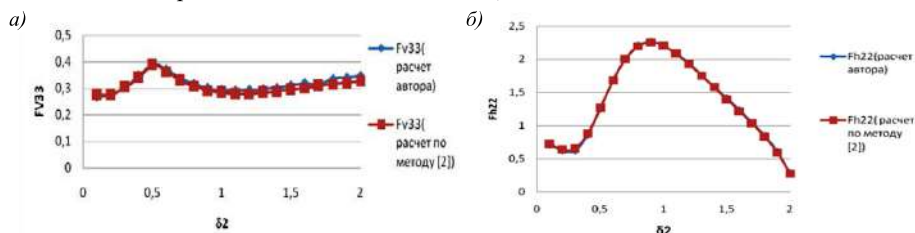


Рис. 1 Значения нелинейных вертикальной (а) и горизонтальной (б) сил, возникающих при изолированных ВК и ПГК прямоугольного контура ($T/b = 1, \beta = 1$)

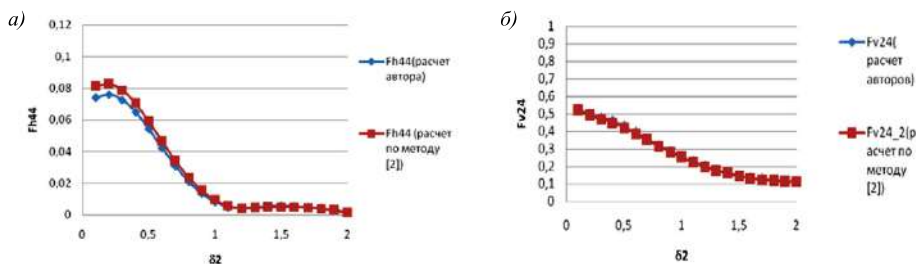


Рис. 2 Значения нелинейных горизонтальной (а) и вертикальной (б) сил, возникающих при БК и взаимосвязанных ПГК и БК для U-образного контура ($T/b = 0,6; \beta = 0,9$)

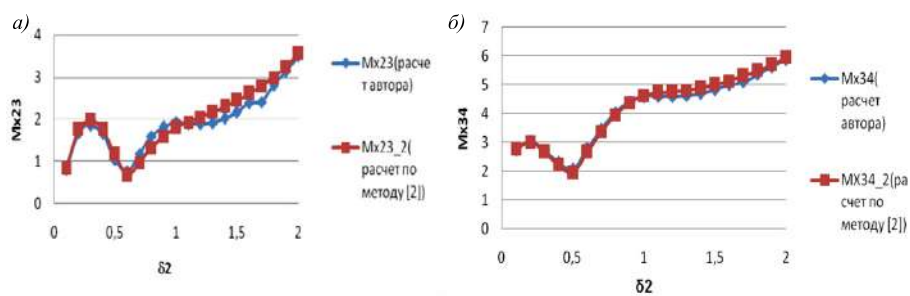


Рис.3 Значения нелинейных моментов, возникающих при совместных ВК и ПГК (а) и совместных ВК и БК (б) бульбообразного контура ($T/b = 2,5$; $\beta = 0,7$)

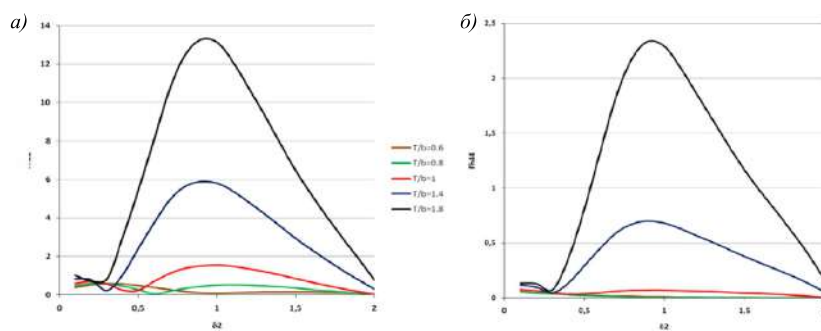


Рис. 4 Значения нелинейных горизонтальных сил, возникающих при ПГК бульбообразной серии контуров (а) и БК U-образной серии (б)

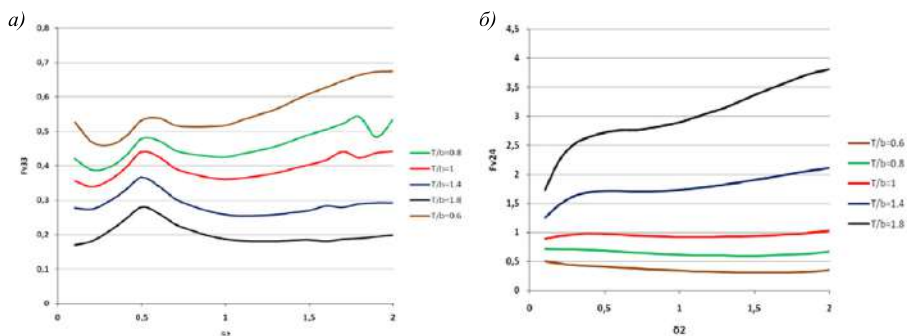


Рис. 5 Значения нелинейных вертикальных сил, возникающих при ВК U-образной серии контуров (а) и совместных ПГК и БК бульбообразной серии (б)

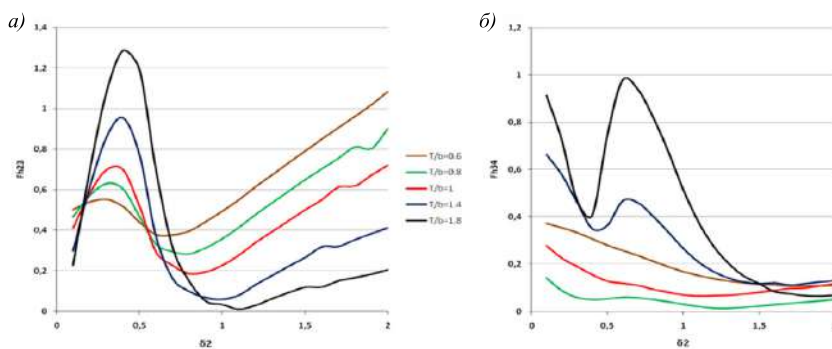


Рис. 6 Значения нелинейных горизонтальных сил, возникающих при совместных ПГК и ВК (а) и совместных ВК и БК (б) U-образной серии контуров

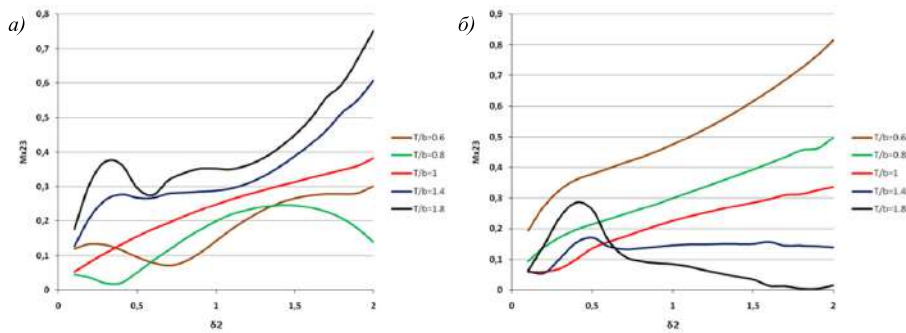


Рис.7 Значения нелинейных моментов, возникающих при совместных ПГК и ВК бульбообразной (а) и U-образной (б) серии контуров

Анализ полученных результатов расчетов нелинейных сил при изменении отношения T/b позволил сделать следующие выводы:

- при изолированных ВК шпангоутных контуров происходит увеличение нелинейных вертикальных сил в зависимости от уменьшения отношения T/b (см. рис. 5);
- при ПГК и БК происходит увеличение нелинейных горизонтальных, вертикальных сил и моментов при увеличении T/b (см. рис. 4);
- при совместных ПГК и БК возникает единственная гидродинамическая реакция – нелинейная вертикальная сила, которая увеличивается по мере увеличения отношения T/b (см. рис. 5);
- при совместных ВК и БК нелинейная горизонтальная сила и момент уменьшаются при увеличении T/b от 0,5 до 0,8. При дальнейшем увеличении T/b данные нелинейные реакции увеличиваются. Минимальные значения нелинейных сил и моментов наблюдаются у шпангоутных контуров с отношением $T/b = 0,8–0,9$ (см. рис. 6);

при совместных ПГК ВК нелинейные горизонтальные силы увеличиваются при увеличении отношения T/b в диапазоне безразмерных волновых чисел $\delta_2 < 0,7$. В диапазоне $\delta_2 > 0,7$, наоборот, увеличение нелинейных горизонтальных сил происходит при уменьшении T/b . Это связано с большим влиянием ВК по сравнению с ПГК в данном диапазоне безразмерных волновых чисел (см. рис. 6). Нелинейные моменты, возникающие при совместных ПГК и ВК для разных серий контуров ведут себя по-разному в зависимости от изменения T/b . Для бульбообразной серии большее влияние оказывают ВК, поэтому моменты увеличиваются при уменьшении T/b , для серии U-образных шпангоутов, наоборот, большее влияние оказывают ПГК. Поэтому нелинейные моменты увеличиваются с увеличением T/b (см. рис. 7).

Исследования влияния коэффициента полноты площади шпангоута показали следующее:

- нелинейные вертикальные силы, возникающие при ВК и при совместных ПГК и БК возрастают при уменьшении коэффициента полноты и имеют наибольшие значения для треугольных контуров (см. рис. 8, ж, з);

• при ПГК контуров с увеличением коэффициента полноты увеличиваются нелинейные горизонтальные силы, в то время как нелинейные вертикальные силы уменьшаются (см. рис. 8, в). Нелинейные моменты M_{x22} уменьшаются при увеличении β от 0,5 до 0,8. При дальнейшем росте коэффициента полноты моменты увеличиваются. Минимальные нелинейные моменты имеют место для контуров, форма которых близка к круглой ($\beta = 0,7–0,8$) (см. рис. 8, а);

• при бортовых колебаниях увеличение коэффициента полноты приводит к росту вертикальной силы F_{y44} (см. рис. 8, г). Нелинейная горизонтальная сила и момент уменьшаются при увеличении β от 0,5 до 0,8, затем при увеличении β от 0,8 до 1 – возрастают (см. рис. 8, б);

• в случае совместных ПГК и ВК шпангоутных контуров возникающие нелинейные горизонтальные силы возрастают при увеличении коэффициента полноты в диапазоне безразмерных волновых чисел $\delta_2 < 0,6$. В зоне $\delta_2 > 0,6$ нелинейные силы уменьшаются при увеличении β (см. рис. 8, д). Нелинейные моменты M_{x23} уменьшаются при увеличении β от 0,5 до 0,8, затем при увеличении β от 0,8 до 1 – возрастают;

• при совместных ВК и БК поведение возникающих нелинейных горизонтальной силы и момента аналогично изолированным БК. Обе реакции уменьшаются при увеличении β от 0,5 до 0,8, затем при увеличении β от 0,8 до 1 – возрастают (см. рис. 8, е).

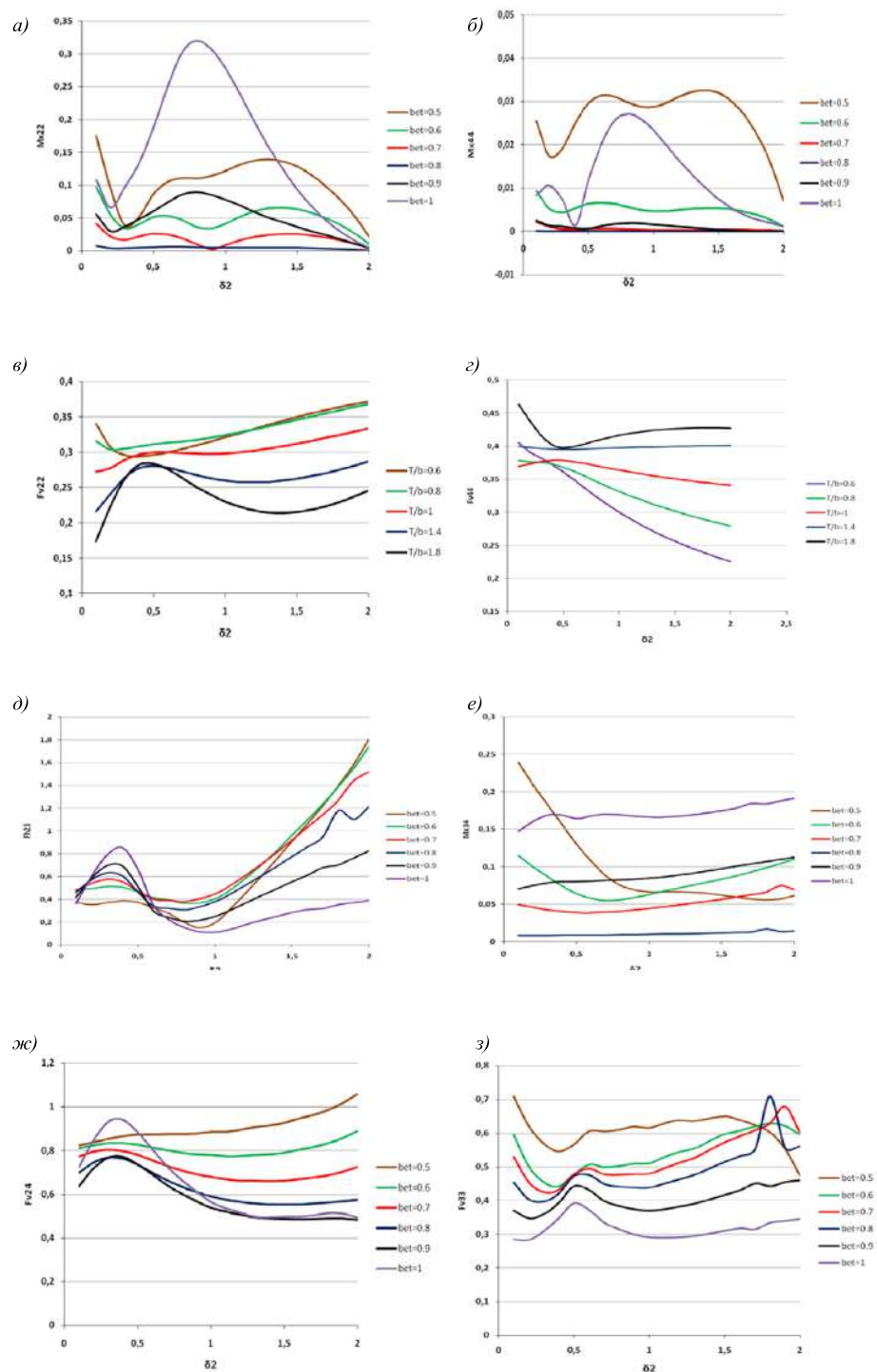


Рис. 8 Значения нелинейных сил и моментов, возникающих при изолированных и взаимосвязанных колебаниях серии контуров с изменением коэффициента полноты ($T/b=1$)

ВЫВОДЫ

Проведенный анализ результатов показывает различную степень влияния отдельных категорий нелинейных сил, которая прежде всего зависит от формы шпангоутного контура. Очевидно, что при дальнейшей разработке алгоритмов расчета нелинейной качки судна в условиях нерегулярного волнения необходим учет всех нелинейных гидродинамических сил и моментов, возникающих при поперечной качке отдельных шпангоутных контуров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Семенова В.Ю., Киав Тхура. Определение нелинейных сил второго порядка, обусловленных разностью частот при дифракции волнения от неподвижного контура // Морские интеллектуальные технологии. – 2015. – № 4(30), т.1. – С. 16 – 22.
2. Семенова В.Ю. Расчет нелинейных сил второго порядка, обусловленных суммой и разностью частот и возникающих при дифракции нерегулярного волнения от шпангоутного контура // Морской Вестник. – № 3 (6). – С. 43 – 47.
3. Семенова В.Ю. Разработка метода расчета нелинейной качки судов: дис. на соискание уч. степ. д-ра. техн. наук. – СПб., ГМТУ, 2005.
4. Papanikolaou A.(1988) On the solution of the quasi-third order problem of two-dimensional cylinders in Forced –Motion. Journal of the Kansai society of Naval Architects of Japan N 210, pp. 121 – 133.
5. Wehausen J.V., Laitone E.V. Surface waves. Encyclopedia of Physics. Berlin, Springer-Verlag, 1960, v.9, pp. 446 – 778.

УДК 629.5.011.262.4

ПРОГНОЗ ПАРАМЕТРОВ КАЧКИ АВАРИЙНОГО МОРСКОГО ОБЪЕКТА ПРИ БОРЬБЕ ЗА ЕГО ЖИВУЧЕСТЬ В ШТОРМОВЫХ УСЛОВИЯХ

С.Г. Живица, канд. техн. наук, ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, e-mail: 9_otd@ksrc.ru

Представлено описание практического способа определения параметров качки поврежденного морского объекта, необходимых при определении запаса его динамической устойчивости в случае развития аварийной ситуации, сопровождающейся фильтрацией заборной воды в отсеки, смежные с поврежденными, а также в рамках борьбы экипажа за живучесть в условиях заполнения водой водонепроницаемых отсеков и цистерн, выбранных для спрямления аварийного объекта. Предлагаемый способ базируется на нелинейной математической модели качки поврежденного плавсредства, прошедшей экспериментальную валидацию.

Ключевые слова: аварийный плавучий объект, программа расчета качки на волнении, модельные испытания.

FORECAST OF ROLLING AND PITCHING PARAMETERS OF EMERGENCY OFFSHORE FACILITY DURING DAMAGE CONTROL IN STORM CONDITIONS

S.G. Zhivitsa, PhD, FSUE "Krylov State Research Centre", St. Petersburg, e-mail: 9_otd@ksrc.ru

The paper describes practical method to predict the facility motion parameters of damaged marine vessel required to assess operating dynamic stability margin when the accident is accompanied with the progressive flooding as well as the crew's shipboard damage control action followed by flood adjacent of the watertight compartments and tanks intended for providing the damage vehicle survivability. The proposed method is based on a nonlinear mathematical model of the damaged craft motions, which efficiency is validated by the model experiment.

Keywords: Emergency floating object, program for wave induced oscillation calculation, model tests.

ВВЕДЕНИЕ

При разработке концепции бортовой программы по оценке динамической устойчивости аварийного морского объекта, изложенной в [1], предполагалось, что текущий уровень запаса динамической устойчивости аварийного объекта оценивается с применением бортовых датчиков, измеряющих

текущие параметры ветра, волнения и бортовой качки.

В случае развития аварийной ситуации, сопровождающейся фильтрацией заборной воды в отсеки, смежные с поврежденными, а также в рамках борьбы за живучесть возникает необходимость в прогнозе запасов динамической устойчивости плавсредства при заполнении водой других водонепроницаемых отсеков, либо балластных

цистерн, выбранных для спрямления аварийного объекта. Для решения этой задачи бортовой компьютер должен оперативно выполнить расчетный прогноз интенсивности бортовых колебаний аварийного объекта. Для обеспечения адекватности прогноза программный код должен базироваться на математической модели, учитывающей все основные особенности поврежденного объекта, среди которых: наличие значительных масс воды внутри корпуса; несимметричное распределение весовой нагрузки; несимметрия смоченной поверхности судна вследствие появления статических крена и дифферента; резкое изменение формы смоченной поверхности при качке, сопровождающейся входом палубы в воду или оголением скулы.

В качестве такой модели в работе предлагается система нелинейных дифференциальных уравнений качки накрененного судна, базирующаяся на методах, описанных в [2] и [3], совместно с уравнениями, определяющими динамику влившейся забортной воды в поврежденные отсеки [4].

1. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КАЧКИ АВАРИЙНОГО СУДНА¹, ПЛАВАЮЩЕГО С КРЕНОМ И ДИФФЕРЕНТОМ

Несимметричность нагрузки и смоченной поверхности аварийного судна приводит к взаимной связи отдельных видов качки, которые при линейной трактовке движения судна, плавающего в прямом положении, считаются взаимно независимыми. Эта взаимосвязь относится к наиболее важным качественным особенностям динамики поврежденного судна. Она усугубляется при учете конечности амплитуд качки и набегающих волн вследствие непрямобортности обводов в районе действующей ватерлинии, пренебрежение которой привносит качественное упрощение в теорию качки аварийного судна.

В рамках допущения об идеальности жидкости можно выделить следующие основные источники нелинейного взаимодействия взволнованной жидкости и корпуса судна:

- переменность смоченной поверхности во времени и ее отличие по форме от смоченной поверхности качающегося судна в положении равновесия;
- наличие в потенциале скорости движения жидкости составляющих высшего порядка малости;
- присутствие компонентов высшего порядка малости в интеграле Лагранжа-Коши;

¹Под термином «судно» в статье понимаются все виды морских объектов с соотношениями главных размерений, близкими к судовым, сохраняющих остойчивость и плавучесть при частично разрушенном наружном борте.

- наличие нелинейных компонентов в силах, обусловленных переходом от связанной системы координат, в которой определяются гидродинамические давления, к полусвязанной, используемой для записи уравнений движения судна на волнении.

Учитывая перечисленные особенности аварийного судна при построении математической модели его качки, в качестве базового в работе применен метод, изложенный в [2], позволяющий развить математическую модель на случай качки судна с креном и дифферентом и в максимальной степени использовать достоинства решения системы нелинейных уравнений движения во временной области, в том числе, и в условиях морского нерегулярного волнения.

1.1 Основные допущения математической модели

Гидромеханические силы потенциальной природы определяются интегрированием избыточного давления по смоченной поверхности судна. Избыточное давление $(p - p_0)$ определяется интегралом Лагранжа-Коши в виде

$$p - p_0 = \rho g \zeta^0 - \rho \frac{\partial_a \Phi^0}{\partial t} - \frac{\rho}{2} \times \left[\left(\frac{\partial \Phi^0}{\partial \xi^0} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi^0}{\partial \eta^0} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi^0}{\partial \zeta^0} \right)^2 \right], \quad (1)$$

где ζ^0 , η^0 , ξ^0 – вертикальные, поперечно-горизонтальные и продольно-горизонтальные перемещения центра тяжести судна в абсолютной (неподвижной) системе координат;

Φ^0 – потенциал скорости абсолютного движения жидкости;

$\frac{\partial_a}{\partial t}$ – частная производная по времени в абсолютной системе координат;

ρ – плотность жидкости;

g – ускорение силы тяжести.

Таким образом, необходимо знать потенциал скорости Φ^0 , задача по определению которого сводится к отысканию решения уравнения Лапласа при соответствующих граничных условиях.

Поскольку прямые методы решения поставленной задачи, пригодные для практических целей, отсутствуют, его можно достичь, разделив гидромеханические силы на составляющие и вычислив их по отдельности, не определяя строго функцию Φ^0 .

Основная сложность поставленной задачи определяется необходимостью учета нелинейностей, обусловленных переменностью смоченной поверхности при качке судна на волнении и квадратичным членом в уравнении (1).

Решение задачи о качке судна в общем виде относится к категории задач о возбуждении волн, когда в дополнение к основному источнику (волнению) добавляется источник в виде судна, движение которого неизвестно и определяется в процессе пошагового по времени решения. При этом задачи моделирования набегающего волнения и качки судна являются связанными.

Как известно, модель удлиненного судна позволяет разбить его корпус на цилиндрические отсеки и для простоты рассматривать колебания каждого отсека в плоскости шпангоута. В результате, задача может быть сведена к определению двух гидродинамических сил P_η и P_ζ – проекций главного вектора на взаимоперпендикулярные оси $O\eta$ (поперечная горизонтальная ось) и $O\zeta$ (вертикальная ось) и одного момента M_x – проекции момента на продольную горизонтальную ось Ox .

Суммируя по длине составляющие сил, действующие на цилиндрический отсек единичной длины, можно определить суммарные гидромеханические силы и моменты, действующие на судно в целом (момент сил относительно поперечной центральной оси определяется суммой вида $\Delta x \sum_j P_{\zeta j}$):

$$\begin{cases} P_\zeta^\Sigma = \sum_{j=1}^m P_{\zeta j} \Delta x_j - \frac{1}{2} (P_{\zeta 1} \Delta x_1 + P_{\zeta m} \Delta x_m) \\ P_\eta^\Sigma = \sum_{j=1}^m P_{\eta j} \Delta x_j - \frac{1}{2} (P_{\eta 1} \Delta x_1 + P_{\eta m} \Delta x_m) \\ M_x^\Sigma = \sum_{j=1}^m M_{xj} \Delta x_j - \frac{1}{2} (M_{x1} \Delta x_1 + P_{xm} \Delta x_m) \\ M_y^\Sigma = \sum_{j=1}^m P_{\zeta j} x_j \Delta x_j - \frac{1}{2} (P_{\zeta 1} x_1 \Delta x_1 + P_{\zeta m} x_m \Delta x_m) \\ M_z^\Sigma = \sum_{j=1}^m P_{\eta j} x_j \Delta x_j - \frac{1}{2} (P_{\eta 1} x_1 \Delta x_1 + P_{\eta m} x_m \Delta x_m) \end{cases} \quad (2)$$

где M_y^Σ – момент гидродинамических сил относительно оси, проходящей через центр тяжести (ЦТ) судна и параллельной линии пересечения плоскости мидель-шпангоута и поверхности тихой воды;

M_z^Σ – момент гидродинамических сил относительно оси, проходящей через ЦТ судна и перпендикулярной линии пересечения плоскости мидель-шпангоута и поверхности тихой воды.

Гидромеханические силы и момент в уравнениях (2) можно представить в виде суммы составляющих. Так, применительно к вертикальной составляющей эта сумма выглядит следующим образом:

$$P_\zeta = P_\zeta^I + P_\zeta^{II} + P_\zeta^{III} + P_\zeta^{IV}, \quad (3)$$

где P_ζ^I – гидростатическая сила;
 P_ζ^{II} – сила, вызванная свободными набегающими волнами;
 P_ζ^{III} – сила, обусловленная возмущениями, вносимыми качающимся судном в жидкость, и разделяемая на инерционно-демпфирующую $P_{\text{ин}}^{III}$ и дифракционную $P_{\text{дф}}^{III}$ составляющие;
 P_ζ^{IV} – сила, определяемая квадратичным членом интеграла Лагранжа-Коши.

Отличие описанного представления от классической линейной гидродинамической теории качки заключается в том, что указанные категории сил не являются взаимонезависимыми; каждая из них – функция элементов качки, которые, в свою очередь,

определяются всей совокупностью сил. Они связаны через мгновенную смоченную поверхность, определяемую перемещением корпуса судна относительно волновой поверхности.

1.2 Расчет инерционно-демпфирующих сил и моментов

Инерционно-демпфирующие силы для судна в целом определяются выражением:

$$P_{\text{ин}}^\Sigma = - \sum_{k=1}^5 A_{jk} \frac{dv_k}{dt} \sum_{k=1}^6 B_{jk} v_k \quad (4)$$

В формуле (4)

v_k – скорость перемещения судна в направлении k ; индексы j и k имеют следующий смысл:

$j=1$ определяет проекцию силы на ось $O\zeta$;

$j=2$ – на ось $O\eta$;

$j=3$ – на ось $O\zeta$;

$j=4$ – проекцию момента на ось Ox ;

$j=5$ – проекцию момента на ось Oy , параллельную оси $O\eta$;

$j=6$ – проекцию момента на ось Oz , параллельную $O\zeta$.

Аналогично индексы k определяют проекции линейных и угловых скоростей на те же оси. Коэффициенты A_{jk} называются обобщенными коэффициентами присоединенных масс судна; коэффициенты B_{jk} – коэффициентами демпфирования судна.

Согласно формуле Грина матрица присоединенных масс судна симметрична относительно главной диагонали, то есть $A_{jk} = A_{kj}$. Этим же свойством обладает и матрица коэффициентов демпфирования. Очевидно, что для тела произвольной формы и, в частности, для аварийного судна, плавающего с креном и дифферентом, обе матрицы $[A_{jk}]$ и $[B_{jk}]$ будут содержать в общем случае 21 независимый член. При использовании модели удлиненного судна число независимых членов в этих матрицах сокращается до 15, поскольку в этом случае $\cos(n, x) \approx 0$ и ряд коэффициентов с индексами $1k$ и $k1$ становятся равными нулю.

По результатам решения плоской краевой задачи о вынужденных колебаниях несимметричного контура на поверхности жидкости определяются коэффициенты присоединенных масс и демпфирования $\mu_{jk}^0, \lambda_{jk}^0$ ($j, k = 2, 3, 4$) в системе координат $Oxyz$, связанной с судном и совпадающей с плоскостью невозмущенной поверхности воды (допущение линейной задачи). При этом справедливы формулы

$$A_{jk} = \int_{-L/2}^{L/2} \mu_{jk}^0(x) dx, \quad B_{jk} = \int_{-L/2}^{L/2} \lambda_{jk}^0(x) dx \quad (5)$$

при индексах $j, k = 2, 3, 4$, позволяющие на основе метода плоских сечений вычислить присоединенные массы $A_{22}, A_{23}, A_{24}, A_{33}, A_{34}, A_{44}$ и коэффициенты демпфирования с теми же индексами. Что касается присоединенных масс, отвечающим остальным сочетаниям индексов, то они определяются в соответствии с формулами [5]:

$$\begin{aligned}
A_{25}^0 &= -\int_{-L/2}^{L/2} x\mu_{23}^0(x)dx; \quad A_{35}^0 = -\int_{-L/2}^{L/2} x\mu_{33}^0(x)dx; \\
A_{45}^0 &= -\int_{-L/2}^{L/2} x\mu_{34}^0(x)dx; \quad A_{55}^0 = \int_{-L/2}^{L/2} x^2\mu_{33}^0(x)dx; \\
A_{26}^0 &= \int_{-L/2}^{L/2} x\mu_{22}^0(x)dx; \quad A_{36}^0 = \int_{-L/2}^{L/2} x\mu_{23}^0(x)dx; \\
A_{46}^0 &= \int_{-L/2}^{L/2} x\mu_{24}^0(x)dx; \quad A_{56}^0 = -\int_{-L/2}^{L/2} x\mu_{23}^0(x)dx; \\
A_{66}^0 &= \int_{-L/2}^{L/2} x^2\mu_{22}^0(x)dx.
\end{aligned} \quad (6)$$

При произвольном положении ЦТ аварийного судна, не совпадающим с плоскостью ватерлинии равновесия, коэффициенты матриц $[A_{jk}]$ и $[B_{jk}]$ должны быть преобразованы в соответствии с формулами перехода В.М. Лаврентьева [6] при параллельном переносе системы координат в положение с началом в центре тяжести наклоненного судна (x_p, y_p, z_p) , имеющими следующий вид:

$$\begin{aligned}
A_{22} &= A_{22}^0; \quad A_{23} = A_{23}^0; \quad A_{33} = A_{33}^0; \\
A_{24} &= A_{24}^0 + z_p A_{22}^0 - y_p A_{23}^0; \quad A_{25} = A_{25}^0 + x_p A_{23}^0; \\
A_{26} &= A_{26}^0 - x_p A_{22}^0; \quad A_{34} = A_{34}^0 - y_p A_{33}^0 + z_p A_{23}^0; \\
A_{35} &= A_{35}^0 + x_p A_{33}^0; \quad A_{36} = A_{36}^0 - x_p A_{23}^0; \\
A_{55} &= A_{55}^0 + x_p^2 A_{33}^0 + 2x_p A_{23}^0; \\
A_{44} &= A_{44}^0 + z_p^2 A_{22}^0 + y_p^2 A_{33}^0 + 2z_p A_{24}^0 - 2y_p A_{34}^0 - 2y_p z_p A_{23}^0; \\
A_{45} &= A_{45}^0 - y_p A_{35}^0 + z_p A_{25}^0 + x_p A_{34}^0 - x_p y_p A_{33}^0 + x_p z_p A_{23}^0; \\
A_{46} &= A_{46}^0 + y_p A_{25}^0 + z_p A_{26}^0 - x_p A_{24}^0 + x_p y_p A_{23}^0 - x_p z_p A_{22}^0; \\
A_{56} &= A_{56}^0 - x_p^2 A_{23}^0 - 2x_p A_{25}^0; \quad A_{66} = A_{66}^0 + x_p^2 A_{22}^0 - 2x_p A_{26}^0.
\end{aligned} \quad (7)$$

Формулы перехода для коэффициентов демпфирования определяются аналогичным образом.

Учет влияния статического дифферента, максимальная величина которого для аварийного судна рассматриваемого типа составляет, как правило, не более 5° , что соответствует затоплению кормового машинного отделения и прилегающих к нему коффердамов, и происходит за счет вычисления гидродинамических коэффициентов шпангоутных контуров по фактическую осадку, т.е. с учетом статического дифферента.

1.3 Массовые и инерционные характеристики аварийного судна

При рассмотрении качки поврежденного судна вода в затопленных отсеках рассматривается как принятый груз. Такой подход упрощает решение задачи по определению гидродинамических характеристик корпуса аварийного судна, а также позволяет

непосредственно распространить методы оценки динамики твердого тела с полостями, заполненными жидкостью, на случай качки судна с отсеками, затопленными произвольным образом. При этом, в общем случае, весовая нагрузка будет несимметричной относительно диаметральной плоскости и мидель-шпангоута судна. Как следствие, центральные оси инерции перестают быть главными как у неповрежденного судна, и в уравнениях вращательного движения появляются дополнительные члены, содержащие в виде коэффициентов при угловых скоростях и ускорениях характеристики распределения масс несимметричного тела.

Выражение кинетической энергии судна при вращательном движении в системе координат, связанной с центром тяжести судна, в соответствии с законами теоретической механики, определяется следующим образом:

$$T = \frac{J}{2} \omega^2 = \frac{J_x}{2} \omega_x^2 + \frac{J_y}{2} \omega_y^2 + \frac{J_z}{2} \omega_z^2 - J_{yz} \omega_y \omega_z - J_{xz} \omega_x \omega_z - J_{xy} \omega_x \omega_y, \quad (8)$$

где ω – мгновенная угловая скорость;

J – момент инерции массы судна относительно мгновенной оси вращения, проходящей через ЦТ судна;

J_x, J_y, J_z – центральные моменты инерции массы судна;

J_{yz}, J_{zx}, J_{xy} – центробежные моменты инерции;

$\omega_x, \omega_y, \omega_z$ – проекции угловой скорости наклонения судна, определяемые формулами:

$$\begin{aligned}
\omega_x &= \dot{\theta} - \dot{\chi} \sin \psi; \\
\omega_y &= \dot{\chi} \sin \theta \cos \psi + \dot{\psi} \sin \theta; \\
\omega_z &= \dot{\chi} \cos \theta \cos \psi - \dot{\psi} \sin \theta.
\end{aligned} \quad (9)$$

В выражениях (9) $\theta, \dot{\theta}; \chi, \dot{\chi}; \psi, \dot{\psi}$ определяют, соответственно, бортовые наклонения и скорость наклонения судна, скорость его рыскания, углы килевой качки судна и ее скорость.

Используя уравнения Лагранжа второго рода [6], можно получить равенства, левые части которых содержат составляющие моментов, отражающих проявление инерционности аварийного судна:

$$J_x \dot{\omega}_x - J_{zx} \dot{\omega}_z - J_{xy} \dot{\omega}_y - \omega_z (J_y \omega_y - J_{yz} \omega_z - J_{xy} \omega_x) + \omega_y (J_z \omega_z - J_{yz} \omega_y - J_{zx} \omega_x) = \Sigma M_x; \quad (10)$$

$$J_y \dot{\omega}_y - J_{yz} \dot{\omega}_z - J_{xy} \dot{\omega}_x - \omega_x (J_z \omega_z - J_{yz} \omega_y - J_{zx} \omega_x) + \omega_z (J_x \omega_x - J_{zx} \omega_z - J_{xy} \omega_y) = \Sigma M_y; \quad (11)$$

$$J_z \dot{\omega}_z - J_{yz} \dot{\omega}_y - J_{zx} \dot{\omega}_x - \omega_y (J_x \omega_x - J_{zx} \omega_z - J_{xy} \omega_y) + \omega_x (J_y \omega_y - J_{yz} \omega_z - J_{xy} \omega_x) = \Sigma M_z. \quad (12)$$

При этом моменты, указанные в правых частях уравнений (10) – (12), вычисляются относительно осей, проходящих через центр тяжести судна.

1.4 Уравнения движения аварийного судна

Полученные нелинейные выражения сил, обусловленные взаимодействием мгновенной смоченной поверхности судна и жидкости, и допущение о постоянстве курсового угла позволяют составить систему пяти взаимосвязанных уравнений, описывающих качку аварийного судна, дрейфующего под произвольным углом к набегающим волнам. В систему входят уравнения килевой, вертикальной, бортовой, поперечно-горизонтальной качки и рыскания.

Линеаризации общих выражений (2) и разложение тригонометрических функций угла крена в Ряд Тейлора в окрестности угла статического равновесия θ_0 поврежденного судна приводит к следующим соотношениям для производных угловых перемещений:

$$\omega_x = \dot{\theta};$$

$$\omega_x = \dot{\chi} \sin \theta_0 + \dot{\psi} \cos \theta_0; \quad (13)$$

$$\omega_z = \dot{\chi} \cos \theta_0 - \dot{\psi} \sin \theta_0;$$

$$\dot{\omega}_x = \ddot{\theta};$$

$$\dot{\omega}_x = \ddot{\chi} \sin \theta_0 + \ddot{\psi} \cos \theta_0; \quad (14)$$

$$\dot{\omega}_z = \ddot{\chi} \cos \theta_0 - \ddot{\psi} \sin \theta_0.$$

При этом в уравнениях качки, в соответствии с допущением о малости угловых скоростей качки аварийного судна, сохраняются только первые три члена из левых частей уравнений (10) – (12). Если же учесть малость величин центробежных моментов инерции по сравнению с моментами J_y, J_z , то

окончательно можно рассматривать уравнения качки аварийного судна в следующем виде:

$$\begin{cases} \frac{D}{g} \ddot{\zeta}_g = P_{\zeta}^{(\Sigma)} \\ \frac{D}{g} \ddot{\eta}_g = P_{\eta}^{(\Sigma)} \\ J_x \ddot{\theta} - (J_{xy} \cos \theta_0 - J_{zx} \sin \theta_0) \ddot{\psi} - (J_{zx} \cos \theta_0 + J_{xy} \sin \theta_0) \ddot{\chi} = M_x^{(\Sigma)}, \\ J_y \ddot{\psi} \cos \theta_0 + J_y \ddot{\chi} \sin \theta_0 = M_y^{(\Sigma)} \\ J_z \ddot{\chi} \cos \theta_0 + J_z \ddot{\psi} \sin \theta_0 = M_z^{(\Sigma)} \end{cases} \quad (15)$$

где $\eta_g, \zeta_g, \theta, \psi, \chi$ – текущие ординаты, соответственно, поперечно-горизонтального движения и вертикальных колебаний центра тяжести судна, бортовой, килевой качки, а также рыскания вокруг осей, проходящих через центр тяжести судна.

Входящие в левую часть уравнений (15) моменты инерции и центробежные моменты инерции относительно соответствующих осей определяются по известным формулам теоретической механики. Силы и моменты в правой части уравнений (15), исходя из допущений гидродинамической модели удлиненного судна, вычисляются суммированием по его длине составляющих гидромеханических сил (3), действующих в вертикальной плоскости на элементарный объем корпуса судна, имеющий единичную длину и поперечную форму, совпадающую с рассматриваемым шпангоутным сечением.

Перенос в левую часть уравнений (15) составляющие инерционно-демпфирующих сил, пропорциональных ускорениям и скоростям колебаний аварийного судна, уравнения качки аварийного, потерявшего ход, судна представляются в канонической форме:

$$\begin{cases} \left(\frac{D}{g} + A_{33} \right) \ddot{\zeta}_g + A_{23} \ddot{\eta}_g + A_{34} \ddot{\theta} + A_{35} \ddot{\psi} + A_{36} \ddot{\chi} + B_{33} \dot{\zeta}_g + B_{23} \dot{\eta}_g + B_{34} \dot{\theta} + B_{35} \dot{\psi} + A_{36} \dot{\chi} = \sum_{j=1}^N \Delta x_j (P_{\zeta j}^I + P_{\zeta j}^{II} + P_{\zeta j}^{III} + P_{\zeta j}^{IV}) \\ \left(\frac{D}{g} + A_{22} \right) \ddot{\eta}_g + A_{23} \ddot{\zeta}_g + A_{24} \ddot{\theta} + A_{25} \ddot{\psi} + A_{26} \ddot{\chi} + B_{22} \dot{\eta}_g + B_{23} \dot{\zeta}_g + B_{24} \dot{\theta} + B_{25} \dot{\psi} + A_{26} \dot{\chi} = \\ = \sum_{j=1}^N \Delta x_j (P_{\eta j}^I + P_{\eta j}^{II} + P_{\eta j}^{III} + P_{\eta j}^{IV}) \\ (J_x + A_{44}) \ddot{\theta} + A_{24} \ddot{\eta}_g + A_{34} \ddot{\zeta}_g + (A_{45} + J_{xy} \cos \theta_0 + J_{zx} \sin \theta_0) \ddot{\psi} + (A_{46} - J_{zx} \cos \theta_0 - J_{xy} \sin \theta_0) + \\ + B_{44} \dot{\theta} + B_{24} \dot{\eta}_g + B_{34} \dot{\zeta}_g + B_{45} \dot{\psi} + A_{46} \dot{\chi} = \sum_{j=1}^N \Delta x_j (M_{xj}^I + M_{xj}^{II} + M_{xj}^{III} + M_{xj}^{IV}) \\ (J_y \cos \theta_0 + A_{55}) \ddot{\psi} + A_{25} \ddot{\eta}_g + A_{35} \ddot{\zeta}_g + A_{45} \ddot{\theta} + (J_y \sin \theta_0 + A_{56}) \ddot{\chi} + B_{55} \dot{\psi} + B_{25} \dot{\eta}_g + B_{35} \dot{\zeta}_g + B_{45} \dot{\theta} + A_{56} \dot{\chi} = \\ = \sum_{j=1}^N x_j \Delta x_j (P_{\psi j}^I + P_{\psi j}^{II} + P_{\psi j}^{III} + P_{\psi j}^{IV}) \\ (J_z \cos \theta_0 + A_{66}) \ddot{\chi} + A_{26} \ddot{\eta}_g + A_{36} \ddot{\zeta}_g + A_{46} \ddot{\theta} + (A_{56} - J_z \sin \theta_0) \ddot{\psi} + B_{66} \dot{\chi} + B_{26} \dot{\eta}_g + B_{36} \dot{\zeta}_g + B_{46} \dot{\theta} + A_{56} \dot{\psi} = \\ = \sum_{j=1}^N x_j \Delta x_j (P_{\chi j}^I + P_{\chi j}^{II} + P_{\chi j}^{III} + P_{\chi j}^{IV}) \end{cases} \quad (16)$$

Система уравнений (16) является неоднородной системой взаимосвязанных нелинейных дифференциальных уравнений второго порядка, состоящая из пяти уравнений с 15 неизвестными $\ddot{\eta}_g, \ddot{\zeta}_g, \ddot{\theta}, \ddot{\psi}, \ddot{\chi}, \dot{\eta}_g, \dot{\zeta}_g, \dot{\theta}, \dot{\psi}, \dot{\chi}, \eta_g, \zeta_g, \theta, \psi, \chi$, которая при моделировании качки поврежденного судна должна быть дополнена уравнениями движения жидкости в затопленных отсеках, приведенных в [1].

2 ПРОГРАММА РАСЧЕТА КАЧКИ ПОВРЕЖДЕННОГО ПЛАВУЧЕГО ОБЪЕКТА

Разработанная программа по решению уравнений движения (16) использует алгоритм расчета гидродинамических характеристик судна с произвольной посадкой [3] и математическую модель поведения воды в затопленных отсеках качающегося на волнении поврежденного объекта [4].

Программа численно моделирует во времени процесс качки судна с затопленными отсеками на нерегулярном волнении, обладающего четырьмя степенями свободы – в вертикально-продольной плоскости (вертикальная и килевая качка) и в вертикально-поперечной плоскости судна (бортовая качка и поперечно-горизонтальные колебания). Пятая степень свободы (рыскание в горизонтальной плоскости) в программе опущена в связи с ее минимальным влиянием на остальные виды качки, а также для сокращения времени счета программы.

Учитывая необходимость последующего тестирования, разработанная программа выполнена в двух вариантах: расчет качки судна (морской ледостойкой технологической платформы – МЛТП) на двухмерном нерегулярном волнении и расчет на регулярном, синусоидальном волнении.

Примеры результатов работы разработанной программы представлены в виде графиков на рис. 1, 2 и 6. На графиках (см. рис. 1 и 2) приведены следующие обозначения: ζ_g – расчетная ордината вертикальной качки; θ – расчетный угол крена при бортовой качке; t – время

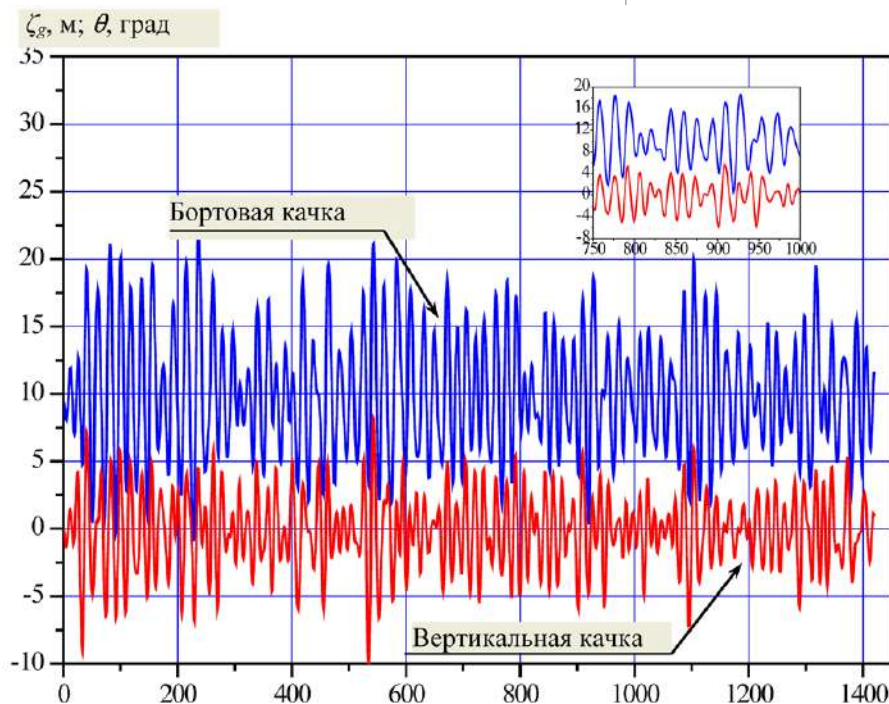


Рис. 1 Пример расчетных кривых качки поврежденной МЛТП на нерегулярном лаговом волнении 10-летней повторяемости

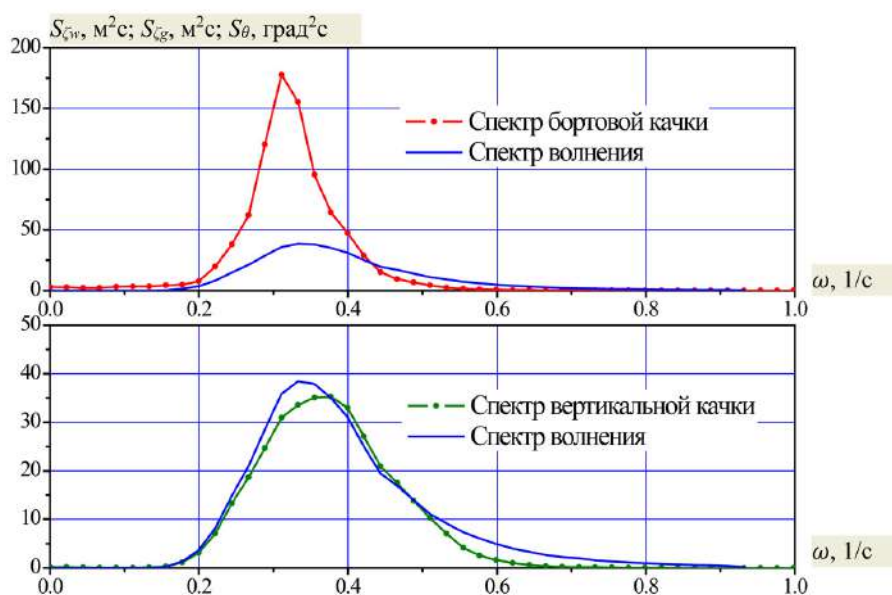


Рис. 2 Спектральные плотности качки поврежденной МЛТП на нерегулярном лаговом волнении 10-летней повторяемости

моделирования процесса; $S_{\zeta w}$, $S_{\zeta g}$, S_0 – ординаты спектральных плотностей волнения, вертикальной и бортовой качки; ω – частота образующих спектр процесса гармонических составляющих.

На рис. 3 показан пример моделирования наклоненного корпуса судна типа МЛТП в результате смещения его центра тяжести вследствие получения пробоины и заполнения внутреннего пространства водой. Моделирование наклоненных шпангоутных контуров производится в программе с учетом изменения водоизмещения поврежденного судна, а также возникающего при крене сопутствующего дифферента.

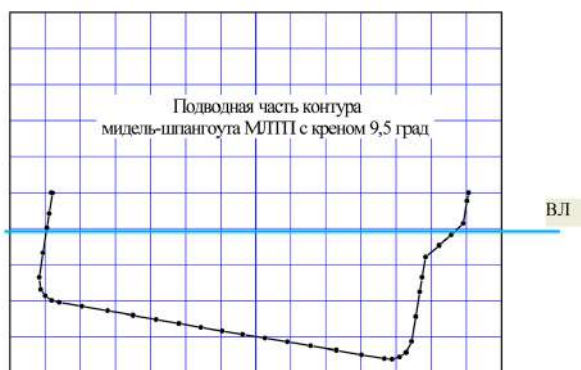


Рис. 3 Шпангоутный контур МЛТП со смещенным из диаметральной плоскости центром тяжести

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ВАЛИДАЦИЯ ПРОГРАММЫ РАСЧЕТА КАЧКИ ПОВРЕЖДЕННОГО ПЛАВУЧЕГО ОБЪЕКТА

Разработанная программа, как и всякая сложная компьютерная программа, нуждается в валидации. В качестве валидационной процедуры применительно к тестируемой программе использованы результаты экспериментальных исследований, выполненных в мореходном бассейне ФГУП «Крыловский государственный научный центр».

Для проведения испытаний использовалась модель МЛТП (см. рис. 4). Для исследования поведения на волнении поврежденной платформы модель была оборудована бортовым отсеком, не сообщаемым с остальным внутренним объемом модели. Геометрия и размеры отсека соответствовали параметрам двух смежных балластных цистерн и сухих отсеков правого борта натурной платформы, подвергшихся



Рис. 4 Общий вид модели МЛТП

разгерметизации в результате получения пробоины в районе поперечной водонепроницаемой переборки, разделяющей эти отсеки. В качестве сценария аварии МЛТП использовалась наиболее вероятная ситуация, при которой происходит столкновение судна снабжения ледокольного типа с платформой, в результате чего в борту платформы образуется пробоина характерного вида (см. рис. 5).

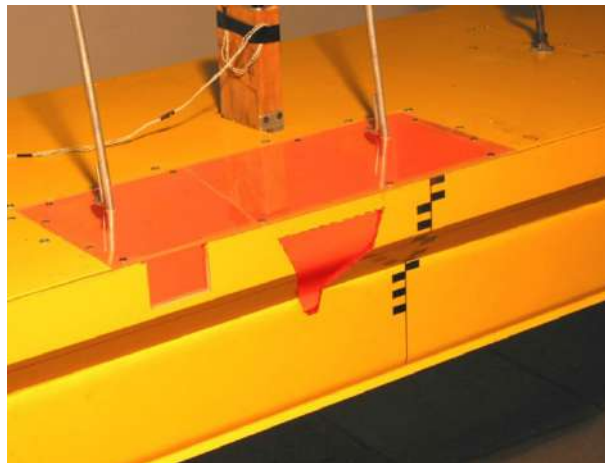


Рис. 5 Вид на отсек с пробоиной на модели МЛТП

Испытания на регулярном волнении проводились с целью определения амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) качки МЛТП. При испытаниях в условиях нерегулярного волнения моделировались три волновых спектра Пирсона-Московица, первый из которых соответствовал годовому шторму, второй – шторму 10-летней повторяемости и третий – шторму с повторяемостью один раз в 100 лет.

На рис. 6 представлены АЧХ поврежденной МЛТП при качке на лаговом волнении, полученные, с одной стороны, при проведении модельного эксперимента, а с другой – с помощью расчета по разработанной программе. АЧХ построены в функции длин волн λ_w (в масштабе натуре).

Как видно из рис. 6, программа, в целом, правильно прогнозирует характер АЧХ сравниваемых видов качки при воздействии волнения на поврежденную модель, характеризующую наличием статического угла крена и изменением характеристик нагрузки в результате получения пробоины.

В таблице в качестве примера представлены экспериментальные данные и результаты расчета основных видов качки поврежденной МЛТП на нерегулярном волнении с интенсивностью 10-летней повторяемости. Также приведены данные по относительной погрешности расчетов δ_U по отношению к результатам модельных испытаний.

При расчете демпфирующего момента бортовой качки в программе использовался экспериментально полученный коэффициент демпфирования, а влияние

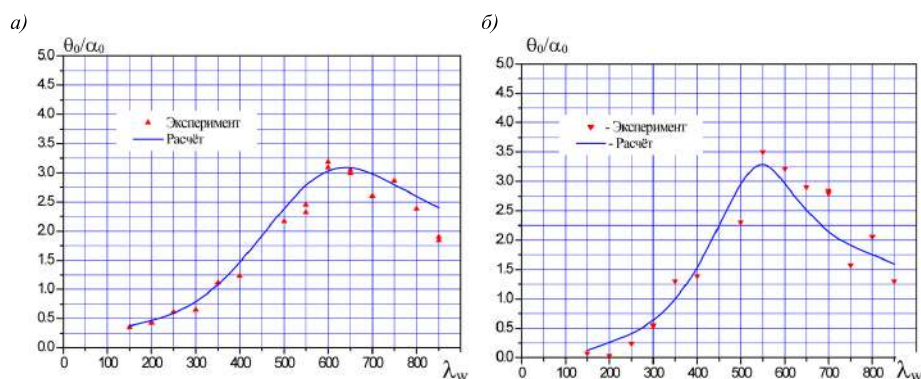


Рис. 6 АЧХ бортовой качки поврежденной МЛТП на лаговом волнении:
 а – пробоиной на волну; б – пробоиной по волне

**Параметры качки поврежденной МЛТП на лаговом нерегулярном волнении,
 соответствующем шторму десятилетней повторяемости**

Пробоина на волну			
Параметр качки	Данные		Погрешность δU , %
	экспериментальные	расчетные	
Амплитуда бортовой качки с обеспеченностью 1,1 %, град	10,0	10,69	6,9
Средний угол крена, град	9,69	10,0	3,2
Средний период бортовой качки, с	19,15	18,18	5,1
Амплитуда вертикальной качки с обеспеченностью 1,1 %, м	9,46	8,67	8,4
Средний период вертикальной качки судна, с	18,84	17,30	8,2
Пробоина по волне			
Амплитуда бортовой качки с обеспеченностью 1,1 %, град	12,50	12,58	0,7
Средний угол крена, град	9,64	10,13	5,1
Средний период бортовой качки, с	19,16	18,47	3,6
Амплитуда вертикальной качки с обеспеченностью 1,1 %, м	9,83	9,58	2,5
Средний период вертикальной качки судна, с	18,84	16,89	10,4

системы удержания модели в бассейне учитывалось введением в расчетный алгоритм программы дополнительного слагаемого к поперечно-горизонтальной силе.

Как видно из таблицы, относительная погрешность расчета амплитуды бортовой качки при штормовании судна с пробоиной в наветренном борту достигает величины $\delta_{\theta} \approx 7\%$ (выполненные систематические расчеты показали, что значение δ_{θ} может увеличиться в зависимости от условий плавания примерно до 10 %).

С целью обеспечения более точного прогноза амплитуд бортовой качки и, как следствие, оцениваемой динамической остойчивости в процессе борьбы за живучесть, применяемая в программе математическая модель должна корректироваться с учетом амплитуд нерегулярной бортовой качки, определенных путем непосредственного измерения бортовыми средствами сбора и обработки информации по внешним условиям и кинематике плавсредства. В качестве критерия согласия может рассматриваться минимальная разница между

расчетной и измеренной на предыдущей стадии аварии характерной амплитудой бортовой качки судна. Изменение расчетной величины амплитуды бортовых колебаний должно осуществляться за счет корректировки амплитудного значения экспериментальной части возмущающего момента, оказывающего доминирующее влияние на амплитудно-частотную характеристику нелинейной качки [7].

ВЫВОДЫ

Использование предлагаемого в статье метода прогноза качки поврежденного плавсредства для оценки его динамической остойчивости при разработке аппаратно-программных средств бортовых программных комплексов, устанавливаемых на объектах морской техники, позволит в штормовых условиях в режиме реального времени оценивать запасы остойчивости при развитии аварии или ликвидации ее последствий в рамках борьбы экипажа за живучесть.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Живица С.Г. Концепция бортовой программы по оценке динамической устойчивости аварийного морского объекта // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – 2015. – № 40/41.
2. Бородай И.К. и др. Мореходность судов и средств океанотехники. Методы оценки: монография / ФГУП «Крыловский государственный научный центр», СПб. – 2013.
3. Живица С.Г., Семенова В.Ю. Практический способ определения гидродинамических характеристик качки наклоненного судна // Труды Крыловского государственного научного центра. – СПб. – 2015.
4. Rakhmanin N., Zhivitsa S. Prediction of Motion of Ships with Flooded Compartments in a Seaway // Int. Conf. on Stability of Ships and Ocean Vehicles, STAB'94, Melbourne, USA, 1994.
5. Ремез Ю.В. Качка корабля. – Л.: Судостроение, 1983.
6. Благовещенский С.Н. Качка корабля. – Л.: Судпромгиз, 1954.
7. Михненко В.В. Исследование чувствительности характеристик боковой качки к вариациям параметров судна // Автореферат дис. на соискание уч. степ. канд. техн. наук, НКИ, Николаев, 1979.

ОБОЗРЕНИЕ:
ЮБИЛЕЙ БАЛТИЙСКОГО ЗАВОДА

26 мая 2016 г. Балтийский завод отметил свой 160-летний юбилей.

Балтийский завод был основан (1856 г.) для поддержки реорганизации военно-морского флота России и начал с оборудования кораблей паровыми машинами и постройки первых металлических кораблей. За короткое время завод стал ведущим предприятием отрасли, перешел от частных заказов к выполнению государственных программ судостроения и был включен в систему морского ведомства.

За 160 лет существования со стапелей петербургской судовой верфи сошли более 560 кораблей

и судов, в том числе с атомными и дизельными силовыми установками. На Балтийском заводе были построены такие знаменитые корабли, как атомный крейсер «Петр Великий», не имеющий аналогов в мире, атомный ледокол «Арктика», первым достигнувший Северного полюса, флагман советской Службы космических исследований научно-исследовательское судно «Космонавт Юрий Гагарин» и многие другие уникальные и высокотехнологичные суда.

Сегодня предприятие специализируется на строительстве военных кораблей, крупнотоннажных гражданских

судов для перевозки различных грузов и ледоколов (с ядерными энергетическими установками и дизельных), грузопассажирских судов типа ро-ро и Ro-Pax, химических танкеров, балкеров и др.

Балтийский завод обладает производственными мощностями и современным оборудованием для постройки судов и кораблей полного цикла. Благодаря развитому металлургическому и машиностроительному производству завод самостоятельно выпускает комплектующие изделия для кораблей и судов, значительно снижая себестоимость их постройки.

АО «СЕВЕРНОЕ ПКБ» ОТМЕТИЛО 70-ЛЕТНИЙ ЮБИЛЕЙ

В 2016 г. АО «Северное проектно-конструкторское бюро» отпраздновало свое 70-летие, и весь этот срок предприятие успешно решало и продолжает решать поставленные перед ним задачи.

Значимым его достижением является создание кораблей третьего поколения: тяжелого атомного ракетного крейсера «Петр Великий», большого противолодочного корабля «Адмирал Чабаненко».

За свою 70-летнюю историю Северное ПКБ накопило огромный опыт по проектированию надводных кораблей практически всех классов и любого водоизмещения. Коллектив бюро имеет высокую квалификацию, большое внимание уделяется привлечению и подготовке молодых специалистов.

Высокий научно-технический потенциал, современная производственная база, налаженные

связи с ведущими научно-техническими центрами и судостроительными компаниями позволяют бюро создавать высокотехнологичные, наукоемкие и конкурентоспособные образцы военной техники в области кораблестроения, а также оперативно реагировать на требования времени и потребности как Военно-Морского флота России, так и флотов иностранных государств.



МАТЕРИАЛЫ И СВАРКА

УДК 621.791.052

ДЕФОРМИРУЕМЫЕ АЛЮМИНИЕВО-МАГНИЕВЫЕ СПЛАВЫ И СВАРНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ ДЛЯ КОНСТРУКЦИЙ СИСТЕМ ХРАНЕНИЯ ГРУЗА ГАЗОВОЗОВ

В.К. Башаев, ФАУ «Российский морской регистр судоходства», Санкт-Петербург
В.И. Павлова, ФГУП «ЦНИИ КМ «Прометей», Санкт-Петербург
Е.П. Осокин, ФГУП «ЦНИИ КМ «Прометей», Санкт-Петербург
С.А. Зыков, ФГУП «ЦНИИ КМ «Прометей», Санкт-Петербург
А.М. Дриц, ЗАО «Алкоа СМЗ», Самара

Проведены исследования свойств деформируемых алюминиевых сплавов марок 1550 и 1565ч и их сварных соединений при комнатной и криогенных температурах (исходя из основных условий эксплуатации сварных грузовых емкостей судов-газовозов). Установлено, что сплавы марок 1550 и 1565ч в отожженном состоянии удовлетворяют требованиям Регистра и могут быть перспективными импортозамещающими российскими конструкционными материалами для изготовления сварных конструкций систем хранения груза газозовов.

***Ключевые слова:** деформируемые алюминиевые сплавы, сварные соединения, свойства, криогенные температуры.*

DEFORMED ALUMINUM-MAGNESIUM ALLOYS AND WELDS FOR CARGO CONTAINMENT SYSTEM STRUCTURES OF GAS CARRIERS

V.K. Bashaev, FAI "Russian Maritime Register of Shipping", St. Petersburg
B.I. Pavlova, FSUE Central Research Institute of Structural Materials "PROMETEY", St. Petersburg
E.P. Osokin, FSUE CRISM "Prometey", St. Petersburg
S.A. Zykov, FSUE CRISM "Prometey", St. Petersburg
A.M. Drits, CJSC Alcoa SMZ, Samara

Studies of the properties of deformed aluminium alloy grades 1550 and 1565 and their welded joints have been carried out at room and cryogenic temperatures (based on the key operation conditions of gas carriers' welded cargo spaces). The annealed alloy grades 1550 and 1565 (in the annealed condition) have been found to satisfy the requirements of the Register and they may be challenging Russian import-substituting structural materials for the manufacture of welded structures of gas carriers' welded cargo spaces.

***Keywords:** deformed aluminium alloys, welds, properties, cryogenic temperatures.*

ВВЕДЕНИЕ

К сварным конструкциям, эксплуатирующимся при криогенных температурах (0 – 120 К), относятся сосуды давления, детали и узлы летательных аппаратов, трубопроводы, корпуса высоковакуумных камер, а также емкости для хранения и перевозки сжиженного природного газа (СПГ).

Грузовые емкости для перевозки СПГ работают в условиях воздействия криогенной температуры и различных нагрузок: статических, обусловленных полезным весом груза; циклических, динамических, повторно-переменных усилий, возникающих при заполнении и разгрузке емкостей, а также от влияния внешних факторов – волнения на море, швартовки и пр. СПГ перевозится при атмосферном давлении и температуре сжиженного газа (–165 °С).

Конструкционные материалы для грузовых емкостей, контактирующие с СПГ, должны обладать высокой прочностью и не охрупчиваться при криогенных температурах. Этим требованиям отвечают нержавеющая сталь, сплав на основе железа с содержанием никеля 36 % и алюминиевые сплавы.

Анализ существующих конструкций, материалов и технологий, применяемых для изготовления грузовых емкостей газозовозов, разработка альтернативных конструктивно-технологических решений выполнены ФГУП «Крыловский государственный научный центр» совместно с АО «Центр технологии судостроения и судоремонта» («ЦТСС») и ООО ПКБ «Петробалт» [1].

Сравнительный анализ массогабаритных характеристик при изготовлении вкладки цилиндрической емкости из стали и алюминия позволил авторам сделать заключение о возможном снижении ее веса в 1,5 раза, а также улучшении технологичности и уменьшении стоимости работ при использовании алюминий-магниевого сплава марки 1561 (АМг61) в сравнении с материалом из нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т [1].

Алюминиевые сплавы благодаря кристаллическому строению – гранцентрированной кубической решетке (ГЦК) и отсутствию полиморфных превращений способны выдерживать температуры ниже 77 К без деградации прочностных, коррозионных и пластических свойств, так как не имеют порога хладноломкости, сопровождающегося переходом из вязкого состояния в хрупкое [2].

Значительная часть судов-газовозов, из эксплуатирующихся в настоящее время, имеет вкладки грузовые емкости сферической формы типа MOSS, изготовленные из алюминий-магниевого сплава марки 5083 в отожженном состоянии. Сплав 5083 признан МАКО в качестве конструкционного материала криогенного применения.

Издание 2015 г. Правил классификации и постройки морских судов Российского морского

регистра судоходства (РС) содержит в части XIII «Материалы» новый разд. 10 «Материалы, используемые в системах хранения грузов газозовозов», в котором допущены к использованию деформируемые алюминиевые сплавы 1550, 1565ч, 5083 [3].

Деформируемые термически неупрочняемые алюминий-магниевого сплавы средней прочности 5083, 1550, 1561 нашли широкое применение в отечественном судостроении.

Алюминиевые сплавы 1550 и 5083 относятся к классу свариваемых деформируемых термически неупрочняемых алюминий-магниевого сплавов средней прочности, которым в отожженном состоянии свойственны высокие показатели пластичности и коррозионной стойкости. Эти сплавы характеризуются свойствами: временное сопротивление $R_m \geq 275$ МПа; предел текучести $R_{p0,2} \geq 125$ МПа, относительное удлинение $\delta \geq 15$ %.

Алюминий-магний-сплав 1565ч также относится к свариваемым термически неупрочняемым сплавам со свойствами в отожженном состоянии при комнатной температуре, превышающими на 20 – 25 % характеристики сплавов 5083 и 1550: временное сопротивление $R_m \geq 335$ МПа; предел текучести $R_{p0,2} \geq 170$ МПа, относительное удлинение $\delta \geq 15$ % и удовлетворяет основным условиям пригодности материала для использования при низких и криогенных температурах [4].

Низкотемпературное упрочнение алюминий-магний-сплавов при криогенной температуре может составлять до 45 %.

Сварные соединения деформируемых алюминий-магний-сплавов 5083 и 1550, применяемых в конструкциях морского назначения, должны обеспечивать временное сопротивление не ниже 275 МПа, т.е. на уровне гарантированной прочности основного металла. Прочность сварных соединений сплава 1565 ч, по аналогии со сплавом 1561, относящимся к той же категории прочности, должна обеспечиваться не ниже 305 МПа, т.е. не ниже 0,9 от гарантированной прочности основного металла.

Деформируемые алюминий-магний-сплавы 1550, 1565ч и 5083 допущены РС к применению в системах хранения груза газозовозов [3] и должны отвечать требованиям согласованной с РС технической документации. При этом химический состав и механические свойства, состояние поставки, отбор проб и объем испытаний сплавов, сварочные материалы и технология сварки должны соответствовать требованиям РС.

Для успешного использования национальных алюминий-магний-сплавов 1550 и 1565ч в строительстве газозовозов ФГУП «ЦНИИ КМ «Прометей» выполнен комплекс работ, обосновывающий возможность и эффективность их применения и направленный на

разработку требований к деформируемым алюминиевым сплавам 1550 и 1565ч. Также выполнены работы по установлению требований к сварочным материалам и сварным соединениям, по разработке технологии сварки алюминиевых сплавов 1550 и 1565ч для конструкций систем хранения груза газозовозов.

Основные требования к полуфабрикатам из деформированных алюминиевых сплавов для судовых корпусных конструкций и их сварным соединениям [5] могут быть применены к сплавам 1550, 1565ч, 5083 в отожженном состоянии для конструкций систем хранения груза газозовозов. При этом должны быть выполнены:

- для основного металла:

испытания растяжением образцов при комнатной температуре с установлением уровня механических свойств материала по пределу текучести $R_{p0,2}$, min, временному сопротивлению R_m , min и относительному удлинению δ на соответствие требований изготовителя и РС;

- для сварных соединений:

испытания стыковых соединений растяжением образцов при комнатной температуре с установлением временного сопротивления R_m , min и статическим изгибом образцов с поперечным швом до параллельности сторон.

Испытания образцов основного металла и сварных соединений при криогенной температуре и на ударную вязкость не требуются.

Целью работы является установление уровня механических свойств алюминиево-магниевого сплавов 1550 и 1565ч и их сварных соединений при комнатной и криогенных температурах для подтверждения соответствия требованиям РС к деформируемым алюминиевым сплавам, применяемым в конструкциях систем хранения груза газозовозов.

1. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве материала для исследования использованы горячекатаные листы и плиты в отожженном состоянии толщиной 5, 10 и 40 мм из алюминиево-магниевого сплавов 1565ч и 1550 опытно-промышленных партий, изготовленных ЗАО «Алкоа Металлург РУС» и ЗАО «Алкоа СМЗ».

Химический состав алюминиевых сплавов исследуемых марок соответствует требованиям

(табл. 1), разработанным для включения в правила РС (гл. 5.1 части XIII «Материалы») [3].

Сварные стыковые пробы из сплавов 1550 и 1565ч изготовлены в производственных условиях ФГУП «ЦНИИ КМ «Прометей» ручной аргонодуговой сваркой (АрДС) неплавящимся электродом на установке FALTIG-400 AC/DC и полуавтоматической импульсно-дуговой сваркой плавящимся электродом (ИДСПЭ) на установке Multi 500KW с применением присадочных проволок марок СвАМг5 и СвАМг61.

В качестве неплавящегося электрода при АрДС использованы вольфрамовые прутки марки ЭВЧ по ГОСТ 23949-80 диаметром 5 мм. Защитный газ – аргон высшего сорта по ГОСТ 10157-79.

Экспериментальные методы исследования включали следующие испытания при комнатной и криогенных температурах стандартных и специальных образцов на испытательном оборудовании ФГУП «ЦНИИ КМ «Прометей» и ФГУП «Крыловский государственный научный центр» [6]:

- испытания при температуре 293 К:

изгиб при статическом нагружении образцов с поперечным швом (ГОСТ 6996-66, тип XXVII) на машине Р-5, диаметр оправки – шесть толщин образца;

усталостные испытания образцов основного металла и сварных соединений (ГОСТ 25.502, тип 3 и 4) на циклическое растяжение при несимметричном цикле изменения нагрузки с коэффициентом асимметрии цикла r в пределах от 0,1 до 0,2 и частотой нагружения 10 Гц на воздухе. Оборудование – машины МУП-20 и МУП-50;

- испытания при температурах 77 К, 108 К, 203 К и 293 К:

статическое растяжение плоских образцов основного металла и сварных соединений (ГОСТ 6996-66, тип XIIIa) на машине Instron 5585HJ;

ударный изгиб образцов (ГОСТ 6996-66, тип VII) с U-образным надрезом по основному металлу, металлу зоны термического влияния (ЗТВ), зоны сплавления и шва на копке 2130KM-03;

- испытания на трещиностойкость образцов (ГОСТ 25.506-85, тип 4):

основного металла и сварных соединений толщиной 40 мм (нарезы по металлу шва (Ш), границе сплавления (ГС) и ЗТВ) при температурах 293 К и 108 К на машине МУП-20. Сварные образцы изготовлены ФГУП «ЦНИИ КМ «Прометей» по

Таблица 1

Требования РС, предъявляемые к химическому составу, %, алюминиевых сплавов

Марка сплава	Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Zr	Ni	Прочие элементы	
												Каждый	Общее
1550	Осн.	≤0,5	≤0,5	≤0,1	0,30 – 0,80	4,8 – 5,8	–	≤0,2	≤0,1	–	–	≤0,05	≤0,15
1565ч	Осн.	≤0,2	≤0,3	0,05 – 0,1	0,4 – 1,2	5,1 – 6,2	0,05 – 0,25	0,45 – 1,0	≤0,1	0,08 – 0,13	0,05	≤0,05	≤0,15

разработанной технологии импульсно-дуговой сварки плавящимся электродом.

Экспериментально полученные результаты значений механических свойств основного металла и сварных соединений подвергнуты экспертизе на соответствие требований РС (разд. 5 части XIII «Материалы», гл. 4.9 и разд. 7 части XIV «Сварка» правил [3]).

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Основной металл (ОМ). Фактические значения механических свойств листов из сплавов 1550 и 1565ч в отожженном состоянии толщиной 5 и 10 мм приведены в табл. 2.

Полученные результаты при растяжении плоских образцов, вырезанных из проката алюминиевых сплавов 1550 и 1565ч в отожженном состоянии толщиной 5 и 10 мм, испытанных при комнатной температуре, позволили установить минимальные уровни механических свойств $R_{p0,2}$, R_m , и δ , которые соответствуют требованиям НТД изготовителя и РС.

Прочность сварных соединений алюминиевых сплавов 1550 и 1565ч установлена по результатам испытаний на статическое растяжение образцов с выпуклостью сварного шва при комнатной температуре (293 К), выполненных АрДС. Минимальные значения R_m соответствует требованиям РС (табл. 3).

Разрушение сварных соединений обоих сплавов, выполненных АрДС, происходит по ОМ (см. рис. 1).

По результатам испытаний на растяжение выполнена оценка прочностных свойств основного металла 1550 и 1565ч в отожженном состоянии и сварных соединений в зависимости от типа образца и температуры испытаний (см. рис. 2).

Достижимый уровень статической прочности сварных соединений исследуемых сплавов 1550 и 1565ч в отожженном состоянии, выполненных АрДС с применением присадочной проволоки марки СвАМг5 и СвАМг61 соответственно, определяется механическими свойствами свариваемых сплавов и присадочного металла.

Прочность сварных соединений обоих сплавов при криогенной температуре не ниже прочности при комнатной температуре. Такая закономерность является важным обстоятельством, так как заданные расчетные напряжения назначаются по прочностным характеристикам, полученным при комнатной температуре, т. е. повышение прочности с понижением температуры не учитывается и фактически идет в запас.

Коэффициент прочности сварных соединений сплавов 1550 и 1565ч для образцов с выпуклостью сварного шва составляет 0,98, для образцов со снятой выпуклостью сварного шва – 0,92 от фактической прочности основного металла при комнатной температуре.

Таблица 2

Механические свойства проката алюминиево-магниевого сплава 1550 и 1565ч в отожженном состоянии

Толщина, мм	Марка сплава и состояние поставки	Требования РС			Фактические свойства					
		Временное сопротивление R_m , МПа	Предел текучести $R_{p0,2}$, МПа	Относительное удлинение δ , %	Временное сопротивление R_m , МПа		Предел текучести $R_{p0,2}$, МПа		Относительное удлинение δ ,	
					мин.	макс	мин.	макс	%	макс
5	1550М	275	125	15	312	315	143	145	23,8	24,3
10	1550М	275	125	15	324	326	148	150	27,6	29,6
5	1565чМ	335	185	15	368	371	213	216	19,4	21,0
10	1565чМ	335	185	15	366	370	211	216	19,1	20,5

Таблица 3

Временное сопротивление образцов сварных соединений алюминиево-магниевого сплава

Толщина, мм	Марка сплава и состояние поставки	Требования РС			Фактические свойства			
		Временное сопротивление R_m , МПа	Испытание на статический изгиб		Временное сопротивление R_m , МПа		Испытание на статический изгиб	
			Диаметр оправки D	Угол загиба, град.	мин.	макс.	Диаметр оправки D , мм	Угол загиба, град.
5	1550М	275	6t	180	303	311	30	180
10	1550М	275	6t	180	315	325	60	180
5	1565чМ	305	6t	180	360	367	30	180
10	1565чМ	305	6t	180	340	357	60	180

t – толщина образца, мм

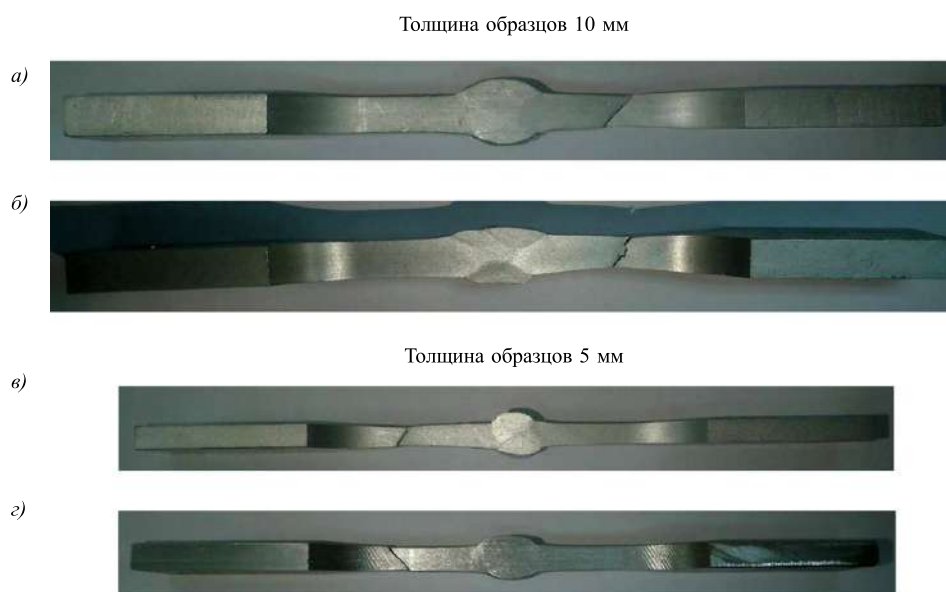


Рис. 1 Характер разрушения сварных образцов с выпуклостью сварного шва сплавов 1550 (а, в) и 1565 (б, г), испытанных при температуре 293 К

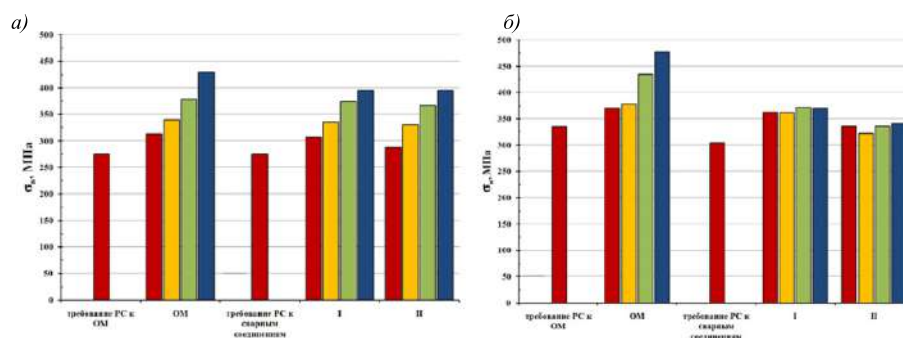


Рис. 2 Временное сопротивление алюминиевых сплавов ОМ и их сварных соединений толщиной 5 мм:
а – сплав 1550М; б – сплав 1565М;

I – с выпуклостью сварного шва; II – со снятой выпуклостью сварного шва в зависимости от температуры испытаний
(■ – 293 К; ■ – 203 К; ■ – 108 К; ■ – 77 К)

Полученные экспериментальные результаты показали, что сварные соединения сплава 1550 с понижением температуры испытаний претерпевают низкотемпературное упрочнение, аналогичное ОМ: прирост прочности при 77 К составляет 33 % (см. рис. 2, а).

Прочность сварных соединений сплава 1565ч с понижением температуры испытаний практически не изменяется, в отличие от ОМ, у которого наблюдается повышение прочности при 77 К на 30 % (см. рис. 2, б).

Характер разрушения сварных соединений исследуемых сплавов, испытанных при температурах 293 К и 203 К, однотипен: для образцов с выпуклостью сварного шва – по ЗТВ, для образцов со снятой выпуклостью сварного шва – по металлу шва или зоны сплавления (рис. 3, а, б).

Разрушение сварных соединений обоих сплавов при температурах 108 К и 77 К происходит в области зоны сплавления и металла шва (см. рис. 3, в, г). Данное обстоятельство показывает, что прочность сварных соединений при низких температурах лимитируется прочностными возможностями металла шва при этих температурах.

Изгиб при статическом нагружении сварных образцов выполнен на заданных оправках, до параллельности сторон (см. рис. 4), что соответствует требованиям РС.

Испытания на ударный изгиб проведены на образцах с U-образным надрезом в различных зонах сварного соединения: металл шва (Ш), зона сплавления (ЗС), зона термического влияния (ЗТВ) и основной металл (ОМ) при температурах 108 К и 293 К.

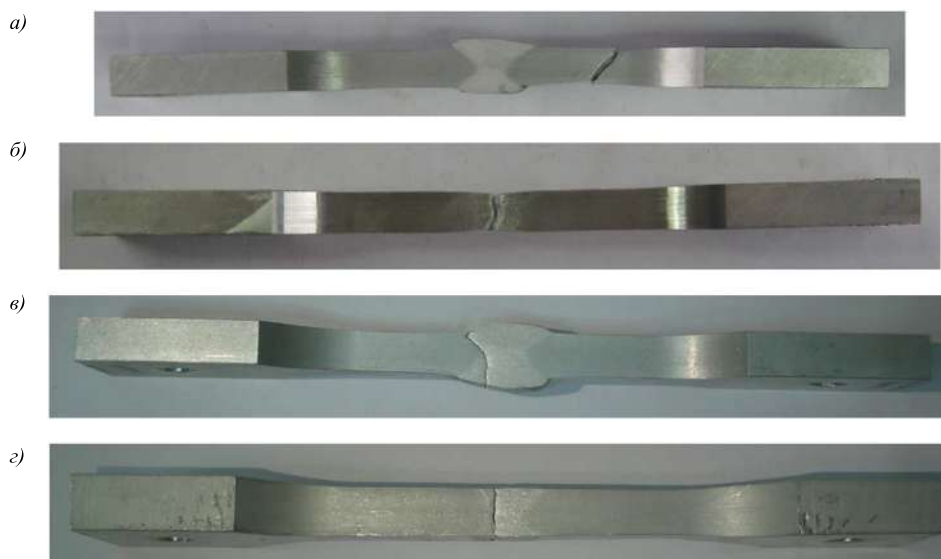


Рис. 3 Характер разрушения сварных образцов сплава 1565ч толщиной 10 мм, испытанных при температуре 293 К (а, б) и 77 К (в, з)



Рис. 4 Образцы сварных соединений алюминиево-магниевого сплава 1565ч: а – толщина 5 мм; б – толщина 10 мм

Характер изменения ударной вязкости в зависимости от температуры испытаний (см. рис. 5) не имеет принципиальных отличий для металла различных

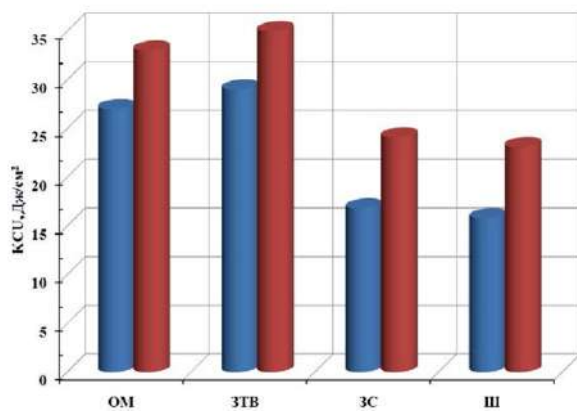


Рис. 5 Характер изменения ударной вязкости металла различных участков сварных соединений алюминиевого сплава 1550 толщиной 5 мм в зависимости от температуры испытаний: 108 К (●); 293 К (●)

участков сварного соединения исследуемых сплавов, включая основной металл. Ударная вязкость монотонно снижается с понижением температуры испытаний на всех исследованных участках сварного соединения, включая и ОМ.

Сварные соединения обоих сплавов имеют общую закономерность изменения ударной вязкости в зависимости от места расположения исследуемой зоны и температуры испытаний, заключающуюся в монотонном снижении величины ударной вязкости при криогенной температуре испытаний на 40 – 50 %, оставаясь при этом на относительно высоком уровне.

Морфология изломов образцов как из сплава 1550, так и из сплава 1565ч имеет ямочное строение, типичное при вязком разрушении в результате пластической деформации (см. рис. 6).

Усталостные испытания образцов основного металла и сварных соединений сплавов 1550 и 1565ч толщиной 10 мм проведены в лаборатории испытаний прочности и ресурса натурных конструкций ФГУП «Крыловский государственный научный центр» [6].

Долговечность образца до разрушения располагалась в диапазоне от 104 до 106 циклов.

Полученные результаты испытаний были приведены к одинаковому циклу нагружения с коэффициентом асимметрии $r=0,1$. Пересчет выполнялся на основании соотношения Гудмана, являющегося условием эквивалентности усталостного повреждения при различных параметрах циклического нагружения.

Полученные усталостные кривые для сплавов 1550 и 1565ч толщиной 10 мм и их сварных соединений приведены на рис. 7.

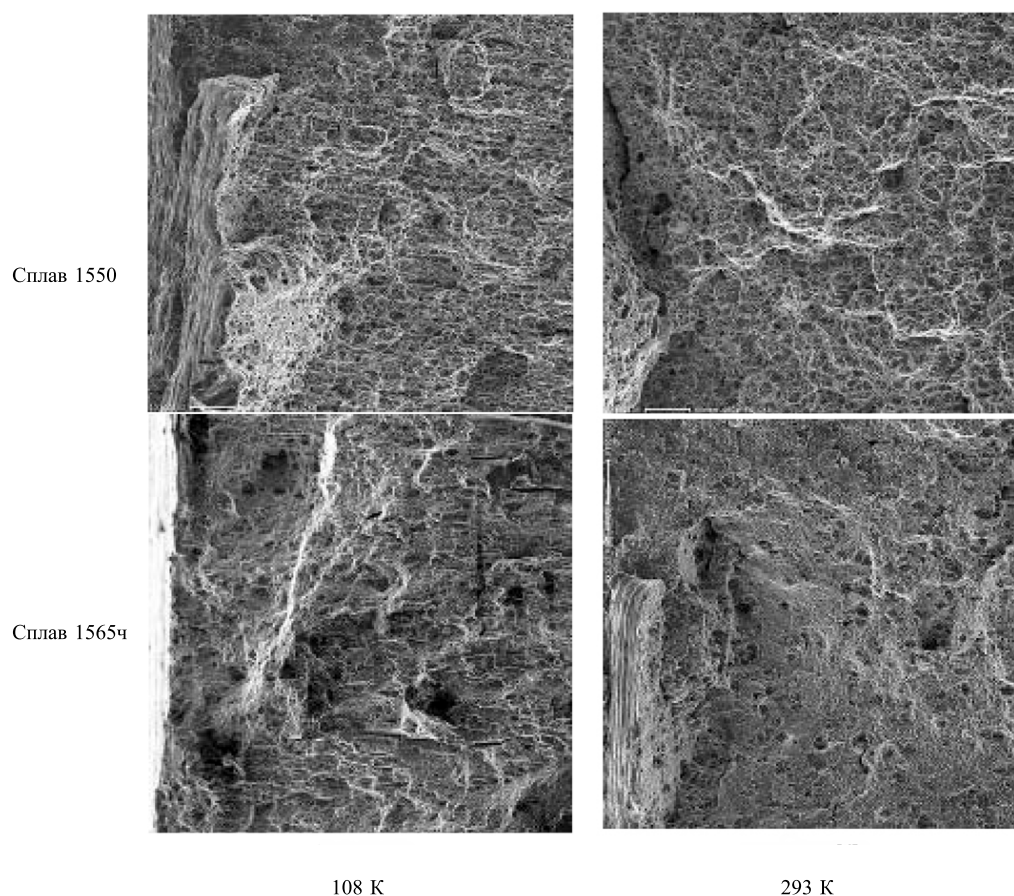


Рис. 6 Фрактограммы изломов ($\times 500$) образцов основного металла толщиной 5 мм после испытаний на ударный изгиб

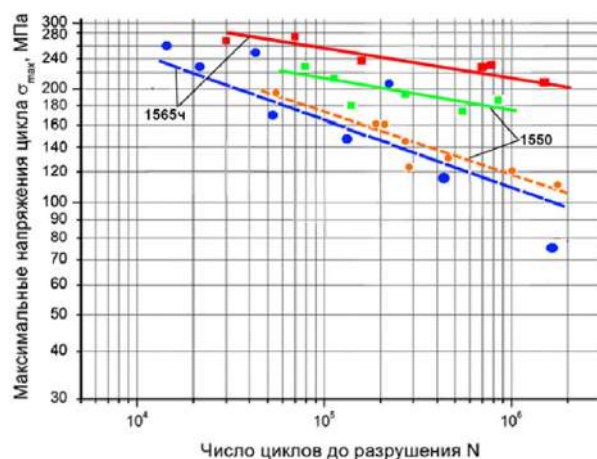


Рис. 7 Усталостные кривые образцов основного металла толщиной 10 мм сплавов 1550 и 1565 и их сварных соединений:

■ – основной металл; ● – сварные соединения)

Анализ показывает, что усталостные характеристики основного металла при одинаковых условиях нагружения зависят от марки сплава, в частности предел ограниченной выносливости сплава марки 1565 выше, чем у сплава марки 1550, что на базе 10^6 циклов составляет 10 – 15%. В то же время для

сварных соединений обоих сплавов характерен большой разброс результатов испытаний по сравнению с основным металлом, поэтому различия усталостных кривых выражены слабо.

Анализ характера разрушений сварных образцов (см. рис. 8) обоих сплавов показывает, что зарождение усталостных трещин происходит, как правило, на границе перехода усиления шва к основному металлу, т.е. качество и состояние металла поверхностного слоя определяют уровень характеристик усталостной прочности.

Характеристики трещиностойкости (вязкости разрушения) металла различных зон сварных соединений алюминиевых сплавов 1550 и 1565 определены испытаниями надрезных образцов при статическом нагружении по схеме трехточечного изгиба на воздухе.

Испытания образцов и обработка экспериментальных результатов проведены в лаборатории и по методике ФГУП «Крыловский государственный научный центр».

Диаграммы P (нагрузка) – δ (раскрытие трещины) в зависимости от марки сплава, места надреза и температуры испытаний представлены на рис. 9; расчетные значения параметров, характеризующих трещиностойкость, приведены в табл. 4 и 5.

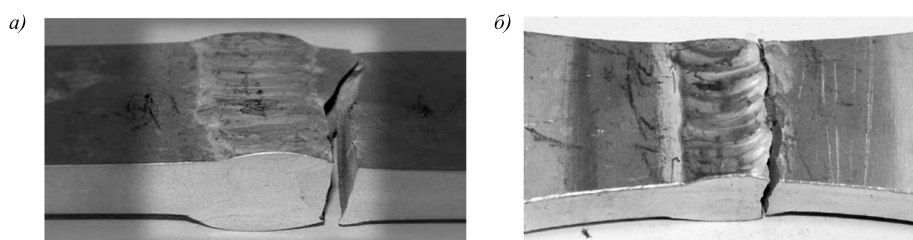


Рис. 8 Характер разрушения образцов сварных стыковых соединений толщиной 10 мм после усталостных испытаний:
а – сплав марки 1550; б – сплав марки 1565ч

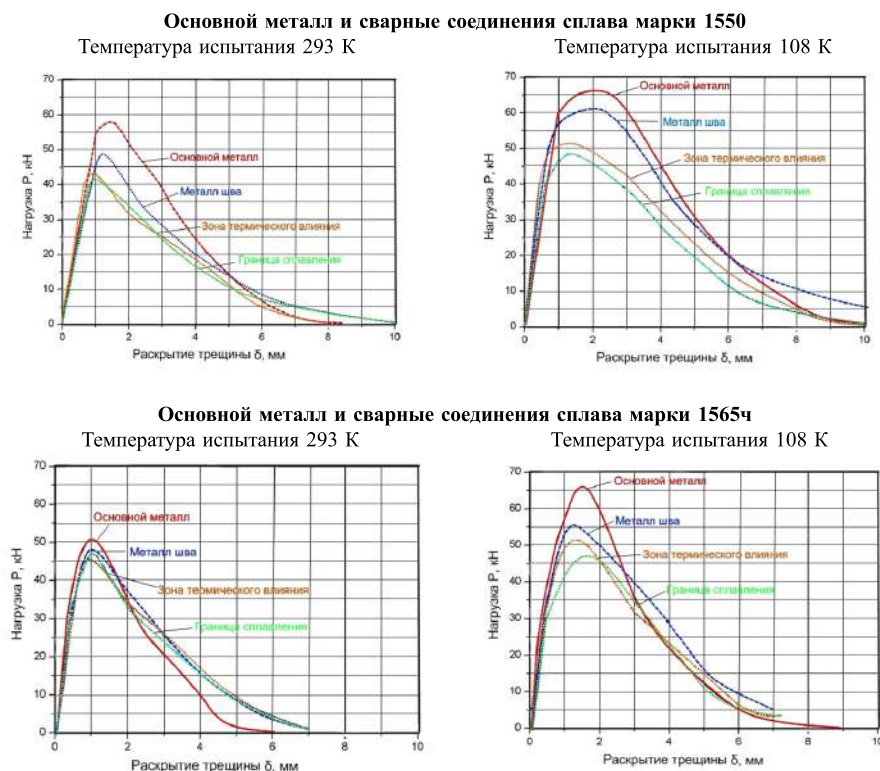


Рис. 9 Диаграммы нагрузка – раскрытие трещины ($P - \delta$) основного металла, металла шва, зоны сплавления и зоны термического влияния сварных соединений сплавов 1550 и 1565ч

Таблица 4

Параметры K_{IC} , CTOD и J_C , вычисленные по результатам испытаний на трещиностойкость основного металла и сварных образцов из алюминиево-магниевого сплава 1550 толщиной 40 мм при температурах 293 К и 108 К

Положение надреза	Вязкость разрушения K_{IC} , Н/мм ^{3/2}		Критическое раскрытие трещины δ_C (CTOD), мм		Критические значения J_C , Н/мм	
	293 К	108 К	293 К	108 К	293 К	108 К
Основной металл	$\frac{954 - 1121}{1055}$	$\frac{927 - 1267}{1081}$	$\frac{0,26 - 0,38}{0,34}$	$\frac{0,44 - 0,60}{0,51}$	$\frac{57,6 - 101,8}{83,6}$	$\frac{118,4 - 143,8}{130,8}$
Центр шва	$\frac{816 - 1116}{900}$	$\frac{836 - 1183}{959}$	$\frac{0,15 - 0,17}{0,16}$	$\frac{0,49 - 0,55}{0,52}$	$\frac{30,6 - 62,7}{47,4}$	$\frac{117,2 - 148,1}{128,7}$
ЗТВ	$\frac{775 - 839}{809}$	$\frac{799 - 849}{814}$	$\frac{0,14 - 0,16}{0,15}$	$\frac{0,31 - 0,34}{0,32}$	$\frac{30,2 - 34,7}{32,3}$	$\frac{56,4 - 70,7}{63,5}$
Граница сплавления	$\frac{791 - 981}{896}$	$\frac{798 - 989}{882}$	$\frac{0,16 - 0,28}{0,21}$	$\frac{0,24 - 0,42}{0,30}$	$\frac{36,2 - 52,4}{43,1}$	$\frac{46,9 - 85,8}{61,4}$

Таблица 5

Параметры K_{IC} , CTOD и J_C , вычисленные по результатам испытаний на трещиностойкость основного металла и сварных образцов из алюминиево-магниевого сплава марки 1565ч толщиной 40 мм при температурах 293 К и 108 К

Положение надреза	Вязкость разрушения K_{IC} , Н/мм ^{3/2}		Критическое раскрытие трещины δ_C (CTOD), мм		Критические значения J_C , Н/мм	
	293 К	108 К	293 К	108 К	293 К	108 К
Основной металл	$\frac{1175 - 1379}{1270}$	$\frac{873 - 1414}{1114}$	$\frac{0,13 - 0,19}{0,16}$	$\frac{0,23 - 0,27}{0,26}$	$\frac{43,9 - 58,7}{51,1}$	$\frac{62,2 - 78,3}{75,6}$
Центр шва	$\frac{1106 - 1194}{1159}$	$\frac{1205 - 1307}{1220}$	$\frac{0,21 - 0,25}{0,24}$	$\frac{0,21 - 0,30}{0,27}$	$\frac{62,6 - 69,1}{66,9}$	$\frac{59,7 - 97,7}{79,3}$
ЗТВ	$\frac{1060 - 1217}{1164}$	$\frac{791 - 1228}{982}$	$\frac{0,18 - 0,18}{0,18}$	$\frac{0,24 - 0,29}{0,27}$	$\frac{51,0 - 61,6}{55,0}$	$\frac{68,3 - 81,1}{74,3}$
Граница сплавления	$\frac{1060 - 1175}{1125}$	$\frac{840 - 1281}{1121}$	$\frac{0,18 - 0,23}{0,20}$	$\frac{0,24 - 0,38}{0,29}$	$\frac{57,7 - 61,7}{60,1}$	$\frac{68,2 - 96,2}{81,6}$

Результаты испытаний показывают, что трещиностойкость всех исследованных образцов при снижении температуры не ниже, чем при комнатной температуре. При криогенной температуре испытаний наблюдается рост параметров трещиностойкости (δ_C и J_C), как для основного металла алюминиевых сплавов 1550 и 1565ч, так и во всех зонах сварных соединений.

Трещиностойкость основного металла сплава 1550 как при комнатной, так и при криогенной температуре испытаний несколько выше, чем трещиностойкость основного металла сплава 1565ч.

Трещиностойкость металла различных зон сварных соединений обоих сплавов ниже, чем у основного металла, как при комнатной температуре, так и при криогенной.

Для сварных соединений сплава 1565ч средние значения параметров трещиностойкости (δ_C и J_C) при температуре 293 К выше, чем у основного металла. При температуре 108 К эти значения во всех зонах сварных соединений находятся практически на одном уровне (см. табл. 5).

ВЫВОДЫ

В результате исследования деформируемых алюминиевых сплавов марок 1550 и 1565ч в отожженном состоянии и их сварных соединений, выполненных дуговыми способами сварки с использованием соответствующих сплавов категорий присадочного материала (СвАМг5 и СвАМг61) установлено, что при криогенной температуре

уровень механических и пластических свойств основного металла и сварных соединений не ниже, чем при комнатной температуре, и удовлетворяет требованиям РС к деформируемым алюминиевым сплавам, применяемым в конструкциях систем хранения груза газозовозов.

Сплавы 1550 и 1565ч удовлетворяют требованиям РС и являются перспективными импортозамещающими российскими конструкционными материалами, применяемыми для изготовления сварных конструкций систем хранения груза газозовозов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ФЦП «Развитие гражданской морской техники» на 2009 – 2016 гг. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://rgmt.spb.ru>
2. Солнцев Ю. П., Ермаков Б. С., Слепцов О. И. Материалы для низких и криогенных температур // Энциклопедический справочник / СПб.: ХИМИЗДАТ, 2008. – 768 с.
3. Правила классификации и постройки морских судов. – СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2015.
4. Орыщенко А.С., Осокин Е.П., Барахтина Н.Н., Дриц А.М., Соседков С.М. Алюминиево-магниевый сплав 1565ч для криогенного применения // Цветные металлы. – 2012. – № 11. – С. 84–90.
5. Правила классификации и постройки судов для перевозки сжиженных газов наливом. Правила классификации и постройки судов для перевозки сжатого природного газа. – СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2012.
6. Булгаков А. А., Кноринг С. Д., Крыжевич Г. Б., Шапошников В. М. Исследование усталостной прочности новых алюминиево-магниевых сплавов марок 1550М и 1565чМ // Труды Крыловского государственного научного центра. – 2014. – № 82(366). – С. 113–192.

УДК 629.5.081.7

РАЗРАБОТКА И ВНЕДРЕНИЕ КОМПЛЕКСНОЙ ПРОГРАММЫ ПО ПРИМЕНЕНИЮ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫХ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗОЛЯЦИОННЫХ И ОТДЕЛОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА СТРОЯЩИХСЯ ЗАКАЗАХ В АО «ПО «СЕВМАШ»

Т.В. Третьякова, АО «Производственное объединение «Севмаш», Северодвинск

Приводятся результаты опытно-штатных работ, проведенных в АО «ПО «Севмаш» специалистами общества, проектанта и заказчиком. Приведены сравнительные характеристики материалов, ранее применяемых и внедренных для применения при строительстве заказов. Освещена работа по поиску, в целях решения задач по импортозамещению, новых отечественных высокоэффективных неметаллических материалов, не уступающих иностранным образцам.

Ключевые слова: неметаллические материалы, изоляция корпусных конструкций, гидрозащитное и антикоррозионное покрытие, многокомпонентные и однокомпонентные материалы, выравнивающая мастика, наливной пол.

DEVELOPMENT AND IMPLEMENTATION OF PACKAGE PROGRAM ON THE APPLICATION OF HIGH PERFORMANCE NON-METALLIC INSULATION AND FINISHING MATERIALS AT JSCo "PO "SEVMASH" ORDERS UNDER CONSTRUCTION

T.V. Tretyakova, JSC "PO "Sevmash", Severodvinsk

The article specifies the results of test survey and routine operations carried out in JSCo "PO "Sevmash" by experts of the Society, designer and customer. The comparative properties of materials previously used and implemented to be applied during the construction ordered are available. The article gives coverage to the search in the context of import substitution activities, new home made high-performance non-metallic materials, noninferior to foreign models (brands).

Keywords: non-metallic materials, insulation of hull structures, hydro protective and corrosion-resistant coating, multi- and one-component materials, levelling mastic, seamless floor.

ВВЕДЕНИЕ

На современном этапе развития подводного кораблестроения отмечается рост требований не только к техническим характеристикам АПЛ, но и к обеспечению безопасности и комфорта в помещениях корабля. Как следствие, возросли и требования к неметаллическим материалам, применяемым для отделки. В настоящее время в центре внимания производства стоят две задачи:

- внедрение новых высокоэффективных материалов;
- применение отечественных материалов, не только не уступающих по качеству зарубежным аналогам, но и превосходящих их по всем основным параметрам: цене, технологичности, долговечности, надежности.

В АО «ПО «Севмаш» уже на протяжении более трех лет разрабатываются и внедряются комплексные программы по применению новых высокоэффективных материалов и технологий для строительства

заказов с целью повышения конкурентоспособности, направленной на снижение стоимости выпускаемой продукции.

1. ВНЕДРЕННЫЕ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

АО «ПО «Севмаш», учитывая положительный опыт при строительстве нефтяной морской ледостойкой стационарной платформы (МЛСП) «Приразломная» и объектов гражданского и военного надводного кораблестроения, где для изоляции корпусных конструкций применялись современные негорючие изоляционные материалы фирмы Rockwool (см. рис. 1), предложило АО «ЦКБ МТ «Рубин» использовать данные материалы для изоляции основного корпуса на проектах 4-го поколения.

Для изоляции основного корпуса АПЛ 4-го поколения проектными организациями «Малахит» и «Рубин» применяются негорючие изоляционные

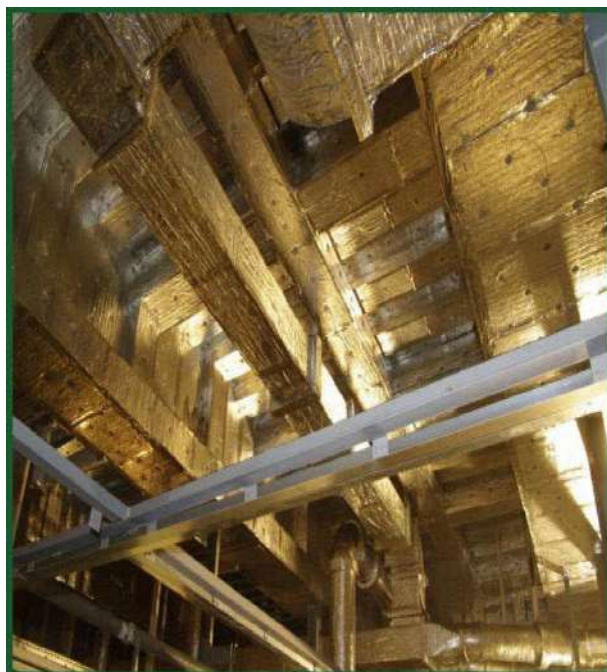


Рис.1 Изоляция корпусных конструкций материалами фирмы *Rockwool* на МЛСП «Приразломная»

плиты марки ПТЭ-150С ТУ 5761-001-00126238-00. Плиты ПТЭ-150С уступают плитам *Rockwool* по коэффициенту теплопроводности; плотность плит ПТЭ-150С колеблется от 139 до 155, минимальная толщина – 40 мм с интервалом 10 мм; свойства звукопоглощения не проверялись. При необходимой толщине изоляции корпуса 20, 30 мм требуется дополнительная операция по доработке плит до необходимой толщины. Кроме того, изоляционные

плиты ПТЭ-150С, так как при их изготовлении используются фенолоформальдегидные смолы и спирты, относятся к 4-му классу опасности по степени воздействия на человека (по ГОСТ 12.1.007-76). С другой стороны, изоляционные плиты фирмы *Rockwool* обладают свойством звукопоглощения (коэффициент звукопоглощения – 0,75) и согласно резолюции ИМО А.962(23) классифицируются как безопасные материалы и имеют постоянную плотность (табл. 1).

Таблица 1
Сравнение характеристик изоляционных материалов
ПТЭ-150С и *Rockwool*

Характеристика	ПТЭ-150С	<i>Rockwool Sea Rox SL 440</i>
Пожароопасность	Негорючий	Негорючий
Коэффициент теплопроводности (Вт/мК)	0,038	0,036
Плотность (кг/м ³)	139 – 155	150
Толщина/ Интервал (мм)	40 – 100/10	20 – 100/10
Предельное отклонение от размера: длина ширина толщина	+8...–5 +4...–4 +5...–3	+5...–5 +5...–5 +3...–3
Коэффициент звукопоглощения	–	0,75
Безопасность	Малотоксичные (содержат фенолоформальдегидные смолы и спирты)	Безопасные
Биоразстворимость	–	+

В настоящее время на заказах ВМФ применяются материалы *Rockwool Sea Rox SL 440* ТУ5762-036-45757203-13 отечественного производства, которое организовано в Ленинградской области, г. Выборг, пос. Лазаревка.

Технологическим процессом (ОСТ5.9915-83) для монтажа плит изоляции предусматривается операция шпатлевания изоляционных плит материалом марки «Целалит-3», что в условиях заказа является процессом трудоемким, а в труднодоступных местах и невыполнимым. В результате значительно увеличивается продолжительность выполнения изоляционных работ.

В качестве гидрозащиты для приклейки бязи поверх плит ПТЭ-150С использовался многокомпонентный клей «Целалит-3» ООП5Р.9068-90, а для плит *Rockwool Sea Rox SL 440* ТУ5762-036-45757203-13 был предложен клей ПВАД Д51С ГОСТ 18992-90, что позволяет уменьшить количество технологических операций при монтаже изоляционных плит.

Специалистами АО «ПО «Севмаш» совместно с АО «ЦКБ МТ «Рубин» на одном из заказов ВМФ в ноябре 2014 г. проведена опытно-штатная работа по отработке технологии монтажа теплоизоляции плитам *Sea Rox SL 440* и гидрозащитного покрытия.

Рассмотрено и отработано 4 варианта монтажа изоляции и 4 варианта гидрозащитного покрытия (табл. 2).

Таблица 2

Монтаж изоляции	Монтаж гидрозащитного покрытия
1-й вариант	
Плиты с рельефной поверхностью с двух сторон покрыты шпатлевкой «Целалит-3»	На плиту нанесен клей «Целалит-3», приклеена бязь с предварительной пропиткой в латексе ДВХБ-70
2-й вариант	
Предварительно зашпатлеванные плиты с рельефной поверхностью повторно покрыты шпатлевкой Целалит-3	На плиту нанесен клей ПВА П, приклеена бязь, пропитанная в дисперсии ПВАД Д51С
3-й вариант	
На плиты с предварительно снятым рельефом с одной стороны приклеена бязь	На плиту приклеена бязь, пропитанная в дисперсии ПВАД Д51С
4-й вариант	
На предварительно зашпатлеванные Целалит-3 плиты с рельефной поверхностью приклеена бязь	На плиту приклеена бязь, пропитанная в дисперсии ПВАД Д51С, разбавленная с водой (3:2)

Большую технологичность показал 3-й вариант с предварительно снятым рельефом с одной стороны поверхности изоляционной плиты.

В связи с тем, что во всех вариантах наблюдались наплывы отвержденных остатков клея ИДС ООП5Р.9068-90, дополнительно была проведена работа по оценке прочности приклейки изоляции без промазки торцов.

В ходе работы исключена операция предварительного шпатлевания плит изоляции материалом «Целалит-3», что делает ненужным приготовление шпатлевки и ее доставку на заказ, вследствие чего сокращается продолжительность установки изоляции в целом. Для приклейки бязи многокомпонентный клей «Целалит-3» заменен на поливинилацетатную дисперсию ПВАД Д51С.

Экономический эффект, с учетом применения плит *Sea Rox SL 440* и клея ПВА Д51С, составил 2,3 млн р. на заказ.

Имея положительный опыт работы с импортными лако-красочными материалами (ЛКМ), ПКБ «Севмаш» рассмотрел возможность применения их и систем окраски на их основе.

В данном случае в качестве антикоррозионного покрытия междубортного пространства, трюмов, выгородок, аккумуляторных ям и цистерн спецназначения проектные организации применяют как систему Б-ЭП (грунтовка и эмаль), так и *Balloyx HB Light* фирмы ООО *Jotun paints*. Сравнив их, можно выявить ряд существенных недостатков у материалов системы Б-ЭП по сравнению с материалом *Balloyx HB Light*. Материалы Б-ЭП имеют значительно более низкий уровень качества, а также являются менее технологичными, чем *Balloyx HB Light*. Например, имеют большие длительность сушки покрытия (примерно в 2–3 раза), время выдержки покрытия до заливки водой (примерно в 20 раз), более высокую минимальную температуру окружающей среды во время нанесения покрытия (табл. 3).

Таблица 3

Характеристика	Система окраски: Б-ЭП-0303 – 1 слой Б-ЭП-452 – 1 слой	Система окраски: <i>Balloyx HB Light Green</i> – 1 слой <i>Balloyx HB Light Beigh</i> – 1 слой
Минимальная температура нанесения	+10 °С	–5 °С
Максимальный интервал времени до нанесения последующего слоя	36 мес.	Нет ограничений
Срок службы	10 лет	Не менее 20 лет
Забракованное покрытие из партий за 2013 г.	Б-ЭП-0303 – 34% Б-ЭП-452 – 19,4%	Не браковали

В настоящее время для заказов ВМФ организовано отечественное производство материала *Balloyx HB Light* фирмы ООО *Jotun paints* в Ленинградской области, дер. Федоровское.

На одном из проектов успешно применена в качестве выравнивающей мастики под линолеум мастика *Maxit flor 4660 Marine Elastic*, имеющая допуск НИИ кораблестроения и вооружения ВМФ ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия» (НИИ КВ ВМФ) на корабли и лодки, взамен мастики «Целалит-5» ОСТ5.9599-75, покрытия многокомпонентного, малопрочного и хрупкого. Время высыхания одного слоя мастики «Целалит-5» при температуре от 17 °С до 30 °С составляет 4–5 сут., при более низкой температуре время высыхания увеличивается до 7 сут. Материал не технологичный.

Мастика *Maxit flor 4660 Marine Elastic* – однокомпонентный материал, не требующий специализированного участка и оборудования для его приготовления. Технологичен в работе – пластичность и растекаемость раствора позволяют

получить ровную поверхность покрытия без дополнительного формирования при помощи шпателей и гладилок. Пригодность покрытия для хождения наступает через 3 ч, полное время отверждения – 3 сут. Применение мастики приводит к снижению трудоемкости, уменьшению затрат на приготовление шпатлевки, уменьшению времени сушки (3 – 6 сут.).

Сравнительный анализ трудозатрат при применении стандартной схемы выравнивания палубы под линолеум на 1 м² покрытия показывает, что при применении мастики *Maxit flor 4660 Marine Elastic* экономия составляет (без учета НДС):

взамен шпатлевки ЭП-0010 ГОСТ 28379-89 с асбестом – 2,5 тыс. р.,

взамен мастики «Целалит-5» – 4 тыс. р. (табл. 4).

Таблица 4

Наименование статей затрат	Целалит-5	ЭП-0010 (с асбестом)	<i>Maxit flor 4660 Marine Elastic</i>
Сырье и материалы, р.	2011,63	528,00	372,13
Количество материала, кг (расчетная толщина покрытия 5 мм)	12,5	6,0	8,5
Трудоемкость, н/час, в т.ч.: -приготовление материала, н/ч -установка выравнивающего покрытия, н/ч	2,693 0,363 2,33	3,148 0,558 2,56	1,140
Собственные работы, р.	4130,97	4828,93	1748,72
Время отверждения покрытия, сут. (при температуре от 15 °С до 25 °С)	5–6	1	0,08–0,13
Производственная себестоимость, р.	6142,60	5356,93	2120,86

Ожидаемый экономический эффект на заказ – около 500 тыс. р.

2. ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫЕ МАТЕРИАЛЫ, ПРЕДЛАГАЕМЫЕ К ВНЕДРЕНИЮ

ПКБ «Севмаш» предложило АО «Северное ПКБ» на корабле проекта 11442М применить в качестве выравнивания поверхностей палуб мастику *Maxit flor 4660 Marine Elastic*. Проектант принял предложение, и в настоящее время выпускается документация, предусматривающая применение данной мастики.

Также в рамках программы импортозамещения в АО «ПО «Севмаш» рассматривается вопрос применения отечественной выравнивающей палубной смеси «ИНФЛЕКС-МКС-01» ТУ5745-001-98603262-2014 производства ООО «МКС» (Санкт-Петербург), аналогичной мастике *Maxit flor 4660 Marine Elastic*, взамен отечественных многокомпонентных материа-

лов. Сравнительные характеристики покрытий приведены в табл. 5.

Таблица 5

Марка покрытия	Состав материала	Прочность материала	Время высыхания
Целалит 5 ОСТ5.9599-75	Многокомпонентный	Малопрочный, хрупкий	4–5 сут. при $t = 17–30\text{ }^{\circ}\text{C}$, 7 дней при более низкой температуре
<i>Maxit flor 4660 Marine Elastic</i>	Однокомпонентный	Пластичный	3 сут.
ИНФЛЕКС-МКС-01 ТУ5745-001-98603262-2014	Однокомпонентный	Пластичный	3 сут.

Согласно техническим условиям, данный материал поставляется в виде сухой смеси, в которую добавляется затворитель на месте выполнения работ, тем самым исключается операция по приготовлению материала и доставке к месту работ.

Сухая палубная смесь «ИНФЛЕКС-МКС-01» имеет допуск НИИ КВ ВМФ на корабли и лодки. По пожарной опасности классифицируется как трудно горючий материал, что играет ведущую роль в выборе материала при строительстве подводных и надводных кораблей.

В АО «ПО «Севмаш» в каюте на одном из плавсредств планируется провести опытно-штатную работу по нанесению выравнивающей палубной смеси «ИНФЛЕКС-МКС-01» под линолеумное покрытие. В лаборатории АО «ПО «Севмаш» будет проведена опытная работа по определению адгезии данной мастики со стальной палубой, вибропоглощающим покрытием «Випоком», линолеумом, керамической плиткой (при первичном изготовлении и при ремонте покрытий).

По окончании опытной работы при участии ЦКБ МТ «Рубин» будет рассмотрен вопрос применения выравнивающей палубной смеси «ИНФЛЕКС-МКС-01» на заказах ВМФ. За счет снижения трудоемкости обеспечивается уменьшение затрат на приготовление мастики и уменьшение времени сушки.

В судостроении для внутренних помещений в качестве напольных покрытий применяются два вида напольных покрытий: линолеум и керамическое покрытие.

Традиционные палубные покрытия имеют следующие недостатки. Линолеумное покрытие растрескивается и вспучивается при температуре ниже 18 °С и при приклейке на сырое основание. Способ устранения этого дефекта - замена линолеума, что ведет к значительным затратам. Имеются проблемы поставки керамического покрытия необходимого цвета

и размера. Керамическое покрытие не является ударопрочным напольным покрытием, что обеспечивает неизбежные сколы плитки. Процесс замены испорченного керамического покрытия очень трудоемок.

Эти материалы заметно устарели и по многим показателям проигрывают более новому виду покрытия – наливным полам.

Наливные полы – это прочное декоративное покрытие, устойчивое к химическому и механическому воздействию. По сравнению с традиционными покрытиями, они более технологичны, образует ровную, бесшовную поверхность.

Преимущества наливных полов: монолитность, долговечность, беспыльность, химическая стойкость, эластичность, безвредность, стойкость к вибрационным и ударным нагрузкам.

Палубное покрытие *Dex-O-Tex Terrazzo M* – это прозрачное эпоксидное палубное покрытие, включающее в себя декоративные мраморные вкрапления.

В 2013 г. в АО «ПО «Севмаш» была создана комиссия по нанесению наливного пола *Dex-O-Tex Terrazzo M* в помещении камбуза и посудомойки на одном из заказов ВМФ в составе представителей завода, проектанта и заказчика. По результатам эксплуатации заказа в октябре 2014 г. было принято решение о применении наливных полов в санитарно-бытовых и продовольственных помещениях на АПЛ отечественного производства. Вид наливных полов представлен на рис. 2 и 3.



Рис. 2 Наливной пол *Dex-O-Tex Terrazzo M* на плавсуде

Область применения покрытия *Dex-O-Tex Terrazzo M* – помещения с условиями повышенной влажности: санитарно-бытовые (галюны, душевые, раздевалки, умывальные), продовольственные помещения (камбуз, буфетные, посудомоечные). Покрытие заменяет традиционное покрытие керамической плиткой.



Рис. 3 Наливной пол *Macrotech* на авианосце «Викрамадитья»

В г. Колпино Ленинградской области организовано производство отечественных аналогов наливных полов. Разработаны опытные образцы, проводятся испытания на физико-механические свойства, пожарные испытания. ТУ направлены в НИИ КВ ВМФ на получение допуска на корабли и лодки.

Экономический эффект данной комплексной программы в расчете на один заказ АПЛ составил около 3,5 млн р. Предполагаемый экономический эффект от применения новых высокоэффективных неметаллических материалов на крейсере «Адмирал Нахимов» составит свыше 15 млн р.

В свете мероприятий по импортозамещению российскими организациями, а также в эпоху нанотехнологий и инновационных решений ПКБ «Севмаш» работает над поиском новых отечественных высокоэффективных неметаллических материалов, не уступающих материалам иностранного производства. В настоящее время завершается процесс импортозамещения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ТУ5761-001-00126238-00. Вата базальтовая энергетическая и изделия на ее основе (изделия из природного камня).
2. ТУ5762-036-45757203-13. Изделия теплоизоляционные из каменной ваты *SeaRox*.
3. ОСТ5.9915-83. Изоляция тепловая судовых помещений.
4. Протокол технического совещания по выполнению опытно-штатной работы по нанесению напольного покрытия *Dex-o-Tex* в камбузе ДЕИА-09551-89.231.484-2014 от октября 2014 г.
5. ТУ5745-001-98603262-2014. Смесь сухая палубная выравнивающая «ИНФЛЕКС-МКС-01».
6. Программа № 246.41.1821-2015 проведения опытных работ по оценке возможности применения отечественной выравнивающей мастики «Инфлекс-МКС-01» во внутренних помещениях в проекте 09552.
7. Программа № 246.41.1791-2014 проведения опытно-штатной работы по отработке технологии монтажа гидрозащиты корпусной изоляции на проекте 09552 в 8 помещении.
8. Протокол технического совещания по вопросу применения современных напольных покрытий внутренних помещений на корабле проекта 11430 № ДЕИА-11430.89.231.319-2012.
9. Программа №246.41.1605-2012 проведения опытно-штатной работы по отработке технологии нанесения покрытия *Maxit flor 4660 Marine Elastic* и ремонта мастики «Целалит-5» на корабле пр. 11430.



МЕХАНИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ДВИЖИТЕЛИ

УДК 621.822:629.5.03

СОЗДАНИЕ СУДОВЫХ ПОДШИПНИКОВ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

А.А. Хабаров, АО «Производственное объединение «Севмаш», Северодвинск,
e-mail: anton_sevsk@mail.ru

Рассмотрена возможность применения подшипников с автономной смазкой вместо подшипников жидкостного трения с циркуляционной смазкой. Освещены проблемы, возникающие при создании автономных подшипников. Рассмотрены способы образования новых видов смазочных слоев, создания внутренней циркуляции смазки в смазочном слое высокоскоростных автономных подшипников, а также их конструкции.

Ключевые слова: высокоскоростные подшипники, автономный подшипник, жидкостное трение, внутренняя циркуляция смазки, автономная смазка.

DEVELOPMENT OF NEXT GENERATION MARINE BEARINGS

A.A. Khabarov, JSC "PO "Sevmash", Severodvinsk, e-mail: anton_sevsk@mail.ru

Possible use of bearings with self-contained lubrication instead of film-lubrication bearings with circulating lubrication is considered. The problems arising during development of self-contained bearings have been specified. The article considers production manner of new types of lubricating films, internal circulatory lubrication in a lubricant film of high-speed self-contained bearings as well as their structures.

Keywords: high-speed bearings, self-contained bearings, film-lubrication, internal circulatory lubrication, self-contained lubrication.

С конца 50-х годов XX века АО «ПО «Севмаш» занимается проектированием и изготовлением судовых подшипников скольжения для кораблей и судов всех классов и назначений. Это опорные и упорные самоустанавливающиеся подшипники скольжения (пара трения «сталь-баббит»), опорные углепластиковые подшипники скольжения гребных валов.

Создатель школы проектирования судовых подшипников АО «ПО «Севмаш» - д-р техн. наук Александр Яковлевич Альпин. А.Я. Альпиным и коллективом под его руководством была изобретена индивидуальная система смазки подшипников, найдены решения уравнения Рейнольдса для частных случаев течения смазки, наблюдаемых в гидродинамических

подшипниках, а именно: вращение несущей радиальную нагрузку шейки вала в отверстии, заполненном жидкостью (опорные подшипники); упирание плоской подушки во вращающийся гребень; упирание во вращающийся гребень подушки, претерпевшей термоупругую деформацию (большинство главных упорных подшипников производства АО «ПО «Севмаш»).

На основе полученных решений уравнения Рейнольдса были разработаны методы расчета подшипников и создан программный модуль для автоматизации расчетов.

Остановимся подробнее на опорных самоустанавливающихся подшипниках скольжения (см. рис. 1). Такие подшипники предназначены для установки на кораблях и судах в качестве

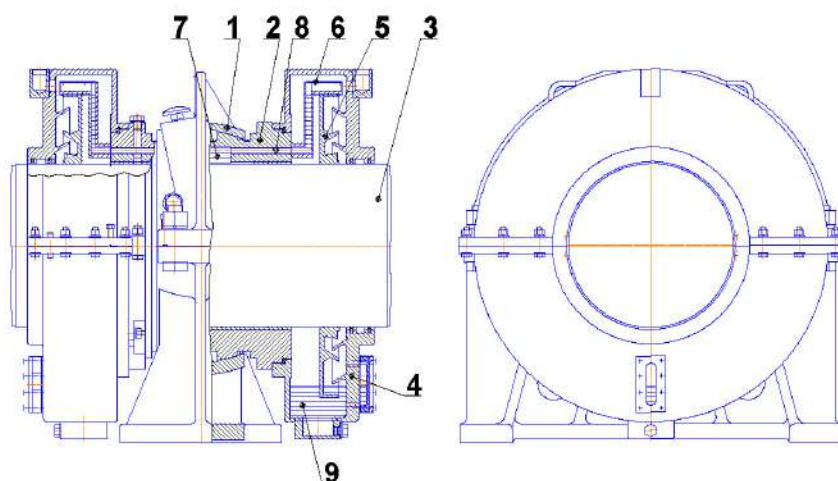


Рис. 1 Опорный подшипник промежуточного вала

опор промежуточных валов. Основные характеристики подшипников: диаметры шеек вала – от 140 до 900 мм; воспринимаемые опорные нагрузки – от 15,7 до 538,0 кН; максимальная окружная скорость вращения вала – 6 м/с; смазка подшипника – индивидуальная маслами с кинематической вязкостью от 43 до 190 сСт при 50 °С; пара трения: сталь-баббит.

В корпусе 1 расположены вкладыш 2 и вал 3. На торцевых поверхностях вкладыша 2 закреплены два картера 4 с расположенными в них маслоподающими устройствами, состоящими из маслоподающих колец 5 и маслосъемников 6. В верхней части вкладыша 2 выполнена полость 7, которая соединена отверстиями 8 с маслоподающими устройствами. В полости картеров 9 залита смазывающая жидкость. Подшипник работает следующим образом: при вращении вала 3 смазывающая жидкость забирается маслоподающими кольцами 5, снимается с них маслосъемниками 6 и по отверстиям 8 поступает в полость 7 вкладыша 2. Поступающая из картеров 4 во вкладыш 2 смазывающая жидкость возвращается в картеры 9 по диаметральному зазору между валом 3 и вкладышем 2.

Преимуществами подшипников такого типа являются длительный безотказный период эксплуатации (практически на весь период службы судна), низкие эксплуатационные расходы, а также отсутствие циркуляционной системы смазки для прокачки подшипника и, как следствие, упрощенный монтаж на объекте.

Упорные самоустанавливающиеся подшипники скольжения предназначены для восприятия и передачи на корпус корабля или судна осевого упора гребного винта и радиальной нагрузки от массы вала. Основные характеристики таких подшипников: диаметры шеек упорного вала – от 100 до 600 мм; воспринимаемые упорные нагрузки – от 140 до 3200 кН; смазка подшипника – индивидуальная

маслом с кинематической вязкостью от 43 до 190 сСт при 50 °С; пара трения: сталь – баббит; охлаждение подшипников – забортной водой, прокачиваемой через встроенный в подшипник маслоохладитель. При частоте вращения вала до 30 % от номинальной допускается работа подшипника без водяного охлаждения.

Преимуществами упорных подшипников такого типа являются длительный безотказный период эксплуатации, низкие эксплуатационные расходы, отсутствие циркуляционной системы смазки для прокачки подшипника.

Опорные углепластиковые подшипники скольжения используются на кораблях и судах в качестве опор гребных валов. Их основные характеристики: диаметры шеек вала – от 200 до 820 мм; максимальная окружная скорость вращения вала – 10 м/с; допустимое контактное давление на антифрикционный материал – 0,7 МПа; смазка и охлаждение подшипника – забортной водой (принудительная или самопроточная).

Следует обратить внимание на применяемую пару трения. Это композиция вкладышей из пресс-материала ФУТ и твердосмазочных вкладышей из материала АНИТА-40, ответная часть – бронза. Ранее в качестве материала в таких подшипниках применялся бокаут. Новый набор вкладышей ФУТ – Анита-40 за счет лучшей несущей способности позволил заметно уменьшить габаритные размеры подшипников, сократить расходы при изготовлении, снизить себестоимость. Отличительные преимущества углепластиковых подшипников – длительный безотказный период эксплуатации и низкие эксплуатационные расходы.

На все типы подшипников, изготавливаемых в АО «ПО «Севмаш», получены патенты.

Кроме того, конструкторами ПКБ «Севмаш» впервые созданы:

- высокооборотный автономный опорный подшипник со скоростью вращения 1100 об/мин;
- маломагнитный подшипник из титановых сплавов;
- блок опорно-упорных подшипников с парой трения АММТ и титан с диффузионным покрытием оксидами Al и Cr, работающий в морской воде.

Подшипники производства АО «ПО «Севмаш» используются в проектах ведущих конструкторских бюро России, поставляются на большинство отечественных судостроительных заводов и верфей. Упорные самоустанавливающиеся и опорные углепластиковые подшипники установлены на всех вновь проектируемых надводных кораблях для ВМФ России, а также кораблях, поставляемых на экспорт. Анализ договоров показывает ежегодный рост объема производства судовых подшипников. В настоящее время объем заказов составляет около 1,5 млрд р.

Зарубежными изготовителями судовых подшипников являются фирмы *Wärtsillä*, *Sedervall*, *Mitchel* и др. Подшипники, изготавливаемые ими, по конструкции схожи с продукцией АО «ПО «Севмаш». Они выполняются как с циркуляционной системой смазки, так и автономными, но с обязательным водяным охлаждением масла в картере подшипника. Следует напомнить, что упорные подшипники скольжения производства АО «ПО «Севмаш» могут работать без водяного охлаждения при частоте вращения 30% от номинальной.

Проведем сравнительный анализ стоимости опорных подшипников для патрульного корабля проекта 22160. Стоимость подшипника без учета НДС и таможенных сборов фирмы *Sedervall* составляет 30000 €, подшипника фирмы *RENK* – 39750 €. Стоимость аналогичного подшипника производства АО «ПО «Севмаш» составляет 20000 € при одинаковых технических характеристиках. Таким образом, принимая во внимание соотношение цены и качества, подшипники производства АО «ПО «Севмаш» более чем конкурентоспособны.

Изначально все подшипники скольжения выпускались с применением циркуляционной системы смазки (см. рис. 2), при которой масло подводилось под давлением от напорной магистрали, а отработавшее масло стекало в цистерну. Системы циркуляционной смазки, в которые входят масляные насосы, масляные системы с фильтрами и маслоохладителями, громоздки, сложны в обслуживании и пожароопасны.

В настоящее время АО «ПО «Севмаш» изготавливает подшипники с индивидуальной системой смазки, при которой масло подается к трущимся поверхностям за счет внутренней циркуляции без применения насоса, масляных цистерн, фильтров, трубопроводов и т.д.

Разработанные автономные подшипники до недавнего времени применялись только до окружных

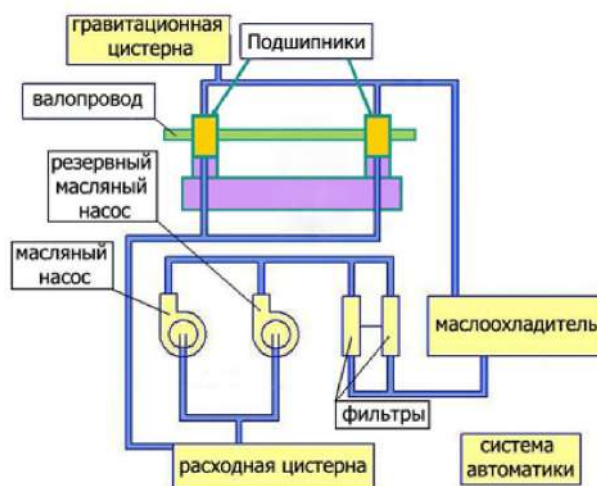


Рис. 2 Циркуляционная система смазки подшипников

скоростей на шейках валов не более 15 м/с. Основной задачей является разработка и изготовление высокоскоростных подшипников с окружной скоростью на шейке вала до 30 м/с, с автономной системой подачи масла в зону трения, для судовых электродвигателей, турбин и турбогенераторов.

Проблемы, возникающие при создании автономных подшипников жидкостного трения, работающих при окружных скоростях до 30 м/с, следующие:

- большое количество тепла, выделяемое в смазочном слое при высоких окружных скоростях, и трудности в отводе этого тепла из-за низкого коэффициента теплоотдачи при охлаждении масла;
- большой расход масла, необходимый для заполнения смазочного слоя, и трудности в обеспечении расхода масла имеющимися средствами в существующих подшипниках (маслоподающие кольца, диски);
- существующие средства подачи смазки (маслоподающие кольца и диски) при повышении окружных скоростей вспенивают масло в картере, что вызывает протечки через концевые уплотнения.

Научно-технологический опыт АО «ПО «Севмаш» в области создания подшипников жидкостного трения и использование изобретений по патентам привели к разработке новых способов образования смазочных слоев (вакуумный, насосный смазочные слои). Использование этих способов обеспечивает: увеличение нагрузок при существующих габаритах упорных и опорных частей; уменьшение жидкостного трения; снижение тепловыделения; направленный и увеличенный теплоотвод; внутреннюю циркуляцию смазки. Кроме того, эти способы обеспечивают компактность, простоту конструкции и эксплуатации, бесшумность, повышают ресурс, нагрузочную способность, быстроходность, надежность и ударостойкость, не требуют специальных контактных уплотнений между валом и корпусом подшипника.

Рассмотрим принципы работы высокоскоростных автономных подшипников. В смазочном слое автономного подшипника создается насосный эффект: образуется зона разрежения (вакуумная зона) и зона повышенного давления (насосный слой) для подпитки смазочного слоя (см. рис. 3). Благодаря подосу масла в вакуумную часть слоя был решен вопрос обеспечения достаточного расхода масла. Кроме того, решается проблема вспенивания масла и протечек через уплотнения.

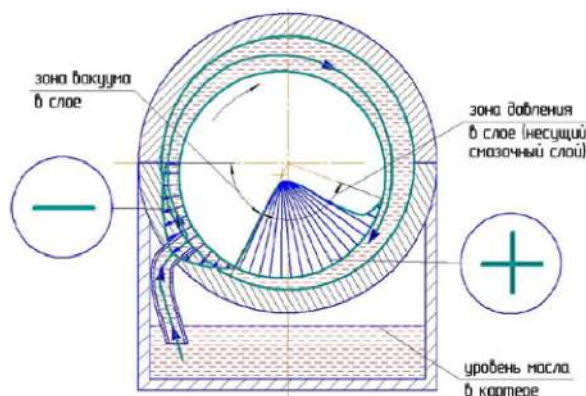


Рис. 3 Вакуумный смазочный слой

Для отвода тепла используется радиатор охлаждения. В верхнем вкладыше образуют смазочный слой специальной формы, в котором создается расход и давление масла, прокачиваемого через радиатор без использования внешних насосов. 2/3 части расхода засасываются в маслоохладитель, 1/3 отправляется в зазор между валом и нижним вкладышем. Охлажденное масло возвращается в подшипник (см. рис. 4). Благодаря этому обеспечивается необходимый расход масла через смазочный слой подшипника при малом

расходе масла, засасываемого в смазочный слой.

В подшипниках создана внутренняя циркуляция смазки в смазочном слое (см. рис 5), т. е. смазка, попав в смазочный слой, снова туда возвращается, в основном не попадая в картер подшипника, при этом она охлаждается непосредственно в самом слое за счет воздушного охлаждения. Обеспечивается большое количество смазки, необходимое для заполнения смазочного слоя при высоких окружных скоростях. Смазка пополняется в смазочном слое благодаря подосу из картера в вакуумную часть слоя. При этом не возникает вспенивания масла.

В настоящее время предприятие обеспечивает выполнение заказов для РФ в полном объеме.

Проектирование и производство подшипников является перспективным направлением работы. Выбор лучших пар трения, разработка новых упорных подшипников водяного охлаждения с применением пары трения титан – АММТ, упорных подшипников с индивидуальной смазкой, способных работать на пониженных оборотах валопровода при гидростатическом упоре от 125 т – вот те задачи, которые инженеры-конструкторы ПКБ «Севмаш» планируют решить в ближайшее время.

В настоящее время выполнена опытно-конструкторская работа, в результате которой разработаны автономные подшипники с воздушным охлаждением для насоса с диаметром вала 115 мм и частотой вращения 3000 об/мин и электродвигателя с диаметром вала 180 мм и частотой вращения 3000 об/мин. Может быть создан типоразмерный ряд подшипников с автономной системой смазки, при которой масло заливается в подшипник и подается к трущимся поверхностям за счет внутренней циркуляции без применения насоса, масляных цистерн, фильтров, трубопроводов и т.д. Автономность смазки

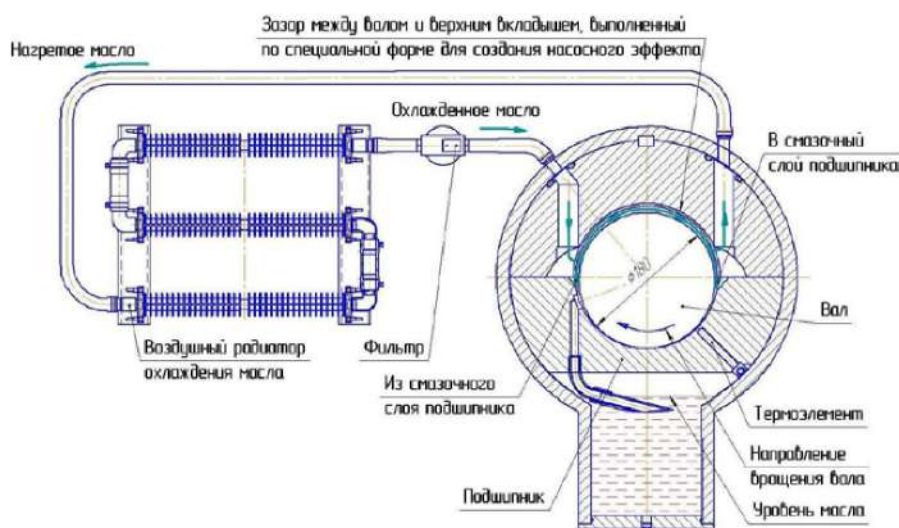


Рис. 4. Схема циркуляции масла в подшипнике

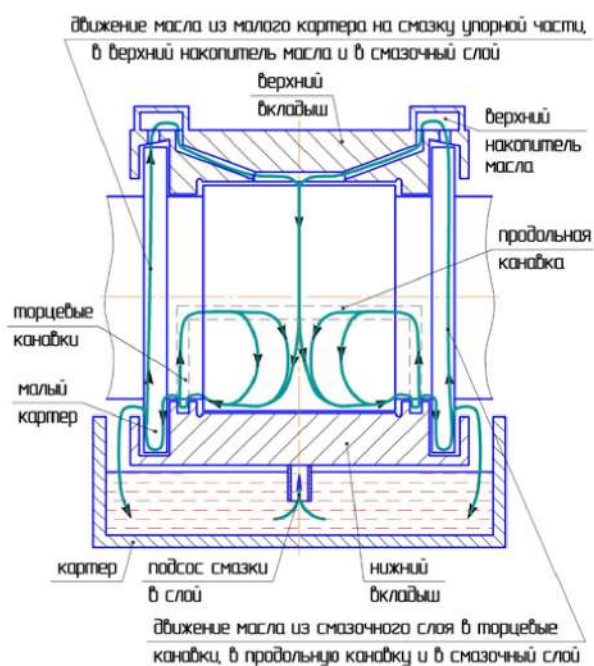


Рис. 5 Смазочный слой с внутренней циркуляцией

и незначительный объем работ по обслуживанию подшипников в процессе эксплуатации обеспечат их высокую экономическую эффективность.

В результате выполненной ОКР получена информация, необходимая для создания высокоскоростных автономных подшипников для кораблей и судов, а также машин и механизмов широкого назначения, для которых в настоящее время применяются системы циркуляционной смазки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хабаров А.А., Альпин А.Я, Кокотков Н.И. О возможности исключения громоздких и пожароопасных судовых систем циркуляционной смазки подшипников жидкостного трения // Судостроение. – 2012. – №5. – С. 34–35.
2. Альпин А.Я, Воронцов Е.Ю., Кокотков Н.И., Хабаров А.А. Внутренняя циркуляция в смазочном слое – самый простой и эффективный способ маслоснабжения автономных подшипников жидкостного трения // Судостроение. – 2014. – №2. – С. 46–48.

УДК 621.6.036

ОЦЕНКА ПОВЫШЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ ПАРОВ ПРИ ХРАНЕНИИ СПГ В СУДОВОМ КРИОГЕННОМ РЕЗЕРВУАРЕ

В.А. Павловский, д-р физ.-мат. наук, проф., Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, e-mail: spbu@spbu.ru

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

Проведен анализ основных теплофизических характеристик сжиженного природного газа (СПГ) в криогенном резервуаре в зависимости от продолжительности его хранения, выполнена оценка интенсивности повышения давления паров в резервуаре. Приведен пример расчета зависимости изменения давления паров от времени при хранении СПГ в резервуарах различной вместимости и разного качества изоляции.

Ключевые слова: сжиженный природный газ, топливные емкости, криогенные резервуары, давление паров, термодинамика.

EVALUATION OF VAPOUR PRESSURE INCREASE IN STORAGE OF LNG CRYOGENIC SHIP TANK

V.A. Pavlovsky, DSc., professor, St.Petersburg State University, St. Petersburg, e-mail: spbu@spbu.ru

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

The paper analyzes the basic thermal characteristics of liquefied natural gas (LNG) in the cryogenic tank, depending on the duration of its storage. Valuation of the vapour pressure intensity increase in the cryogenic tank has been carried out. The paper contains example of the calculation of the vapour pressure changes depending on the time when LNG storage tanks of different capacity and different insulation qualities.

Keywords: liquefied natural gas (LNG), fuel storage tanks, cryogenic tank, vapor pressure, ther-modynamics.

Н аряду с несомненными преимуществами СПГ-топлива как универсального и экологически чистого топлива для различных типов судовых энергетических установок (дизельных, газовых и паровых турбин), этот вид топлива имеет и недостатки, связанные в основном с трудностью его длительного хранения. СПГ хранится в специальных цистернах, которые представляют сложные теплотехнические сооружения. Для размещения запасов СПГ-топлива на судне возможно использование всех типов цистерн, применяемых на газозаводах (мембранные, вкладные цистерны и призматические вкладные цистерны типа SPB, цистерны типа C). В настоящее время в основном используются вкладные цистерны типа C.

Температура СПГ всегда ниже температуры окружающей среды, поэтому к нему непрерывно подводится тепло, в результате чего СПГ частично испаряется. Применение высокоэффективной теплоизоляции различных видов позволяет уменьшить теплопритоки к СПГ, хранящемуся в криогенных резервуарах. Однако даже в самом совершенном криогенном резервуаре существует некоторый, сведенный к минимуму теплоприток, действующий на хранимый СПГ. Поэтому может оказаться, что

к концу автономного плавания судна давление паров в резервуаре может достигнуть или превысить значение предельного давления. В связи с этим проблема оценки давления при длительном хранении СПГ в судовой криогенной емкости является актуальной.

Один из наиболее перспективных путей снижения потерь СПГ при его длительном хранении – применение систем хранения без газоотвода (т.е. без сброса давления из парового пространства).

Поскольку СПГ практически является сжиженным метаном, то дальнейший расчет будет выполнен применительно к этому веществу. Геометрию для танка объемом V возьмем, для простоты, в виде цилиндра диаметром d и длиной l . Тогда объем танка будет равен $V = 0,25\pi d^2 l$, площадь поверхности $F = \pi dl + 0,5\pi d^2$. Далее рассмотрим три варианта таких цилиндров:

$$d = 10 \text{ м}, l = 3,82 \text{ м}, V = 300 \text{ м}^3, F = 276,95 \text{ м}^2;$$

$$d = 15 \text{ м}, l = 17,0 \text{ м}, V = 3000 \text{ м}^3, F = 1153,95 \text{ м}^2;$$

$$d = 25 \text{ м}, l = 61,15 \text{ м}, V = 30000 \text{ м}^3, F = 5781,53 \text{ м}^2.$$

Будем предполагать, что СПГ занимает 90 % объема танка, остальные 10 % остаются на газовую

фазу. Изоляцию стенок танка будем характеризовать коэффициентом теплопередачи k , значение которого будем варьировать, полагая $k = 0,055 \text{ кВт/м}^2\text{К}$; $k = 0,1 \text{ Вт/м}^2\text{К}$; $k = 0,3 \text{ Вт/м}^2\text{К}$.

Каждому значению k соответствует параметр, характеризующий интенсивность теплопритока через изоляцию. Этот параметр равен отношению массы испаренного за сутки СПГ к его массе в начальный момент времени.

В начальный момент времени СПГ, занимая 90 % объема танка, имеет массу

$$M_o = 0,9\rho V,$$

где $\rho = 432,55 \text{ кг/м}^3$ – его плотность при $t = -161 \text{ }^\circ\text{C}$.

За время τ через изолированную стенку площадью F подводится теплота

$$Q = k(t_o - t)F\tau \text{ Дж}, \quad (1)$$

где t_o – температура окружающей среды, примем ее равной $t_o = 20 \text{ }^\circ\text{C}$.

Эта теплота испаряет СПГ в количестве

$$G = Q/r \text{ кг}, \quad (2)$$

где r – теплота парообразования, примем ее согласно [1] равной $r = 5,104 \times 10^5 \text{ Дж/кг}$ при температуре $t = -61 \text{ }^\circ\text{C}$.

Тогда процент испарения – потери СПГ – можно подчитать из отношения G/M_o . В табл. 1 приведена оценка суточных потерь СПГ в зависимости от качества изоляции, характеризуемого коэффициентом теплопередачи k , для разных объемов танка.

Видно, что потери уменьшаются как с улучшением изоляции, так и с увеличением размера танка, приводящим к уменьшению отношения площади поверхности танка к его объему и тем самым к уменьшению величины G/M_o .

Рассмотрим процесс повышения давления в резервуаре, заполненного на 90 % жидким СПГ, находящимся в состоянии насыщения (кипения) при давлении $p = p_n$, которому соответствует температура насыщения $T = T_n$. В этом случае термодинамическая система находится в состоянии термодинамического равновесия, пар над зеркалом жидкости так же, как и жидкость, находится в состоянии насыщения. Пусть в начальный момент времени $\tau = 0$ давление паров (давление насыщения) $p = p_n = 1,041 \text{ бар}$. Ему на

линии насыщения, согласно таблице термодинамических свойств метана [1], соответствует температура $T = T_n = 112 \text{ К}$ ($-161 \text{ }^\circ\text{C}$). Из этой же таблицы находим значения удельной энтальпии жидкой фазы $i' = 718000 \text{ Дж/кг}$ и газовой $i'' = 1228,9 \times 10^3 \text{ Дж/кг}$. Здесь, как это принято в термодинамике [2], индексы ' и '' соответствуют параметрам жидкой и газообразной фаз, соответственно; плотности этих фаз: $\rho' = 423,55 \text{ кг/м}^3$, $\rho'' = 1,857 \text{ кг/м}^3$. Масса метана (суммарная, состоящая из масс обеих фаз)

$$M = \rho'0,9V + \rho''0,1V, \text{ кг}. \quad (3)$$

Поскольку объем танка неизменен, то при поступлении теплоты через изоляцию термодинамический процесс в танке является изохорным, для него согласно первому закону термодинамики [2] поступление теплоты Q , Дж и внутренней энергии U , Дж, связаны соотношением

$$Q = \Delta U, \text{ Дж}.$$

Поступление теплоты от наружной среды с температурой $T_0 = 293 \text{ К}$ ($20 \text{ }^\circ\text{C}$) к СПГ с температурой $T(\tau)$ за время τ определяется по формуле теплопередачи через плоскую стенку [3]:

$$Q = \int_0^\tau k(T_0 - T)F d\tau, \quad (4)$$

где k , $\text{Вт/м}^2\text{К}$ – коэффициент теплопередачи через изолированную стенку танка.

В терминах энтальпии [2] согласно первому закону термодинамики для рассматриваемого изохорного процесса имеем, учитывая связь между величинами энтальпии i и внутренней энергии U :

$$M\Delta i = Q + V\Delta p. \quad (5)$$

Поскольку термодинамическая система содержит как жидкую, так и газообразную фазы, то можно ввести в рассмотрение степень сухости системы:

$$x = \frac{v - v'}{v'' - v'}, \quad (6)$$

где v' и v'' – удельные объемы фаз, $v' = 1/\rho'$, $v'' = 1/\rho''$, $v = V/M$.

Тогда выражение для энтальпии системы принимает вид [2]:

$$i = i' + x(i'' - i'), \quad (7)$$

Таблица 1

Расчет потерь СПГ на испарение за сутки

$V, \text{ м}^3$	$M, \text{ кг}$	$k = 0,055 \text{ кВт/м}^2\text{К}$			$k = 0,1 \text{ Вт/м}^2\text{К}$			$k = 0,3 \text{ Вт/м}^2\text{К}$		
		$Q, \text{ МДж}$	$G, \text{ кг}$	потери $G/M_o, \%$	$Q, \text{ МДж}$	$G, \text{ кг}$	потери $G/M_o, \%$	$Q, \text{ МДж}$	$G, \text{ кг}$	потери $G/M_o, \%$
300	114358,5	239,52	469,28	0,41	435,50	854,1	0,75	1306,5	2559,8	2,23
3000	1143585	998,01	1955,35	0,17	1814,61	3555,2	0,31	5443,7	10665,6	0,93
30000	11435850	5000,21	9796,63	0,085	9091,33	17812,1	0,16	27274	53436,5	0,47

и изменение энтальпии при переходе системы из начального состояния в текущее можно представить следующим образом:

$$\Delta i = i - i_1 = [i' + x(i'' - i')] - [i_1' + x_1(i_1'' - i_1')]. \quad (8)$$

Аналогичным образом можно записать и для изменения давления:

$$\Delta p = p - p_1. \quad (9)$$

В этих выражениях индекс 1 относится к начальному состоянию системы, величины без индексов – к состоянию ее для момента времени τ . Учитывая формулу (6), выражения для энтальпий согласно (7) принимают вид:

$$i_1 = i_1' + x_1(i_1'' - i_1'); \quad x_1 = \frac{(V/M - 1/\rho_1')}{(1/\rho_1'' - 1/\rho_1')}, \quad (10)$$

$$i = i' + x(i'' - i'); \quad x = \frac{(V/M - 1/\rho')}{(1/\rho'' - 1/\rho')}. \quad (11)$$

Подстановка соотношений (4), (8), (9) в равенство (5) приводит к уравнению

$$(p - p_1) + \int_0^{\tau} \frac{kF}{V} (T_0 - T) d\tau - \frac{M}{V} (i - i_1) = 0. \quad (12)$$

Величины T , i' , i'' , ρ' , ρ'' выражаются через давление p в паровом пространстве с использованием таблицы термодинамических свойств метана на линии насыщения [1]. Приближено аппроксимацию этих величин, пригодную для расчетов с погрешностью не более 5 % до давления $p = 6$ бар, по данным этой таблицы выполним в виде:

$$T = \frac{(173,378p + 499,189)}{p + 5,035}, \text{ К};$$

$$i' = \sqrt{24122,72p + 490412,242}, \text{ кДж/кг};$$

$$i'' = \sqrt{12399,053p + 1,497 \times 10^6}, \text{ кДж/кг};$$

$$\rho' = \frac{(3877,891 + 301,468p)}{p + 8,89}, \text{ кг/м}^3;$$

$$\rho'' = 1,532p + 0,262, \text{ кг/м}^3.$$

В этих аппроксимациях давление p выражено в барах.

Выполним расчет изменения давления с течением времени, полагая в начальный момент $\tau = 0$:

$$p_1 = 1,041 \text{ бар}, \quad T_1 = 112 \text{ К}, \quad i_1' = 718 \times 10^3 \text{ Дж/кг}, \\ i_1'' = 1228 \times 10^3 \text{ Дж/кг}, \quad \rho_1' = 423,55 \text{ кг/м}^3, \\ \rho_1'' = 1,857 \text{ кг/м}^3.$$

Задаваясь различными значениями τ и решая трансцендентное уравнение (12) относительно неизвестной величины p , находим ее изменение с течением времени. В табл. 2 приведены результаты расчета динамики роста давления для разных значений объема резервуара V и разного качества изоляции этого резервуара, которое характеризует коэффициент теплопередачи k . По результатам расчетов равновесного процесса построены зависимости изменения темпа роста давления паров в сосуде от продолжительности хранения СПГ в зависимости от начальных характеристик СПГ и теплотехнических характеристик резервуара (см. рис. 1 и 2). Видно, что нарастание давления усиливается с уменьшением объема резервуара и ухудшением качества изоляции (увеличением значения коэффициента теплопередачи).

Таким образом, приведенная методика оценки времени хранения СПГ и интенсивности повышения давления паров в резервуаре при хранении СПГ-топлива без газоотвода, с учетом качества его изоляции, может быть применена к судовым топливным СПГ-емкостям и к любым иным криогенным резервуарам, размещаемым на судне.

Таблица 2

Расчет динамики роста паров в резервуаре

Коэффициент теплопередачи k , Вт/м ² К	Вместимость резервуара							
	$V = 300 \text{ м}^3$		$V = 3000 \text{ м}^3$			$V = 30000 \text{ м}^3$		
	τ , сутки	p , бар	k , Вт/м ² К	τ , сутки	p , бар	k , Вт/м ² К	τ , сутки	p , бар
0,3	2	2,39	0,3	2	1,68	0,3	2	1,34
	4	3,71		4	2,27		4	1,63
	8	6,25		8	3,48		8	2,19
	16	11,67		16	5,87		16	3,30
0,1	2	1,49	0,1	2	1,25	0,1	2	1,15
	4	1,95		4	1,46		4	1,26
	8	2,81		8	1,88		8	1,44
	16	4,52		16	2,67		16	1,81
0,055	2	1,29	0,055	2	1,18	0,055	2	1,10
	4	1,53		4	1,28		4	1,16
	8	2,02		8	1,51		8	1,25
	16	2,61		16	1,95		16	1,46

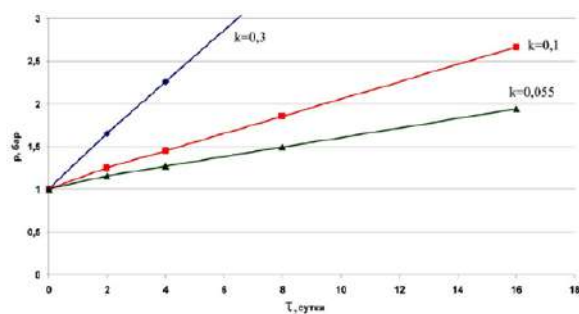


Рис. 1 Зависимость давления паров СПГ в резервуаре объемом $V=3000 \text{ м}^3$ от продолжительности хранения и значения коэффициента теплопередачи k , кВт/м²К

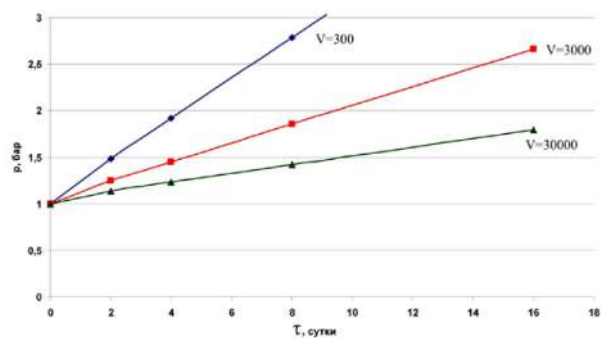


Рис. 2 Зависимость давления паров СПГ от продолжительности хранения при коэффициенте теплопередачи $k=0,1 \text{ кВт/м}^2\text{К}$ для различных объемов резервуара

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сжиженный природный газ. Физико-химические и эксплуатационные свойства. Справочник / под ред. И.Л. Ходоркова. – СПб.: Химиздат. 2003. – 292 с.
2. Кириллин В.А., Сычев В.В., Шейндлин А.Е. Техническая термодинамика. – М.: Наука, 1979. – 512 с.
3. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. – М.: Энергия, 1981. – 326 с.



ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ И РАДИОНАВИГАЦИОННОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

УДК 534.13; УДК 62-89

НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ ВРАЩАЮЩИХСЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

А.Ю. Щукин, ООО «ЦКТИ-Вибросейсм», Санкт-Петербург, e-mail: AShchukin@cvs.spb.su

П.Б. Забирохин, ООО «ЦКТИ-Вибросейсм», Санкт-Петербург, e-mail: PZabirokhin@cvs.spb.su

Представлены результаты, касающиеся разработки методики компьютерного моделирования механических испытаний вращающихся электрических машин в соответствии с требованиями правил российского морского регистра судоходства. Предложены рекомендации по выбору типа конечно-элементного анализа, заданию внешнего воздействия и обработки результатов расчета. Предложен алгоритм расчета поврежденности системы.

Ключевые слова: вращающиеся электрические машины, испытания, расчет, моделирование, виброустойчивость, вибропрочность, удароустойчивость, ударопрочность.

SOME ASPECTS OF MECHANICAL TESTS COMPUTER SIMULATION OF ROTATING ELECTRICAL MACHINES

A.Y. Shchukin, CKTI-Vibroseism Ltd. (CVS), St. Petersburg, e-mail: AShchukin@cvs.spb.su

P.B. Zabirokhin, CKTI-Vibroseism Ltd. (CVS), St. Petersburg, e-mail: PZabirokhin@cvs.spb.su

The article specifies the results as regards development of methods of computer simulation during mechanical tests of rotating electrical machines in compliance with the Rules of Russian Maritime Register of Shipping. The selection guidelines for the type of finite element analysis, assignment of external action and processing the calculation results. An algorithm for calculating the system damage (vulnerability) is proposed.

Keywords: rotating electrical machines, simulation of tests, vibration resistance, shock resistance, impact-resistance.

ВВЕДЕНИЕ

Статья посвящена некоторым аспектам методики компьютерного моделирования механических испытаний вращающихся электрических машин (ВЭМ) в соответствии с требованиями Правил технического наблюдения за постройкой

судов и изготовлением материалов и изделий для судов (том 2, часть IV, раздел 10, [1]) Регистра. На основании положений этой методики должны быть разработаны предложения по доработке названных правил, предусматривающие включения в них положений, допускающих замену натурных механических испытаний соответствующими

расчетами. Замена натурных испытаний расчетом позволит существенно сократить расходы на обоснование прочности и работоспособности ВЭМ в условиях динамических нагрузок, а также оценить прочность и работоспособность ВЭМ, испытания которых, вследствие их технических характеристик (веса, габаритов), невозможны либо крайне сложны для реализации. Актуальность проблемы подтверждается появляющимися в последнее время работами, связанными с численным моделированием ВЭМ. Например, в [2] на примере расчета асинхронного тягового двигателя и сравнения результатов с экспериментальными данными показано, что подход, связанный с численным моделированием, экономичен и более информативен по сравнению с традиционными экспериментальными методами.

1. ОБЗОР ТРЕБОВАНИЙ ПРАВИЛ РС К ИСПЫТАНИЯМ ВЭМ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ

ВЭМ в соответствии с требованиями [1] подвергаются следующим видам механических испытаний:

- на обнаружение резонансных частот;
- на вибропрочность;
- на виброустойчивость;
- на ударопрочность;
- на удароустойчивость.

При использовании компьютерного моделирования обнаружение резонансных частот заменяется расчетом собственных частот и форм колебаний изделия в диапазоне частот от 2 до 80 Гц – модальным анализом системы.

На основе результатов модального анализа решаются следующие задачи:

оцениваются условия наличия резонанса в заданном диапазоне частот;

определяются поддиапазоны частот, в которых проводятся расчеты на вибрационные воздействия;

определяется длительность ударных импульсов.

При моделировании испытаний на вибропрочность задаются режимы вибрации с постоянной амплитудой и изменяющейся во времени частотой воздействия. Поддиапазоны частот, амплитуды перемещений, ускорений и время испытаний (для проведения конечно-элементных (КЭ) расчетов) для каждого поддиапазона приведены в табл. 1.

Целью испытаний на виброустойчивость, которые, в отличие от испытаний на вибропрочность, проводятся в рабочем состоянии, является оценка виброустойчивости изделия, его узлов и деталей при вибрационном механическом воздействии. При испытаниях на виброустойчивость, помимо оценки прочности элементов, выполняется анализ зазоров между ротором и статором, несущей способности упорных и опорных подшипников.

Таблица 1
Испытания на вибропрочность. Параметры режимов

Поддиапазон частот, Гц		Параметры			
		Амплитуда, мм	Ускорение, g		Время, ч
2	8	1,4	0,02	0,36	450
8	16	0,7	0,18	0,72	220
16	31,5	0,35	0,36	1,4	110
-	30*	0,35	0,8	3,2	110
31,5	63	0,2	1,8	3,1	55
63	80	0,12	0,02	0,36	25

* При отсутствии резонанса рекомендуется проверка на частоте 30 Гц.

Поддиапазоны частот и амплитуды для испытаний на виброустойчивость (для проведения КЭ расчетов) приведены в табл. 2.

Таблица 2
Испытания на виброустойчивость. Параметры режимов

Поддиапазон частот, Гц		Параметры			
		Амплитуда, мм	Ускорение, g	Время, ч	Число циклов
f_1	f_2	A			
2	8	1,0	$A(2\pi f_r)^2$	2	$7200f_r$, где f_r – резонансная частота, Гц
8	16	0,5			
16	31,5	0,25			
31,5	63	0,15			
63	80	0,1			
$f = 30$ Гц, если нет резонанса		0,25	0,905	2	$2,16 \cdot 10^5$

При расчете на виброустойчивость учитываются нагрузки, действующие на элементы ВЭМ в рабочем состоянии, которое при механических испытаниях соответствует режиму работы ВЭМ на холостом ходу.

Целью испытаний на ударопрочность является оценка напряженного состояния изделия, его узлов и деталей при ударном механическом воздействии.

Длительность действия ударного ускорения задается в соответствии с низшей собственной частотой изделия (ВЭМ) [1]. Характеристики ударного импульса ускорения (для проведения КЭ расчетов) приведены в табл. 3.

Таблица 3
Длительность ударного ускорения

Значение низшей резонансной частоты, Гц	Длительность ударного импульса, мс	Испытания	
		Ударопрочность	Удароустойчивость
До 60	18	334 удара в каждом направлении, интенсивность 7 g	7 ударов в каждом направлении, интенсивность 5 g
60 – 100	11		
100 – 200	6		
200 – 500	3		

Целью испытаний на удароустойчивость является оценка прочности изделия, его узлов и деталей при ударном воздействии, а также анализ зазоров между ротором и статором, несущей способности упорных и опорных подшипников.

Расчет на удароустойчивость подразумевает одновременное действие нагрузок при работе ВЭМ на холостом ходу и ударных нагрузок. Параметры ударного воздействия при моделировании испытаний на удароустойчивость (интенсивность ускорения и количество ударов) задается также по табл. 3.

2. ВЫБОР ТИПА АНАЛИЗА ПРИ ЧИСЛЕННОМ МОДЕЛИРОВАНИИ

При моделировании вибрационного воздействия с использованием прямого динамического (*Transient*) анализа возможен учет в расчетной модели нелинейных характеристик отдельных элементов конструкции (зазоров, нелинейной жесткости подшипников, виброизоляции и т.д.). Однако выполнение расчетов в такой постановке требует большого машинного времени для расчетов и больших объемов памяти.

В качестве альтернативы может быть рекомендован метод гармонического анализа. Численные эксперименты показывают, что гармонический (*Harmonic*) анализ дает на резонансных частотах чуть более консервативный результат, что обосновывает возможность использования гармонического анализа в качестве базового метода определения отклика системы при расчете на вибрационное воздействие. На рис. 1 в качестве иллюстрации приведены графики осевого

перемещения конца ротора для случая осевой нагрузки длительностью 1 мин с интервалом изменения частоты от 16 до 31,5 Гц (динамический анализ для сокращения времени проведен для диапазона частот 18 – 22 Гц).

Для удобства сравнения по оси абсцисс для обоих типов анализа отложены значения изменяющейся частоты. При динамическом анализе ротор совершает непрерывные колебания с изменяющейся во времени амплитудой колебаний, что отражено на рисунке, а в случае гармонического анализа могут быть получены сразу значения амплитуды ответных колебаний в рассматриваемом поддиапазоне.

3. ЗАДАНИЕ ДЕМПФИРОВАНИЯ В ЭЛЕМЕНТАХ КОНСТРУКЦИИ

Важным параметром, определяющим ответную реакцию конструкции на заданное динамическое воздействие, является демпфирование.

В качестве характеристики демпфирования регламентируется величина относительного демпфирования ξ в долях от критического [3].

При прямом динамическом анализе ВЭМ может быть рекомендовано рэлеевское демпфирование [4], для которого матрица диссипации имеет вид

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K], \quad (1)$$

где $[M]$ и $[K]$ – соответственно матрицы масс и жесткостей системы;

α и β – коэффициенты, которые позволяют задать затухание в системе для заданного диапазона частот.

В соответствии с рекомендациями в ГОСТ 17516.1-90 для конструкций (сварных или на

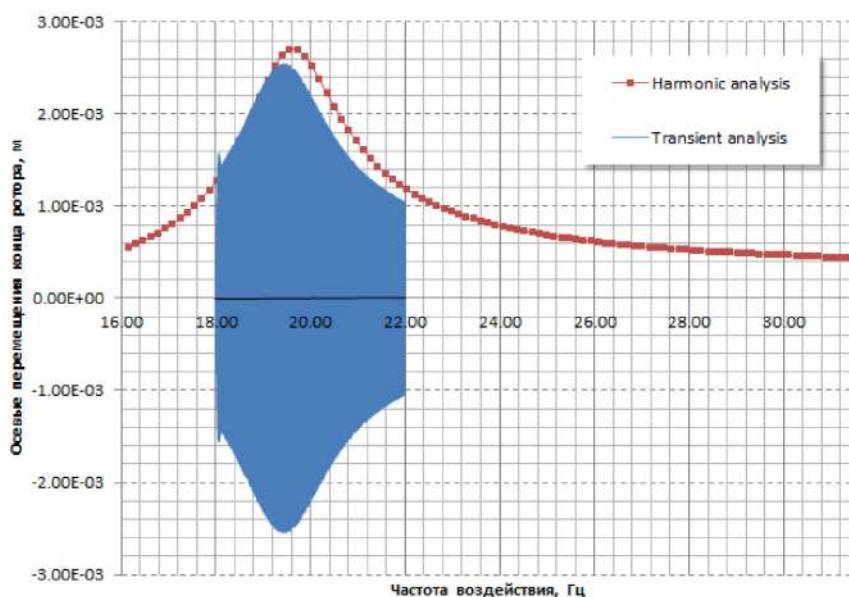


Рис. 1 Сравнение прямого интегрирования (*Transient*) и гармонического (*Harmonic*) анализа

болтах) в зависимости от уровня напряжений в конструкции при динамических воздействиях задаются следующие параметры демпфирования [3]:

- $\xi = 4\%$ при уровне напряжений $(0,25 - 0,5) \sigma_T$;
- $\xi = 7\%$ при уровне напряжений $(0,5 - 1,0) \sigma_T$.

В табл. 4 приведены значения коэффициентов α и β в зависимости уровня демпфирования от частоты $F(f_k)$ для диапазонов частот в соответствии с требованиями [1]. Характерный график, иллюстрирующий зависимость демпфирования от частоты в конструкции при задании рэлеевского демпфирования, приведен на рис. 2.

Таблица 4
Рекомендуемые расчетные параметры демпфирования

Диапазон частот	Уровень напряжений	ξ	α	β
2 – 8	$(0,25 - 0,5) \sigma_T$	0,04	0,804	1,273E-3
	$(0,5 - 1,0) \sigma_T$	0,07	1,407	2,228E-3
8 – 16	$(0,25 - 0,5) \sigma_T$	0,04	2,681	5,305E-4
	$(0,5 - 1,0) \sigma_T$	0,07	4,691	9,264E-4
16 – 31,5	$(0,25 - 0,5) \sigma_T$	0,04	5,333	2,681E-4
	$(0,5 - 1,0) \sigma_T$	0,07	9,334	4,691E-4
31,5 – 63	$(0,25 - 0,5) \sigma_T$	0,04	10,556	1,347E-4
	$(0,5 - 1,0) \sigma_T$	0,07	18,473	2,358E-4
63 – 80	$(0,25 - 0,5) \sigma_T$	0,04	17,716	8,904E-5
	$(0,5 - 1,0) \sigma_T$	0,07	31,003	1,558E-4

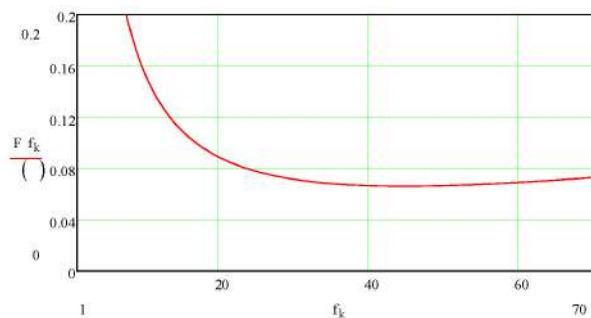


Рис. 2 Демпфирование в системе ($\xi = 0,07$) в поддиапазоне 31,3 – 63 Гц

В случае гармонического анализа возможно задание постоянного демпфирования (4 % или 7 % в соответствии с [3]) во всем диапазоне частот.

4. РАСЧЕТ ПОВРЕЖДЕННОСТИ В ДЕТАЛЯХ ВЭМ

Как известно, в случае нерегулярного нагружения, долговечность конструкции оценивается с использованием повреждения, накопленного в ней, которое

вычисляется как отношение расчетного числа циклов до разрушения к числу циклов, моделирующих механические испытания ВЭМ при заданном режиме испытаний.

В общем случае, если каждый i -й цикл в рассматриваемом процессе нагружения конструкции повторяется n_i раз, при описании повреждения, накопленного в конструкции, в инженерной практике используется правило линейного суммирования повреждений (правило Пальмгрена–Минера). Согласно данному правилу повреждение, накопленное в опасной точке, определяется по формуле (2) [4 – 6]:

$$a = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i}, \quad (2)$$

где k – число различных амплитуд напряжений в процессе нагружения;

n_i – число повторений амплитуды σ_i в процессе нагружения;

N_i – число циклов до разрушения при амплитуде напряжения σ_i , определяемое по кривой усталости для рассматриваемой детали.

В качестве кривой усталости для углеродистых сталей может быть рекомендовано степенное уравнение Веллера [4, 7]:

$$N(\sigma) = N_G \left(\frac{\sigma_{-1}}{\sigma} \right)^m, \quad (3)$$

где σ_{-1} , N_G , m – константы материала;

$N(\sigma)$ – зависимость числа циклов до разрушения от амплитуды напряжения.

В качестве примера на рис. 3 приведен характерный график осевого перемещения ротора при ударном воздействии ($t = 0,018$ с – длительность импульса). Зависимости для напряжений в критических точках конструкции имеют аналогичный вид.

Особенностью компьютерного моделирования испытаний на ударпрочность является то обстоятельство, что при выполнении расчетов в случае, когда колебания конструкции от двух соседних импульсов не накладываются друг на друга, достаточно выполнить расчет на один импульс, так как при последующих приложениях расчетной ударной нагрузки картина колебаний повторяется.

Анализ расчетов на ударные нагрузки показывает, что при заданном в соответствии с [3] затухании в конструкции обычно достаточно учесть поврежденность от первых двух пиков колебаний после каждого из $N = 334$ ударов (см. табл. 3). Консервативно можно принять, что в этом случае амплитуда напряжений не должна превосходить величины, соответствующей общему количеству циклов $N_p = 2 \cdot 334$, определенной по построенной кривой усталости детали.

Более точную оценку может дать суммирование по формуле (2) поврежденностей от каждой группы нагружения, соответствующей различным пикам напряжений σ_i в затухающем процессе после ударного воздействия.

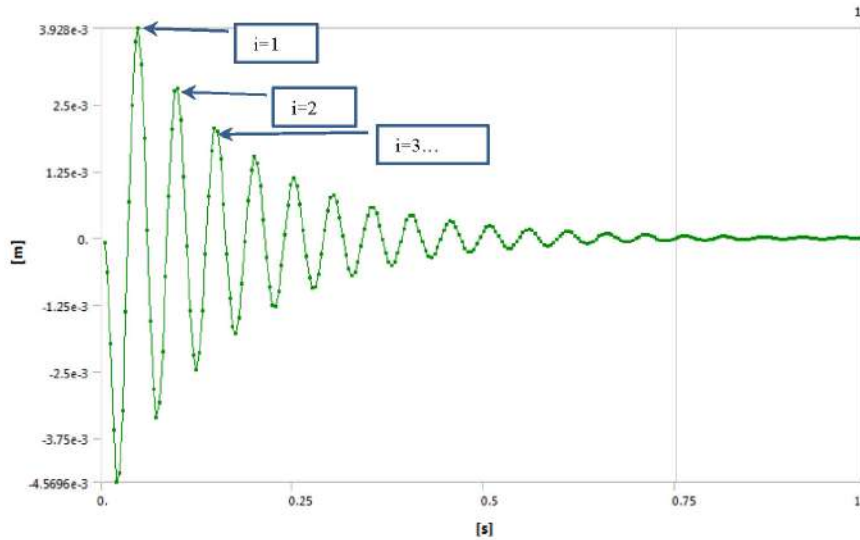


Рис. 3 Затухание осевых перемещений ротора при ударном воздействии

В случае одночастотных затухающих колебаний с коэффициентом демпфирования ξ имеем:

$$\sigma_i = \sigma_{\max} e^{-(i-1)\delta}, \quad (4)$$

где $\sigma_{\max}$ – максимальная амплитуда напряжений в ходе затухающих колебаний после удара;

δ – логарифмический декремент затухания, связанный с относительным демпфированием (при малом демпфировании) ξ соотношением

$$\delta = 2\pi\xi. \quad (5)$$

Тогда, подставляя (4) в (3), а (3) в (2) для суммарной поврежденности, получаем:

$$\begin{aligned} a &= \sum_{i=1}^k n N_G^{-1} \left(\frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{-1}} \right)^m e^{-(i-1)\delta m} = \\ &= \frac{n}{N_G} \left(\frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{-1}} \right)^m \sum_{i=1}^k e^{-(i-1)\delta m} = \\ &= \frac{n}{N_G} \left(\frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{-1}} \right)^m \frac{1 - e^{-k\delta m}}{1 - e^{-\delta m}}, \end{aligned} \quad (6)$$

где k число учитываемых пиков определяется условием: $\sigma_k > \sigma_{-1}$; $\sigma_{k+1} < \sigma_{-1}$.

Устремляя в (6) k в бесконечность, получаем, с учетом (5), консервативную оценку для поврежденности в случае ударной нагрузки:

$$a = \frac{n}{N_G} \left(\frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{-1}} \right)^m (1 - e^{-2\pi\xi m})^{-1}. \quad (7)$$

В (7) коэффициент выражает влияние всех пиков колебаний, следующих за первым максимумом.

Для вибрационного воздействия в пределах рассматриваемых поддиапазонов частот амплитуда перемещений и напряжений обычно носит нерегулярный циклический характер (см. рис.1).

При таком характере изменения напряжений в элементе конструкции для оценки накопленной повреждаемости могут быть использованы следующие данные:

- зависимость между числом циклов до разрушения N и амплитудой напряжений σ в виде функции $N(\sigma)$;

- зависимость напряжения от частоты вынужденных колебаний системы f в виде $\sigma = \sigma(f)$.

Тогда, в предположении линейного суммирования повреждений, можно определить полную поврежденность в интересующей точке при прохождении системой резонанса колебаний для изменяющейся во времени частоты внешнего возбуждения.

Допустим, что частота воздействия меняется от f_1 до f_2 за время T . Зависимость частоты f от времени t не регламентируется и возможно использование различных зависимостей. Как правило, при испытаниях используется степенная зависимость вида

$$f(t) = (f_2/f_1)^{t/T} f_1. \quad (8)$$

В общем случае найдем связь между малым приращением частоты df и приращением времени dt :

$$dt = t_f'(f) df. \quad (9)$$

Для поврежденности a напомним дифференциальное уравнение [4]:

$$\frac{da}{dN} = \frac{1}{N(\sigma)}. \quad (10)$$

Отсюда для приращения поврежденности da за малый промежуток времени dt из зависимостей (8) и (9) находим:

$$da = \frac{dN}{N(\sigma)} = \frac{f \cdot dt}{N(\sigma)} = \frac{t'_f \cdot f \cdot df}{N(\sigma)}. \quad (11)$$

Тогда для поврежденности, накопленной за все время процесса, получаем выражение в виде интеграла в частотном диапазоне:

$$a = \int_{f_1}^{f_2} \frac{t'_f(f) f}{N[\sigma(f)]} \cdot df. \quad (12)$$

Для степенной зависимости после подстановки (3) в выражение (12) получаем:

$$a = \frac{T}{\ln(f_2/f_1)} \int_{f_1}^{f_2} \frac{df}{N[\sigma(f)]}. \quad (13)$$

При моделировании многократного изменения частоты (длительности испытаний) от f_1 до f_2 , в качестве T в (13) подставляем полное время испытаний.

Для кривой усталости (3) из (13) получим:

$$a = \int_{f_1}^{f_2} \frac{T}{N[\sigma(f)] \ln(f_2/f_1)} df = \frac{T}{N_G \sigma_{-1}^m \ln(f_2/f_1)} \int_{f_1}^{f_2} \sigma^m(f) df. \quad (14)$$

5 ЗАДАНИЕ ВНЕШНЕГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Важным вопросом моделирования механических испытаний является вопрос, связанный с численным заданием внешнего воздействия.

Интенсивность ударного импульса Ia с учетом значения низшей резонансной частоты может быть задана с использованием зависимости

$$Ia(t) = Iasin(\pi \frac{t}{\tau}), \quad (15)$$

где τ – длительность ударного импульса, с.

Графики ударных импульсов для моделирования испытаний на ударопрочность для различных значений низшей резонансной частоты приведены на рис. 4. Для расчета на удароустойчивость графики на рис. 4 масштабируются для приведения к максимальному ускорению 5g.

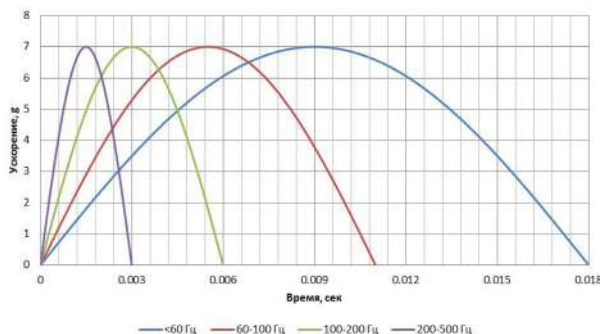


Рис. 4 Ударные импульсы при испытаниях на ударопрочность

В случае применения метода прямого динамического анализа при задании вибрационного

воздействия при расчетах на вибропрочность необходимо корректное задание этого воздействия (перемещения или ускорения) в виде периодической функции с изменяющимся во времени периодом. Зададимся видом внешнего воздействия:

$$x(t) = A \sin(\varphi(t)). \quad (16)$$

Здесь $\varphi(t)$ – пока неопределенная функция, зависящая от требуемой зависимости круговой частоты от времени $2\pi f = \omega = \omega(t)$; A – амплитуда перемещений, задаваемая в соответствии с данными табл. 1 и 2.

Для функции, заданной в виде (16), определим значение круговой частоты ω для произвольного значения времени $t = t^*$.

Предположим, что функция $x(t)$ представима в виде:

$$x(t) = A \sin[\omega(t - t^*) + a + \delta(t - t^*)], \quad (17)$$

где ω, a – константы;

$\delta(t - t^*)$ – функция, бесконечно-малая второго порядка в окрестности $t = t^*$.

В этом случае круговая частота колебаний функции $x(t)$ в окрестности $t = t^*$ близка к значению ω , а период колебаний, соответственно, к величине $2\pi/\omega$.

Константы ω, a определяются из разложения функции $f(t)$ в степенной ряд в окрестности точки $t = t^*$: $a = \varphi(t^*)$; $\omega(t) = \varphi'(t)$.

Таким образом, круговая частота колебаний функции $x(t)$ определяется как функция от времени:

$$\omega(t) = \varphi'(t). \quad (18)$$

Теперь, для определения вида функции $\varphi(t)$ по известной $\omega(t)$, необходимо применить вместо операции дифференцирования операцию интегрирования:

$$\varphi(t) = \int_0^t \omega(\tau) d\tau \quad (19)$$

(предполагаем, что для $t = 0$ $x(t) = 0$).

Подставляя формулу (19) в формулу (16) для степенной функции (8) имеем:

$$A(t) = A \sin \left\{ \frac{2\pi f_1 T_r [(f_2/f_1)^{t/T_r} - 1]}{\ln(f_2/f_1)} \right\}. \quad (20)$$

Формулы (16), (19) могут быть использованы и для случая зависимости частоты от времени, отличной от зависимости (8).

С точки зрения расчета долговечности, случай прямого динамического анализа может быть аналогичен случаю гармонического анализа с той лишь разницей, что функция $\sigma(f)$ задается как огибающая соответствующей зависимости напряжения от частоты (аналогичной зависимости, представленной на рис. 1).

6 ПРОЦЕДУРА МОДЕЛИРОВАНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ ВЭМ

Процедура компьютерного моделирования механических испытаний ВЭМ проиллюстрирована на схеме – см. рис. 5. На ней показаны все основные этапы расчета от получения исходных данных (чертежей и 3D-моделей элементов) до оценки критериев (коэффициентов запаса и повреждаемости).

ВЫВОДЫ

Современные численные методы позволяют разработать детальную методику компьютерного моделирования механических испытаний ВЭМ в соответствии с требованиями правил Регистра.

Моделирование вынужденных колебаний ВЭМ позволяет оценить динамическое состояние, вибрационную прочность и долговечность элементов конструкции ВЭМ при заданных условиях испытаний.

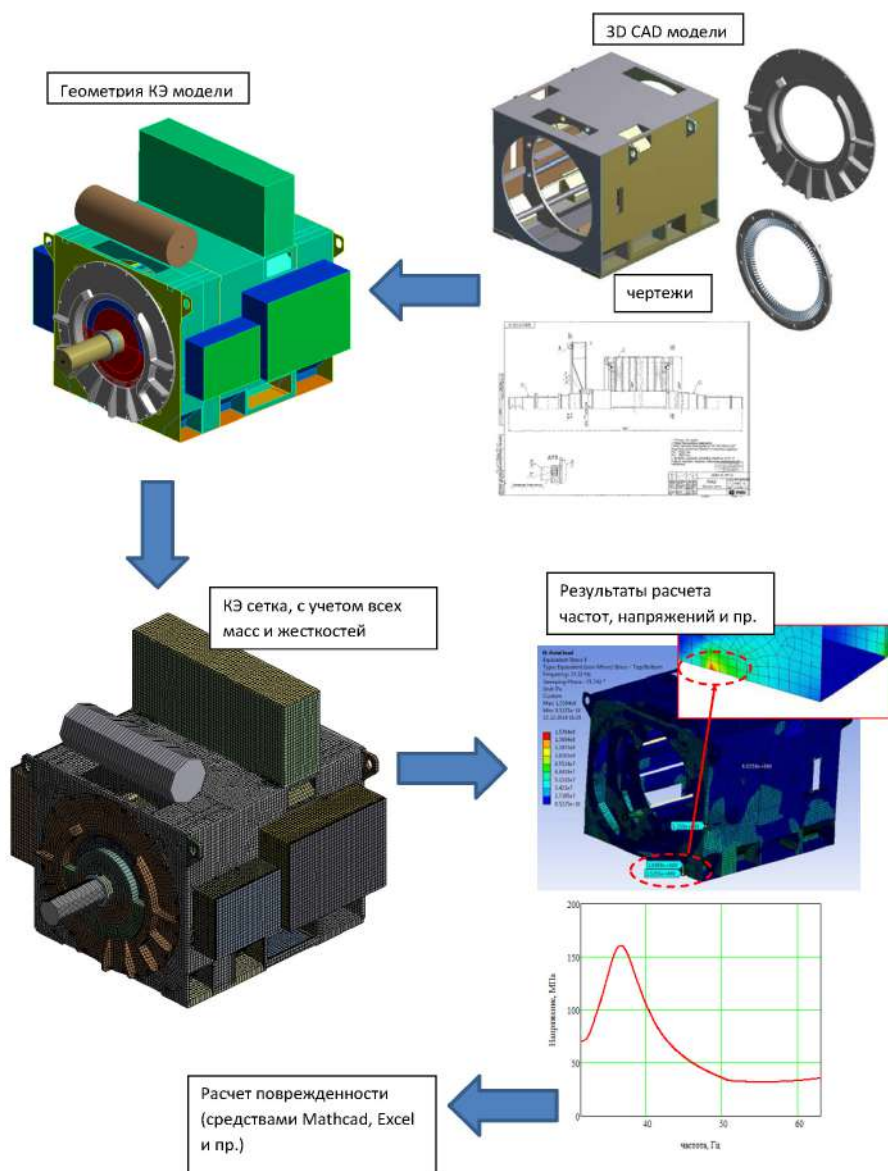


Рис. 5 Схема компьютерного моделирования испытаний ВЭМ

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила технического наблюдения за постройкой судов и изготовлением материалов и изделий для судов. Т.1.– СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2015.
2. Бояршинов М.Г., Трушков В.А. Вычислительное моделирование динамических и прочностных характеристик механического оборудования // Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы современного машиностроения». – Юрга, 11–12 декабря 2014 г.
3. ГОСТ 17516.1-90. Изделия электротехнические. Общие требования в части стойкости к механическим внешним воздействующим факторам.
4. Когаев В.П. Расчет на прочность при напряжениях, переменных во времени. – М.: Машиностроение, 1993.
5. Трошенко В.Т., Сосновский Л. А. Сопротивление усталости металлов и сплавов: справочник. – Киев: Наукова думка, 1987.
6. Ануриев В.И. Справочник конструктора-машиностроителя в 3 т. Т.1, 8-е изд. / под. ред. И.Н. Жестковой. – М.: Машиностроение, 2001.
7. Когаев В.П., Махутов Н.А. Гусенков А.П. Расчет деталей машин и конструкций на прочность и долговечность: справочник. – М.: Машиностроение, 1985.

УДК 629.12.066

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ ОПТИМАЛЬНОЙ СУШКИ ИЗОЛЯЦИИ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ СУДОВ ПО ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕЙ ТЕХНОЛОГИИ

В.М. Приходько, канд. техн. наук, проф., ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова, г. Санкт-Петербург
И.В. Приходько, аспирант, ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова, г. Санкт-Петербург,
e-mail: wslwsl@yandex.ru

Разработано математическое обеспечение для ресурсосбережения, снижения энергозатрат, повышения эффективности, интенсификации и оптимизации технологических режимов процесса прогрева, подсушки, сушки, восстановления сопротивления изоляции увлажненных обмоток судовых асинхронных двигателей после зимнего отстоя речных судов, при судоремонте, а также в эксплуатационных условиях на водном транспорте.

Ключевые слова: судовые асинхронные двигатели, тиристорные преобразователи, система дифференциальных уравнений.

MATHEMATICAL BASIS FOR EFFECTIVE SHIP ELECTRICAL INSULATION DRYING SUBJECT TO ENERGY SAVING SOLUTIONS

V.M. Prikhodko, PhD, professor, FSEI Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, St. Petersburg
I.V. Prikhodko, postgraduate, FSEI Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
e-mail: wslwsl@yandex.ru

The developed software (mathematical basis) has been reviewed for cost-effective use of resources, saving energy costs, efficiency enhancement, intensification and optimization of operating schedule of warm-up process modes, predrying, drying, insulation resistance buildup for the ships' dampened asynchronous motor windings after the river ships's wintering, anchorage during shiprepair as well as under service conditions in the water transport industry.

Keywords: asynchronous motors, thyristor converter, differential equation system.

В настоящее время разработаны портативные универсальные тиристорные преобразователи с перестраиваемыми структурами силовых вентиляльных модулей, обеспечивающие ресурсосбережение, снижение затрат энергии, повышение эффективности, интенсификацию и оптимизацию технологических процессов контрольного прогрева, подсушки, сушки и восстановления сопротивления

изоляции увлажненных обмоток судового электрооборудования, которые проводятся после зимнего отстоя речных судов, при судоремонте, а также в эксплуатационных условиях на водном транспорте [1–3]. Для судостроения и судоремонта рекомендован инновационный способ безразборной сушки увлажненных обмоток судовых асинхронных двигателей (АД) электрическим током, управляемым

На рис. 2 и 3 даны экспериментальные и расчетные по системе уравнений (1) данные для АД типа 4AX90L4Y3 номинальной мощностью 2,2 кВт. Экспериментальные и расчетные данные с достаточной точностью совпадают. Однако необходима дальнейшая корректировка методики расчета с учетом экспериментальных данных, так как тепловые связи между статорной обмоткой и пакетом частей статора зависят от качества пропитки обмоток, которая может быть разной. Поэтому необходимо проводить дальнейшие исследования, чтобы уточнить достоверность характера процесса нагрева исправной обмотки.

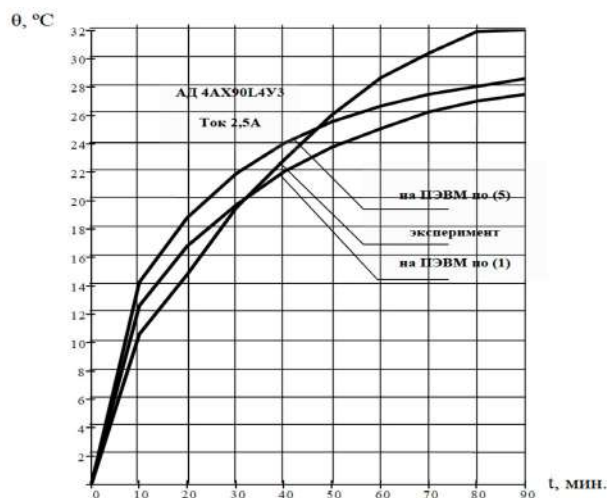


Рис. 2 Нагрев обмоток судового АД постоянным током 2,5А, регулируемым тиристорным преобразователем

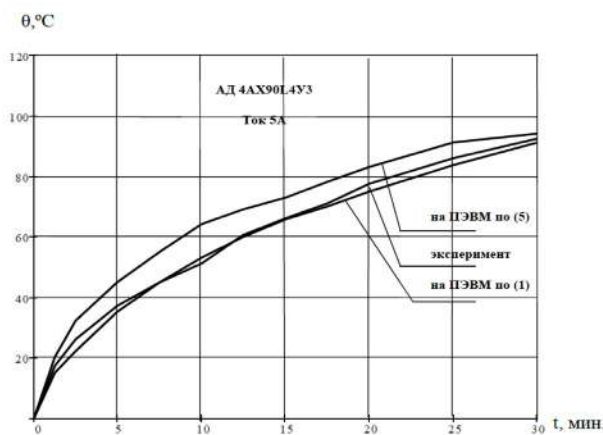


Рис. 3 Нагрев обмоток судового АД постоянным током 5А, регулируемым тиристорным преобразователем

При рассмотрении только качественной стороны теплового процесса в АД целесообразно упростить систему уравнений (1) таким образом, чтобы получить ее аналитическое решение.

Такое относительно простое решение получается, если рассматривать систему двух тел — обмотки статора и корпуса с магнитопроводом статора с учетом теплоотдачи от корпуса и лобовых частей обмотки статора в окружающую среду.

Система дифференциальных уравнений для этого случая имеет вид:

$$\begin{aligned} \frac{d\theta_1}{dt} C_1 + (\theta_1 - \theta_2) a_{12} + \theta_1 a_{10} &= P_1; \\ \frac{d\theta_2}{dt} C_2 + (\theta_2 - \theta_1) a_{12} + \theta_2 a_{20} &= P_2, \end{aligned} \quad (4)$$

где 1 — обмотка статора;

2 — магнитопровод и корпус статора;

a_{10} , a_{20} — теплоотдача в окружающую среду от лобовых частей обмотки статора и корпуса, Вт/град.

Решение системы уравнений (4) следующее:

$$\begin{aligned} \theta_{1у\text{ст}} &= \frac{P_1(a_{20} + a_{12})}{a_{10}a_{20} + a_{10}a_{12} + a_{20}a_{12}}, \text{ К}; \\ \theta_{2у\text{ст}} &= \frac{P_1}{a_{20}} - \theta_{1у\text{ст}} = \frac{a_{10}}{a_{20}}, \text{ К}; \\ T_1 &\approx \frac{C_1}{a_{10} + a_{12}}, \text{ с}; \\ T_2 &\approx \frac{C_1(a_{10} + a_{12})}{a_{10}a_{20} + a_{10}a_{12} + a_{20}a_{12}}, \text{ с}; \\ \theta_{11} &= \frac{(P_1/C_1)T_1T_2 - \theta_{2у\text{ст}}T_2}{T_1 - T_2}, \text{ К}; \\ \theta_{21} &= \frac{(P_2/C_1)T_1T_2 - \theta_{2у\text{ст}}T_2}{T_1 - T_2}, \text{ К}; \end{aligned} \quad (5)$$

$$\theta_{12} = \theta_{1у\text{ст}} - \theta_{11}, \text{ К};$$

$$\theta_{22} = \theta_{2у\text{ст}} - \theta_{21}, \text{ К};$$

$$\theta_1 = \theta_{11}(1 - e^{-t/T_2}) + \theta_{12}(1 - e^{-t/T_1}), \text{ К};$$

$$\theta_2 = \theta_{21}(1 - e^{-t/T_2}) + \theta_{22}(1 - e^{-t/T_1}), \text{ К};$$

где T_1 , T_2 — постоянные времени процесса, с;

$\theta_{1у\text{ст}}$, $\theta_{2у\text{ст}}$ — установившиеся превышения температуры, К.

На рис. 2 и 3 показаны кривые нагрева обмоток статора судового АД постоянным током, регулируемым тиристорным преобразователем, в сравнении с опытными и расчетными данными по системам уравнений (1) и (5), где видно, что точность расчетов по выражению (5) для больших токов ниже. Однако выражение (5) после соответствующей корректировки по опытным данным может служить основой для управления процессом нагрева АД в режиме прогрева, подсушки, сушки с помощью микропроцессора с учетом допустимой погрешности.

Для обеспечения поставленных задач были проведены исследования процессов внутреннего тепломассопереноса в увлажненной изоляционной

системе при управляемом токовом нагреве статорных обмоток электродвигателей судового исполнения.

Теоретически обоснован и разработан инновационный энергосберегающий рациональный способ повышения эффективности и увеличения интенсивности токовой сушки изоляции отсыревших обмоток АД при судоремонте на судостроительно-судоремонтных предприятиях.

В связи с тем, что за основу принят способ сушки постоянным током, было проведено изучение электрических характеристик обмоток судовых АД, получивших наибольшее распространение в отрасли.

На рис. 4 и 5 представлены экспериментальные характеристики нагрева обмоток статоров судовых АД новой серии 4А током с номинальной мощностью 1,1 и 2,2 кВт, как в собранном виде, так и только одного статора, при пропускании через обмотки постоянного тока различного значения, управляемого тиристорным преобразователем переносного типа.

ВЫВОДЫ

Получена серия графиков нагрева судовых АД различной мощности токами, величина которых регулируется с помощью переносного тиристорного преобразователя.

При разработке способа и устройств ускоренной сушки изоляции увлажненных обмоток в процессе экспериментальных исследований определены:

$\theta, ^\circ\text{C}$

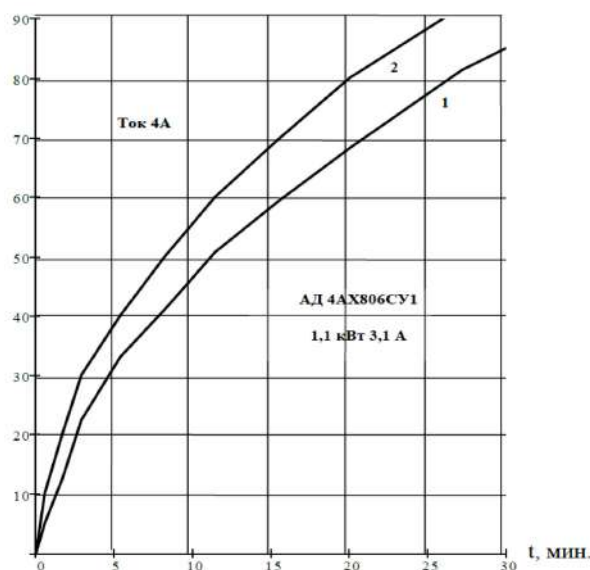


Рис. 4 Нагрев обмоток статора АД постоянным током мощностью 1,1 кВт, управляемым с помощью тиристорного преобразователя:

1 — АД в сборе; 2 — только статора АД

- температурное поле АД;
- предельно допустимая величина тока при форсированном режиме;

- величины напряжения, активной мощности, времени и расхода электрической энергии при сушке.

Предложенное аналитическое определение параметров управляемого токового безразборного контрольного прогрева изоляции судовых АД по разработанной структурной схеме с реализацией на ПЭВМ соответствует наиболее оптимальному методу решения проблемы. Создан алгоритм и реализована на ПЭВМ рабочая программа, составленные на основе разработанной теплофизической модели, для исследования тепловых процессов в судовых АД при контрольном прогреве, подсушке, сушке и восстановлении сопротивления изоляции увлажненных обмоток статоров.

Выбор оптимальных параметров безразборной управляемой токовой сушки изоляции увлажненных обмоток АД на штатном месте установки без демонтажа с судов необходимо производить посредством расчетов на разработанной математической модели, реализованной в виде рабочей программы ПЭВМ, с учетом оценки величин токов и тепловыделений.

Проведенные исследования также могут найти применение в отрасли водного транспорта для широкого круга задач по определению температуры твердых сред, находящихся в непосредственном тепловом контакте.

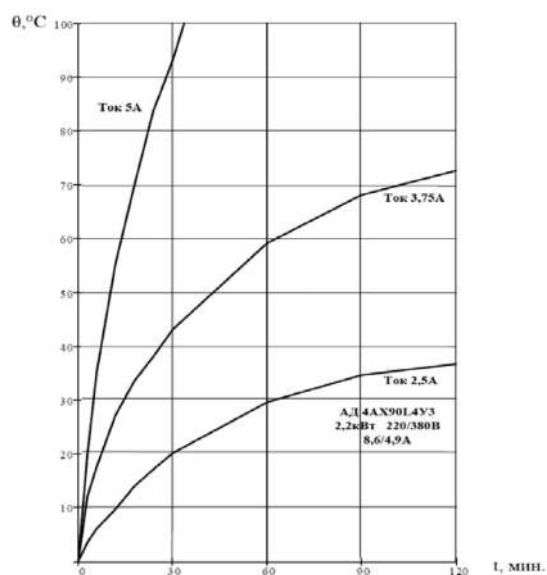


Рис. 5 Нагрев обмоток статора АД постоянным током мощностью 2,2 кВт, управляемым с помощью тиристорного преобразователя

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Приходько В.М. Портативный тиристорный преобразователь с перестраиваемой структурой / В.М. Приходько // Труды II Международного научно – технического семинара «Исследование, проектирование и эксплуатация судовых ДВС», 27 сентября 2007 г. – СПб.: СПГУВК, 2008. – С. 282 – 298.
2. Приходько В.М. Энергосберегающий универсальный тиристорный преобразователь / В.М. Приходько // Судостроение. – 2000. – №1. – С. 44–45.
3. Приходько В.М. Компактный универсальный тиристорный преобразователь с перестраиваемой структурой / В.М. Приходько, А.А. Адам, Е.Б. Логинов, Э.М. Огородов, А.М. Приходько // Наука и техника на речном транспорте. – 2001. – №7. – С. 17 – 24.
4. Приходько В.М. Методы и технические средства комплексных испытаний элементов судовых электроэнергетических систем в судостроении и судоремонте: научная монография / В.М. Приходько. – СПб.: ИПЦ СПГУВК, 2005. – 348 с.
5. Приходько В.М. Интенсификация комплексных испытаний судового электрооборудования по энергосберегающей технологии в судостроении и судоремонте: научная монография / В.М. Приходько. – СПб.: СПГУВК, 2013. – 244 с.
6. Приходько В.М. Новая технология пропитки и управляемой токовой сушки электродвигателей / В.М. Приходько // Морской транспорт. Экспресс – информация. Серия. Техническая эксплуатация флота и судоремонт. – М.: ГУП Мортехинформреклама, 2002. – Вып. 8 (920). – С. 1 – 11.
7. Приходько В.М. Переносный универсальный тиристорный преобразователь с перестраиваемой структурой / В.М. Приходько, В.И. Кравченко, А.М. Приходько // Промышленная энергетика. – 1999. – №4. – С.30 – 35.
8. Приходько В.М. Тиристорный преобразователь – регулятор универсального назначения / В.М. Приходько, В.И. Кравченко, А.М. Приходько // Промышленная энергетика. – 1994. – №5. – С.14 – 19.
9. Приходько А.М. Универсальный тиристорный преобразователь / А.М. Приходько, В.М. Приходько, В.И. Кравченко // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1999. – №4. – С. 13 – 15.
10. Гольберг О.Д. Проектирование электрических машин / О.Д. Гольберг, Я.С. Гудин, И.С. Свириденко. – М.: Высшая школа, 1984. – 430 с.

УДК 681.518.54

МОНИТОРИНГ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СУДОВОГО
ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

М.А. Максимова, канд. техн. наук, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербург, e-mail: MaximovaMA@yandex.ru

С.С. Рогов, магистр, ЗАО «Технические системы и технологии», Санкт-Петербург, e-mail: rogov_stas@tst-spб.ru

Рассматривается алгоритм обработки временных рядов контролируемых параметров судового энергетического оборудования, позволяющий прогнозировать время выполнения технического обслуживания судового энергетического оборудования по фактическому состоянию.

Ключевые слова: судовое энергетическое оборудование, техническое состояние, надежность, система технического диагностирования, мониторинг, алгоритм, прогнозирование работоспособности.

MONITORING OF TECHNICAL CONDITION OF THE SHIP'S POWER EQUIPMENT

M.A. Maksimova, PhD, FSEI State Marine Technical University of St. Petersburg, e-mail: MaximovaMA@yandex.ru

S.S. Rogov, MSc, "Engineering Systems and technologies" CSJC, St. Petersburg, e-mail: rogov_stas@tst-spб.ru

The article deals with the time-series data processing algorithm of the controlled parameters of the ship's power equipment. Such algorithm enables to organize the maintenance run-time prediction procedure of the ship's power equipment as per the actual technical state.

Keywords: ship's power equipment, technical state, reliability, technical diagnostics system, monitoring, algorithm, functionality prediction.

С точки зрения системотехники судовая энергетическая установка относится к классу сложных технических комплексов со стабильной структурой, связи и свойства которой определяются посредством комплектующего ее судового энергетического оборудования (СЭО) и практически

не изменяются в течение всего периода эксплуатации. Вместе с тем, как правило, в процессе эксплуатации качество функционирования таких комплексов со временем ухудшается и восстановительные мероприятия, проводимые в рамках принятой стратегии технического

обслуживания и ремонта, лишь частично снижают темп неизбежной деградации технического состояния.

В этой связи, в процессе эксплуатации особо важная роль отводится мониторингу технического состояния отдельного СЭО, способного идентифицировать работоспособность установки в целом. В данном аспекте под мониторингом технического состояния понимается единство четырех последовательно выполняемых и взаимосвязанных операций: индикации технического состояния (собственно диагностики); анализа результатов индикации по разработанным априори алгоритмам; прогнозирования изменения технического состояния с оценкой остаточного ресурса по времени и выработки стратегии по восстановлению работоспособности СЭО [1, 2].

Реализация указанных процедур предполагает наличие на борту системы технического диагностирования (СТД) судового энергетического оборудования, взаимодействующей по судовой информационной сети с комплексной системой управления судовыми техническими средствами (КСУ СТС).

В данной статье рассматривается вариант такой СТД, обеспечивающей выполнение перечисленных операций мониторинга на основе анализа виброактивности роторного СЭО. Конструктивным базисом, позволяющим формировать многоканальные СТД роторного СЭО, является четырехканальный блок обработки сигналов (БОС). Функциональная схема СТД на примере 16-канальной системы представлена на рис. 1. Принцип работы системы основан на приеме, измерении и обработке аппаратно-программными средствами электрических аналогов вибрации и частоты вращения роторов СЭО. Каждый БОС представляет собой высокопроизводительную локальную вычислительную систему асинхронной, параллельной обработки данных.

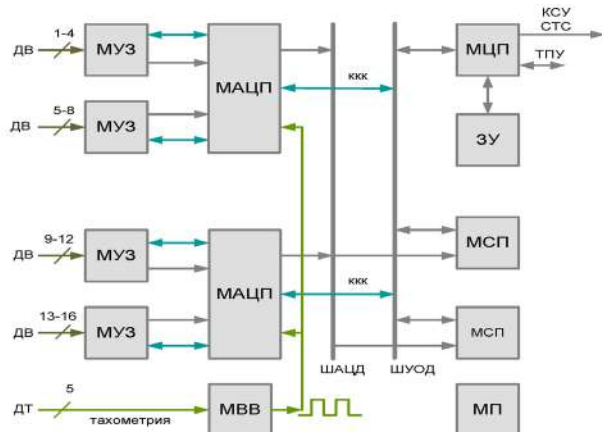


Рис. 1 Функциональная схема СТД

Сигналы от датчиков вибрации (ДВ), установленных в реперных точках контролируемых кинематических узлов СЭО, поступают на входы 4 канальных модулей усилителей зарядов (МУЗ). Сигналы частоты вращения роторов соответствующих кинематических узлов СЭО от тахометрических датчиков (ДТ) подаются на входы модуля ввода-вывода (МВВ), где они усиливаются и нормализуются по амплитуде и длительности. Полученная счетная последовательность импульсов, как и сигналов вибрации, поступает в модуль аналого-цифрового преобразования (МАЦП). Данные модули предназначены не только для преобразования аналоговых сигналов в цифровую форму, но также выполняют фильтрацию по частоте, привязку частоты вращения конкретного ротора к сигналу вибрации узла, вычисление параметров сигналов (например среднего квадратического значения), пакетирование полученных и предварительно обработанных данных.

Пакеты данных через внутреннюю интерфейсную плату (шина аналого-цифровых данных – ШАЦД и шина управления и обмена данными – ШУОД) поступают на модули сигнальных процессоров (МСП), предназначенных для поточной обработки данных: определения общего уровня вибрации, вибрации на частотах вращения, спектров сигналов вибрации и т.д. в соответствии с алгоритмами. Полученные данные результатов предварительной обработки поступают для дальнейшего анализа (собственно постановки диагноза, прогноза и т.п.) на модуль центрального процессора (МЦП). МЦП, кроме этого, обеспечивает управление энергонезависимым запоминающим устройством (ЗУ), связь с КСУ СТС, а также портативным технологическим пультом управления (ТПУ) на базе ноутбука. Основная функция ТПУ заключается в загрузке программного обеспечения в БОС с учетом кинематических параметров конкретного узла СЭО. Функциональная надежность СТД обеспечивается за счет самодиагностики измерительных трактов и наличия двукратно резервированного источника питания (МП).

Мониторинг технического состояния СЭО требует соответствующего алгоритмического обеспечения СТД. В общем алгоритмическое обеспечение представляет собой совокупность отдельных алгоритмов: контроля общего уровня вибрации СЭО; контроля вибрации отдельных узлов СЭО; анализа спектров сигналов вибрации узлов с целью постановки диагноза текущего технического состояния; прогнозирования технического состояния СЭО. На рис. 2 представлена обобщенная структура алгоритма прогнозирования технического состояния узла СЭО, являющегося модификацией алгоритма [4] в части его оптимизации.

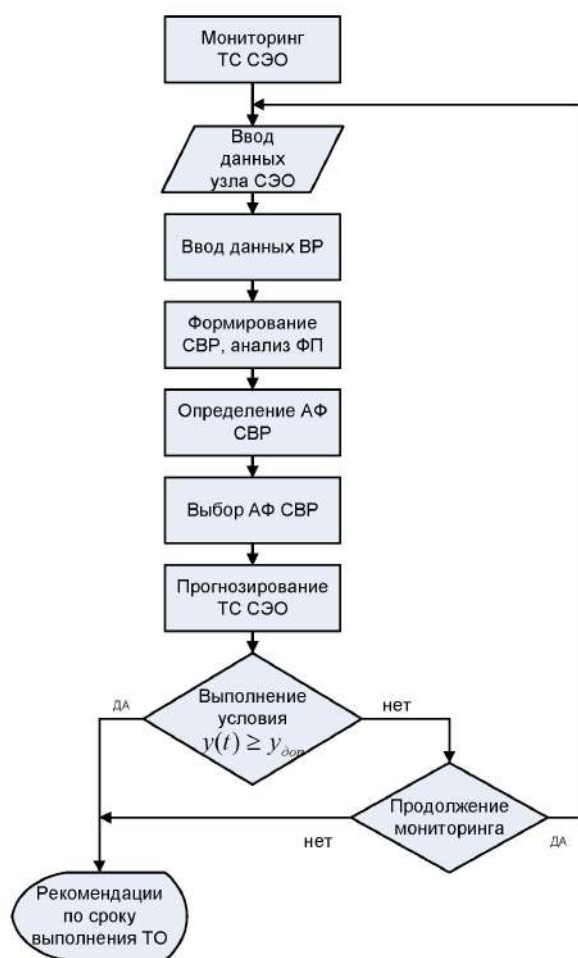


Рис. 2 Блок-схема алгоритма прогнозирования ТС узла СЭО

Рассмотрим последовательность операций, выполняемых данным алгоритмом. В блоке «Ввод данных узла СЭО» указывается название и наработка узла СЭО в часах. Последнее необходимо для привязки результата прогноза к времени эксплуатации СЭО. В блоке «Ввод данных ВР» размещаются запрошенные из ЗУ СТД данные временного ряда (ВР) значений вибрации $y(t)$. Блок «Формирование СВР, анализ ФП» преобразует исходный ВР в слаженный временной ряд (СВР) путем применения операторов сглаживания: I -интегрирования и L -интегрирования [3]. Операция сглаживания позволяет существенно устранить неравномерность исходного временного ряда, вызванную влиянием случайных факторов. Затем множество пар значений ВР и СВР представляется на фазовых плоскостях (ФП) в виде точек, группирующихся вдоль прямой

$$y(t) = a_0 + a_1 \tilde{y}(t), \quad (1)$$

где a_0 и a_1 – коэффициенты, определяющие положение прямой в ФП (численные значения этих коэффициентов определяются методом наименьших квадратов).

Выражение (1) есть интегральное уравнение, решение которого зависит от примененного оператора сглаживания ВР:

- при I -операторе

$$y(t) = a_0 \exp(a_1 t); \quad (2)$$

- при L -операторе

$$y(t) = a_0 / (1 - a_1 t)^2. \quad (3)$$

Данные выражения являются аппроксимирующими функциями СВР. Из двух аппроксимирующих функций (АФ) выбирается функция, имеющая наибольшее значение коэффициента корреляции ρ . Выбор аппроксимирующей функции выполняется блоком «Определение АФ СВР».

Аппроксимирующие функции могут быть использованы для решения задачи прогнозирования технического состояния СЭО, что следует из условия подстановки в формулу (2) или (3) значения $y(t) = y_{\text{доп}}$, где $y_{\text{доп}}$ – допустимое значение контролируемого параметра узла СЭО, например, вибрации опорного подшипника (блок «Назначение допустимых значений»). Допустимое значение рассчитывается как:

$$y_{\text{доп}} = y_{\text{пред}} - y_{\text{пред}} \cdot \varepsilon, \quad (4)$$

где $y_{\text{пред}}$ – предельное значение контролируемого параметра (берется из инструкции завода-изготовителя),

ε – запас безотказности элемента СЭО, задается в соответствии с табл. 1 в зависимости от класса надежности элемента СЭО.

Запас безотказности ε указывает на наличие запаса по времени до выхода элемента СЭО на предельное техническое состояние, тем самым дается возможность провести своевременное ТО. В табл. 1 приведены рекомендованные нормы безотказности, в зависимости от тяжести последствий отказов [4, 6].

Таблица 1

Класс надежности	Последствия отказа	Допустимый запас безотказности (ε), %
Нулевой	Не приводит к прекращению функционирования элемента и не отражается на работоспособности СЭО и судна в целом	<0,0001
Первый	Отказ приводит к непродолжительной остановке элемента без прекращения функционирования СЭО	<0,001
Второй	Отказ приводит к временному прекращению функционирования СЭО без вывода ее из эксплуатации	<0,01
Третий	Отказ приводит к аварийному ремонту судна	<0,1
Четвертый	Отказ приводит к гибели судна	>0,1

Прогноз технического состояния узла СЭО выполняется с момента наступления события

$y(t) = 0,85y_{\text{доп}}$. Прогноз выдается как момент времени наступления события $y(t) = y_{\text{доп}}$, т.е. это краткосрочный прогноз. Кроме этого дается рекомендация о необходимости выполнения технического обслуживания узла СЭО.

Работоспособность рассмотренного алгоритма прогнозирования была проверена контрольным ВР, сформированным на базе квазислучайной последовательности с нормальным распределением. Нормальное распределение можно генерировать исходя из центральной предельной теоремы – суммы большого числа случайных слагаемых имеют нормальное распределение [5]:

$$u_i = \sum_{j=1}^n v_j, \text{ при } n \rightarrow \infty, \quad (5)$$

где v_j – равномерно распределенная величина;
 u_i – нормально распределенная величина.

Важно, что при $n \geq 12$ получается достаточно хорошее приближение к нормальному закону. Был сформирован одномерный массив равномерно распределенных чисел $\{v_j\}$, $j=1, \dots, 10$ в интервале $[0,1]$. На основе этого массива был сформирован массив $\{u_i\}$, $i=1, \dots, 15$ с нормальным законом распределения. Затем массив с нормальным законом распределения был преобразован в массив $y_{ui} = 0,1(i-1) + u_i$. В результате был получен одномерный массив с нормальной случайно возрастающим процессом. В соответствие массиву функции $\{y_{ui}\}$ был поставлен массив аргументов $\{t_i\}$ времени. В результате был сформирован исходный ВР, представленный в табл. 2.

Примем за допустимое значение

$$y_{\text{доп}} = 0,5[y(t_{14}) + y(t_{15})] = 15,09.$$

Основанием прогноза будем считать данные ВР $y(t_i)$, $i = 1, \dots, 10$ В результате выполненных расчетов, используя программу «Прогнозирование сроков технического обслуживания СЭО» (см. рис.3, 4), были получены следующие аппроксимирующие функции:

$$y(t) = 4,5648 \exp(0,0786t); R = 0,8765 -$$

при применении I -оператора;

$$y(t) = 4,4308/(1 - 0,0329t)^2; R = 0,9229 -$$

при применении L -оператора.

На рис. 3 представлено окно программы «Прогнозирование сроков технического обслуживания СЭО». Во вкладке «Численные значения» введены исходные данные ВР табл. 2 (в столбец « $t[k]$ » внесен порядковый номер дня измерения, в столбец « $y[k]$ » – значение контролируемого параметра). Поле «Предельное зн.» заполняется данными завода изготовителя о предельном значении контролируемого параметра, поле «Допустимое зн.» – данными согласно табл. 1, поле «Время ТО» – календарное время выполнения ТО.

В результате обработки ВР по алгоритму рис. 2 в таблицу заносятся: коэффициенты корреляции (RI, RL, RI2, RL2, RIapr, RLapr, RI2apr, RL2apr), параметры начального условия (a_0 , a_0a при I -интегрировании и L -интегрировании), параметры тренда

Таблица 2

Контрольный временной ряд

t	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
y	3,86	4,75	6,08	5,62	4,83	7,05	8,16	7,15	9,48	8,64	7,29	12,08	13,25	15,24	14,94

Рис. 3 Фрагмент программы «Прогнозирование сроков технического обслуживания СЭО»

(a_1 , a_0 при I -интегрировании и L -интегрировании), среднее квадратическое отклонение (СКО), сглаженные значения ВР при использовании двух операторов сглаживания I -интеграла и L -интеграла. Также программа выводит на экран используемый в дальнейшем оператор сглаживания и математическую модель функции аппроксимации. Также выполняется построение графиков: во вкладке «Временная плоскость» (см. рис. 4) строится временной график исходного множества $\{y_i, t_i\}$ (зеленым цветом), сглаженной функции $\tilde{y}(t)$ (красным цветом), выводятся уровни предельного и допустимого значений; во вкладке «Фазовая плоскость» выводится график множества $\{y_i, y_{Li}\}$, $\{y_i, y_{Li}\}$, $\{y_i, y_{Li}\}$ или $\{y_i, y_{Li}\}$, СКО; во вкладке «Аппроксимирующая плоскость» – график множества $\{y_i, \tilde{y}_i\}$ и СКО. Прогноз выполнения технического обслуживания указывается во вкладке «Численные значения» в группе ячеек «1 Прогнозирование ТО» (см. рис. 3).

По результатам обработки ВР для выполнения прогноза была выбрана вторая функция, как имеющая более значимый коэффициент корреляции R . Прогноз наступления события $y(t) = y(t)_{\text{доп}}$ соответствует времени $t = 13,9$. Погрешность прогноза составляет $\delta = 0,24$.

Таким образом, расчеты показали, что значение $y_{\text{доп}} = 15,09$ будет достигнуто на $T_{\text{пр}} = 13,90$, т.е. до 14-го измерения, что подтверждает ВР, приведенный в табл. 2. При этом упреждение прогноза составило $\Delta T = 14 - 10 = 4$ интервала времени с погрешностью 0,02 интервала времени, поскольку, согласно исходному временному ряду, значение параметра

равное 15,09 достигается на 13,92 интервале времени.

Полученные результаты подтверждают возможность применения рассмотренного алгоритма для целей прогнозирования, как одной из четырех задач, решаемых в процессе мониторинга технического состояния СЭО. Актуальность применения подобных алгоритмов обусловлена тем, что эффективным путем обеспечения надежности эксплуатации СЭО является переход на технологию его обслуживания по фактическому состоянию с учетом системного наблюдения и прогнозирования работоспособности, которое реализуется автоматизированными контрольно-измерительными бортовыми системами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Василенко В.А., Травин С.Я. Мониторинг технического состояния корабельных ядерных энергетических установок. – СПб.: ООО «Моринтех», 2006. – 256 с.
2. Хруцкий О.В. Техническая диагностика: учебник / СПб.: Издательство СПбГМТУ, 2005. – 208 с.
3. Соболев Л.Г. Обработка результатов измерений в судостроении. – Л.: Издательство ЛКИ, 1983. – 47 с.
4. Погуляева (Максимова) М.А. Разработка алгоритма управления работоспособностью элементов судовой энергетической установки на интервале прогнозирования / Автореферат дисс. на соиск. уч. степени к.т.н. – СПб.: СПбГМТУ, 2011. – 19 с.
5. Гришин В.К. Математическая обработка и интерпретация физического эксперимента. – М.: Издательство МГУ, 1988. – 226 с.
6. Никитин А.М. Управление технической эксплуатацией судов: учебник / СПб.: изд-во Политехн. ун-та, 2006. – 306 с.

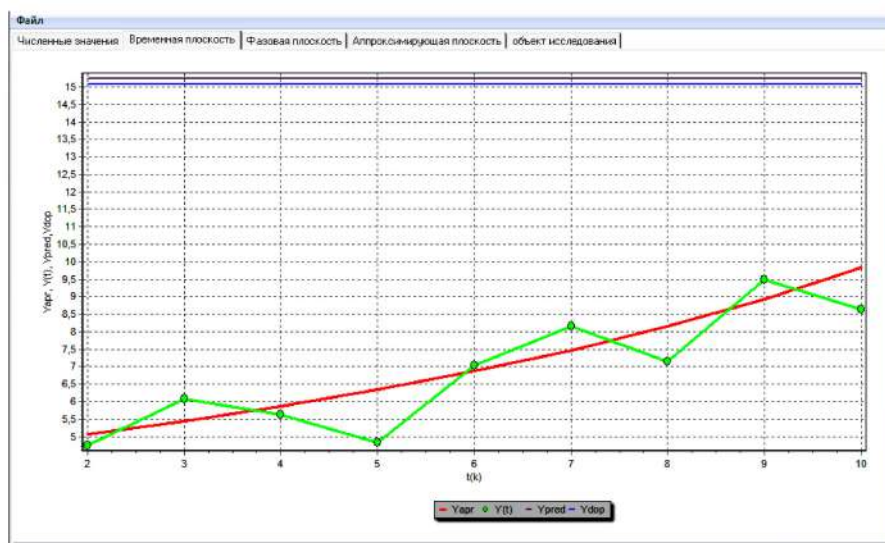


Рис. 4 Фрагмент программы «Прогнозирование сроков технического обслуживания СЭО». Временная плоскость первых 10 значений

УДК 629.5.078-52 (043)

ОБОСНОВАНИЕ ВНЕДРЕНИЯ СИСТЕМЫ ИНФОРМАЦИОННОЙ ПОДДЕРЖКИ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЖИВУЧЕСТИ КОРАБЛЕЙ И СУДОВ

В.Г. Фисай, Военный учебно-научный центр ВМФ «Военно-морская академия имени адм. Н.Г. Кузнецова», Санкт-Петербург

Б.Г. Иванов, Военный учебно-научный центр ВМФ «Военно-морская академия имени адм. Н.Г. Кузнецова», Санкт-Петербург

Необходимость появления систем информационной поддержки борьбы за живучесть (СИП БЖ) обусловлена низкой эффективностью руководства борьбой за живучесть в ряде аварий и катастроф. Описаны примеры влияния различных факторов на ведение борьбы за живучесть при возникновении аварий. Определена роль СИП БЖ в составе систем кораблей и судов. Обоснована необходимость внедрения таких систем. Разрабатываемые в настоящее время СИП БЖ призваны оказывать помощь командному составу кораблей и судов в своевременности и обоснованности принятия решений, что позволит повысить эффективность борьбы за живучесть.

Ключевые слова: живучесть кораблей и судов, борьба за живучесть, система информационной поддержки борьбы за живучесть (СИП БЖ).

FEASIBILITY OF THE INFORMATION SUPPORT SYSTEM IMPLEMENTATION FOR DAMAGE CONTROL OF SHIPS AND VESSELS

V.G. Fisai, Military Educational-and-Research Centre Naval Academy named after "Admiral N.G. Kuznetsov", St. Petersburg

B.G. Ivanov, Military Educational-and-Research Centre Naval Academy named after "Admiral N.G. Kuznetsov", St. Petersburg

In a series of accidents and disasters, the necessity of the information support systems for damage control/survival is specified by the low efficiency of damage control guidance. The examples of various factors, influencing the damage control, when the accidents occur is provided. The role of the information support systems for damage control as part of the ship systems is determined. The requirement of implementation of such systems is specified. The information support systems for damage control, currently being developed, shall be designed to assist officers of ships and vessels as regards expedience and justification of decision making that will enhance the damage control efficiency.

Keywords: Damage control of ships and vessels, damage control, information support systems for damage control.

Насыщение современных кораблей и судов разнообразными техническими комплексами, оружием, агрессивными компонентами в аспекте безопасности характеризуется сложной динамикой развития аварийных ситуаций, быстрым изменением большого числа параметров поведения объекта управления, многовариантностью решения возникающих задач, усложнением ведения борьбы за живучесть (БЗЖ). Неграмотная БЗЖ зачастую приводит к большому ущербу, чем сама аварийная ситуация.

Совокупность задач, решаемых командиром при боевом управлении кораблем и организации БЗЖ такова, что заниматься и тем и другим одновременно крайне сложно.

Основная сложность задач БЗЖ состоит в том, что командному составу при возникновении аварийных ситуаций приходится решать многие вопросы в обстановке неопределенности. Из-за ограниченного количества времени командный

состав не может воспользоваться большинством сведений, имеемых в корабельной документации, поэтому он вынужден пользоваться только тем запасом знаний, который сформировался у него за время тренировок, учений, самостоятельной подготовки.

Анализ аварийности мирового морского флота показывает, что причинно-следственные связи в аварийных ситуациях, несмотря на их в целом типичный характер, в каждой аварии уникальны.

Известно, что борьба за непотопляемость является важнейшей составной частью БЗЖ. Автоматизация решения задач непотопляемости является важнейшей, но в то же время и наиболее трудоемкой частью алгоритмического, информационного и программного обеспечения современных систем информационной поддержки борьбы за живучесть (СИП БЖ.)

Необходимость появления СИП БЖ подводных лодок (ПЛ) обуславливалась прежде всего низкой

эффективностью руководства БЗЖ в ряде аварий и катастроф, произошедших в 60 – 80 гг. прошлого века на ряде современных для того времени ПЛ 1–3 поколений. Так, вследствие неправильной оценки сложившейся ситуации на ПЛ К-19 в 1972 г., связанной с возгоранием фильтра в турбинном отсеке, не были своевременно объявлена аварийная тревога и оповещен личный состав, что в сочетании с рядом других ошибочных решений главного командного пункта (ГКП) привело к ухудшению ситуации и комплексному развитию аварии, поступлению воды, значительному повреждению технических средств, гибели людей и вынужденному пребыванию 12 человек в изолированном отсеке в течение 12 суток. Несвоевременное и нечеткое объявление аварийной тревоги без указания места и характера аварии произошло и на ПЛ К-278 в 1989 г. при пожаре в концевом отсеке: вначале была объявлена учебная тревога, затем – учебно-аварийная и лишь спустя 11 минут – аварийная.

Можно привести большое количество примеров подобного рода. Анализ БЗЖ в большинстве тяжелых аварий и катастроф показал, что в той или иной степени задержки с объявлением аварийной тревоги имели место в каждой из них. Частично они могли быть объяснены низкими организацией службы и качеством подготовки личного состава. Однако в своей основе они лежали в особенностях человеческой психики, естественной реакции человека на внезапно изменившуюся обстановку.

В [1] установлено, что при отсутствии у человека четкого образа новой для него ситуации и плана действий по ней оценка события задерживается, что влечет информационную неопределенность того сигнала, с которого начинается такая оценка. Предотвратить такие тяжелые ситуации, наряду с тренировкой лиц, принимающих решения, могла бы элементарная подсказка, содержащая общую схему идентификации возникшей аварии и план действий по ней. Неслучайно поэтому подобные схемы и планы, содержащие базовые рекомендации при возникновении аварии, стали появляться «под стеклом». Несмотря на то, что подобные тексты не имели особой значимости для хорошо подготовленных офицеров, однако они придавали определенную психологическую устойчивость при возникновении экстремальных ситуаций.

Анализ деятельности руководящего состава в процессе БЗЖ на ПЛ, не оснащенных СИП БЖ, свидетельствует о большом количестве ошибочных и запоздалых решений, которыми такая деятельность сопровождалась. Зачастую следствием таких решений становилась гибель людей.

Особую трудность у руководства БЗЖ на ГКП вызывали решения, направленные на локализацию

аварии в пределах аварийного отсека и на предотвращение перерастания ее в комплексную, способную привести к катастрофе ПЛ и массовой гибели личного состава.

Как и в случае с задержкой в объявлении аварийной тревоги, одна из причин ошибочных и несвоевременных действий по предотвращению развития аварии кроется в особенностях человеческой психики, точнее – способности человека в условиях резкого дефицита времени и осознания возможной цены ошибки воспринимать и перерабатывать большие потоки информации.

Действительно, только для полной герметизации аварийного отсека на ПЛ К-278 в апреле 1989 г. требовалось принять решение и отдать команды более чем по 16 различным системам (система дыхательная стационарная, раздачи кислорода, удаления углекислого газа, дифференциальная система, система снятия давления, масляная, сепарации масла и т.д.). Но помимо герметизации аварийного отсека в это же самое время следовало принимать не менее важные решения по условиям БЗЖ (всплывать в надводное положение или нет), использованию системы объемно-химического пожаротушения, управлять движением ПЛ и т.д. При этом для принятия решений по каждому из указанных направлений необходим был поиск соответствующей информации и ее последующее осмысление.

В [2] отмечается, что в подобных случаях под влиянием отрицательных эмоций, а также высокого темпа развития ситуации у лиц, принимающих решения, иногда из памяти выпадают даже известные им из инструкций способы и приемы решения аналогичных задач, и они вынуждены как бы заново их «открывать».

Если иметь в виду, что почти каждая авария, миновав начальную стадию, является уникальной, для локализации и подавления которой необходимо принимать ряд нестандартных решений, становится ясно, что возникает противоречие между теми требованиями, которые предъявляются на современных ПЛ к руководителям БЗЖ, и их фактическими психологическими возможностями.

Неслучайно поэтому, что одним из направлений решения данного противоречия в конце 80-х – начале 90-х гг. стала разработка и внедрение на ПЛ СИП БЗЖ. Условно первым этапом их разработки и внедрения можно считать упомянутый выше «бумажный» период (разработка картонных планшетов, схем, графиков и т.п. наглядных пособий). С развитием бортовой вычислительной техники становилось ясно, что ограничивать статическим бумажным планшетом информационную поддержку руководства БЗЖ такого сложного объекта, каким является современная ПЛ, было бы непростительным упущением. В соответствии с рядом совместных

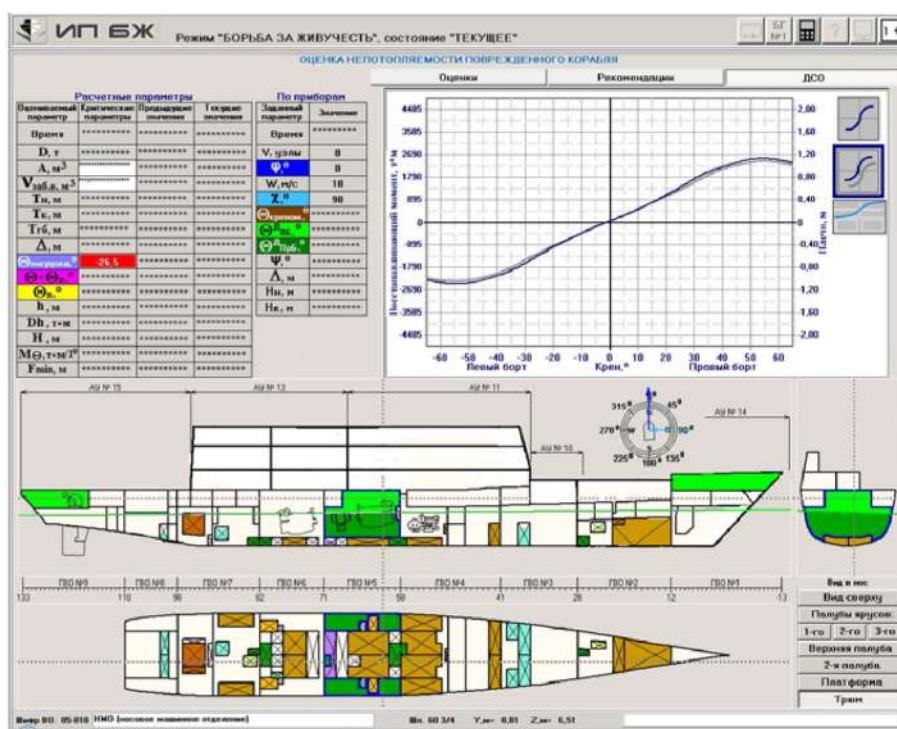


Рис.2 Пример решения задачи непотопляемости в СИП БЖ

ную с необходимостью отражения более сложной по сравнению с ПЛ топологией помещений НК.

Анализ истории аварийности указывает на необходимость разработки автоматизированных СИП БЖ с целью предоставления руководителю БЗЖ информации для принятия решений:

- по оценке состояния корабля;
- по управлению деятельностью личного состава при пожарах и борьбе за непотопляемость;
- по использованию технических средств и систем оружия корабля, а также для использования системы в подготовке к практическим действиям по ликвидации как типовых, так и нетиповых аварийных ситуаций.

При определении места и роли автоматизированной системы в управлении БЗЖ корабля необходимо исходить из того, что это, прежде всего, инструмент непрерывного системного анализа состояния корабля, его оборудования и протекающих процессов, выявления возникающих (в т.ч. потенциальных) проблемных ситуаций и выбора вариантов действий с позиций корабля как единого целого [4].

Реализация организационных и технических мер обеспечения живучести напрямую зависит от своевременности и правильности принятых решений, связанных с организацией повседневной эксплуатации или БЗЖ корабля.

В свою очередь, принятие решений может сопровождаться проведением сложных расчетов

(например, параметров посадки корабля) и прогнозированием развития различных ситуаций (изменение параметров посадки и остойчивости при изменении нагрузки, обледенении, затоплении отсеков), при которых необходимо использование как эксплуатационной документации, так и данных по текущему состоянию технических средств корабля, что значительно увеличивает время принятия решения [3].

Разрабатываемые в настоящее время СИП БЖ призваны оказывать помощь командному составу в своевременности и обоснованности принятия решений. Результатом работы СИП БЖ являются также выполнение необходимых расчетных задач, а также формирование оценок и рекомендаций по улучшению текущего состояния корабля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Береговой Г.Т., Пономаренко В.А. Психологические основы обучения человека-оператора готовности к действиям в экстремальных условиях // «Вопросы психологии». – 1983. – № 1.
2. Башлыков А.А. Проектирование систем принятия решений в энергетике. – М.: Энергоатомиздат, 1986.
3. Войткунский Я.И. [и др]. Справочник по теории корабля: в трех томах. – Л.: Судостроение, 1985.
4. Алексеев А.В. Технологические аспекты автоматизации процессов борьбы за живучесть корабля, судна: материалы второй всероссийской межотраслевой научно-технической конференции «Актуальные проблемы морской энергетики». – СПб.: СПбГМТУ, 2013.

УДК 629.5.078-52 (043)

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМЫ СИГНАЛИЗАЦИИ УРОВНЯ ЖИДКИХ ГРУЗОВ И АВАРИЙНЫХ МАСС ВОДЫ ДЛЯ КОРАБЛЕЙ И СУДОВ

В.Г. Фисай, Военный учебно-научный центр ВМФ «Военно-морская академия им. адм. Н.Г. Кузнецова», Санкт-Петербург

Б.Г. Иванов, Военный учебно-научный центр ВМФ «Военно-морская академия им. адм. Н.Г. Кузнецова», Санкт-Петербург

Обеспечение непотопляемости имеет важное значение при эксплуатации кораблей и судов. В настоящее время большое развитие получили технические средства автоматизации для оценки и контроля состояния корабля, такие как системы сигнализации поступления воды в отсеки и контроля осадки. Описаны особенности использования данных систем и программного обеспечения, позволяющего на основе данных от датчиков производить расчеты посадки и остойчивости, отображать информацию о состоянии корабля.

Ключевые слова: системы сигнализации уровня жидких грузов и масс воды, система контроля посадки, непотопляемость.

APPLICATION FEATURES OF LIQUID CARGO AND EMERGENCY WATERS ALARM SYSTEM FOR SHIPS AND VESSELS

V.G. Fisai, Military Edukational-and-Research Centre Naval Academy named after Admiral N.G. Kuznetsov, St. Petersburg

B.G. Ivanov, Military Edukational-and-Research Centre Naval Academy named after Admiral N.G. Kuznetsov, St. Petersburg

Provision of floodability is very essential for ships in service. Currently, significant progress has been evident in automation technologies for the assessment and monitoring of the ship's status, such as water level alarm system in compartments and draught control. The features of using the data of such systems and software are given, thus enabling to calculate the ship's trim and stability, based on the sensor data, as well as to display information on the ship's condition.

Keywords: Liquid cargo alarm systems and emergency water body, ship's trim monitoring (ship's draught control), floodability.

В целях обеспечения непотопляемости кораблей и судов в настоящее время большое развитие получили технические средства автоматизации для оценки и контроля состояния корабля. В частности, для контроля поступления воды в отсеки широкое распространение приобрели системы сигнализации поступления воды, применение которых для обеспечения борьбы за живучесть (БЗЖ) имеет ряд особенностей.

На кораблях и судах могут применяться системы сигнализации аварийных масс воды в отсеках и уровня жидких грузов в цистернах с датчиками, представляю-

щими дискретные значения уровней («Верхний уровень» – ВУ, «Нижний уровень» – НУ) в составе электрифицированной доски непотопляемости в посту энергетики и живучести (ПЭЖ) и информационной доски на главном командном пункте (ГКП), размещенных в соответствии с требованиями руководств по БЗЖ.

Информация от сигнализаторов представляется на сечениях, подобно тому, как показано на рис. 1.

В составе общекорабельных систем, систем главной энергетической установки и вспомогательной энергоустановки указанные системы

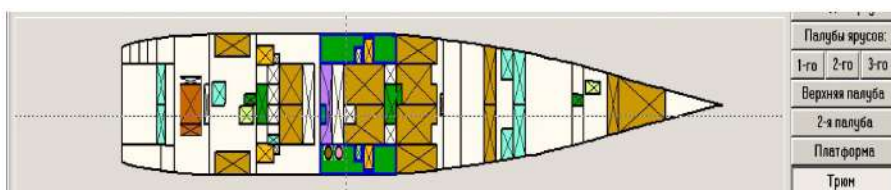


Рис.1 Пример отображения информации с датчиков по затоплениям в системе информационной поддержки БЗЖ

сигнализации выполняли функции сигнализации и/или давали сигнал на запуск (остановку) механизмов, открытие (закрытие) арматуры при достижении ВУ или НУ.

Обобщенная схема использования сигнализаторов уровня, например, ASL-400 фирмы «Валком», представлена на рис. 2.

Размещать сигнализаторы в непроницаемых отсеках рекомендуется следующим образом:

- ВУ – на высоте не ниже 1,5 м от самой нижней точки отсека при высоте межпалубного пространства 2,5 м или не ниже 75 – 80 % высоты межпалубного пространства, если его величина более 5 м. Для отсеков, пересекаемых переменной ватерлинией (ВЛ), сигнализаторы размещаются на уровне ВЛ, соответствующей нормальному водоизмещению;

- НУ – на высоте не ниже 0,5 м от самой нижней точки отсека при высоте межпалубного пространства 2,5 м и не ниже 10 % высоты межпалубного пространства, если его величина более 5 м.

Эти требования сформулированы исходя из принятых правил расчета величин, приведенных на доске непотопляемости, трюмной и информационной доске [1, 2]:

V_{BO_i} – полный объем водонепроницаемого отсека (ВНО) (потеря запаса плавучести корабля при его повреждении или затоплении);

$V_{ГВО_i}$ – полный объем ВНО (потеря запаса плавучести корабля при его повреждении или затоплении);

p_y – учетная масса балласта (жидкого груза) для отсеков 1 группы, расположенных ниже конструктивной ватерлинии;

Θ_T и Δ_T – табличные значения крена и дифферента для отсеков 1 и 2 группы, расположенных в водонепроницаемом корпусе корабля;

δh_I – потеря поперечной метацентрической высоты при полном затоплении ВНО – затопление ВНО на уровень более 80 % (ВНО I категории);

δh_{II} – потеря поперечной метацентрической высоты при затоплении ВНО фильтрационной водой (ВНО II категории);

δh_{III} – потеря поперечной метацентрической высоты при затоплении ВНО по ватерлинию (ВНО III категории);

δh_{VI} – потеря поперечной метацентрической высоты при затоплении ВНО или герметичного отсека надстройки по комингс водонепроницаемого или герметичного закрытия (иллюминатор, полотно двери, полотно крышки люка) (ВНО IV категории).

Указанные величины приведены на доске непотопляемости, трюмной доске и информационной доске для каждого главного автономного ВНО корпуса корабля, ВНО корпуса корабля и герметичного отсека его надстройки, и используются при оценке непотопляемости (в т.ч. остойчивости) поврежденного корабля методом В.Г. Власова – ручной расчет с использованием бланков «Журнала спрямления» (см. рис. 2) [1, 2].

Методика использования показаний сигнализаторов заключается в расчете методом В.Г. Власова на бланке «Журнала спрямления», в который заносят данные о затоплении или повреждении ВНО, герметичных отсеков надстройки и главных автономных ВНО в соответствии с показаниями сигнализаторов (данные соответствовали полному затоплению или затоплению по ватерлинию, или затоплению фильтрационной водой).

Указанный метод имеет ряд недостатков:

- расчет на бланке «Журнала спрямления» позволяет оценивать только начальную остойчивость корабля, не учитывает нелинейность диаграммы поперечной статической остойчивости и не позволяет оценивать динамическую остойчивость корабля;

- невозможно корректно оценить интенсивность поступления воды в поврежденные отсеки в соответствии с требованиями руководства по БЗЖ;

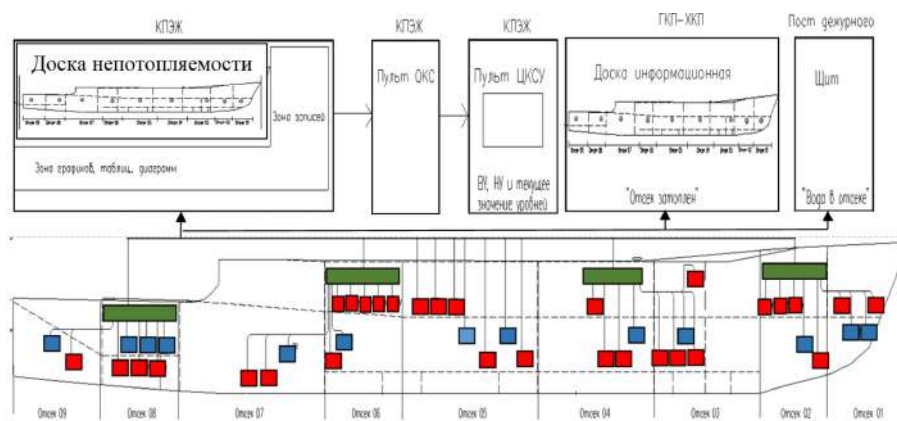


Рис.2 Обобщенная схема использования сигнализаторов уровня аварийных масс воды в отсеках одного из кораблей ВМФ

- наличие существенных погрешностей результатов расчетной оценки непотопляемости поврежденного корабля и расчетной оценки эффективности выбранного варианта спрямления вследствие ошибок в информации о затоплении, в т.ч. ошибок, вызванных нестационарностью состояния корабля (изменение затопления в процессе спрямления).

Учитывая изложенное, задача по созданию и внедрению на корабли и суда системы сигнализации поступления воды в отсеки в комплексе со специальным программным комплексом поддержки обеспечения непотопляемости является актуальной. В настоящее время заинтересованными организациями предложено указанные недостатки устранить путем внедрения специального программного обеспечения (ПО) задач непотопляемости, автоматически получающего информацию от комплекта приборов измерения статических параметров посадки (осадки, крен, дифферент и скорость их изменения), а также системы измерения уровней жидких грузов в цистернах и уровней аварийных масс воды в ВНО корпуса корабля (см. рис. 1)

Анализ применения систем измерения уровня жидких грузов и аварийных масс воды для кораблей и судов выявил определенные принципы и особенности.

Наиболее важные жидкие грузы (к ним были отнесены питьевая вода, авиационное топливо, котельная вода) контролировались с помощью измерительных приборов, представлявших информацию об их объеме в текущий момент времени. Указанные приборы не имели цифрового выхода для передачи информации в средства вычислительной техники.

Измерение всех остальных жидких грузов (топливо, масло, грязные нефтепродукты, фекальные воды и др.) производилось личным составом вручную с помощью измерительных линеек, визирных труб и колонок в соответствии с требованиями, приведенными в руководстве по БЗЖ.

Например, для контроля количества запасной пресной воды на каждой цистерне с ней установлены преобразователи давления измерительные, по сигналам от которых на пульте контролируется объем воды (см. рис. 3.)

Расчет объема и массы жидких грузов в цистернах и воды в ВНО, а также контроль посадки (осадок) корабля могут быть обеспечены комплексными системами управления по информации об уровне от датчиков гидростатического давления. При этом для точного вычисления объема и массы жидкого груза в цистерне необходимы данные о температуре и плотности жидкого груза, а также крене и дифференте корабля, которые используются в соответствующем ПО системы измерения. То есть в составе системы измерения должны быть предусмотрены датчики или синхронно (в режиме



Рис. 3 Принципы установки датчиков уровня ASL-400

реального времени) должен быть предусмотрен ввод этих данных из других автоматизированных систем.

Кроме того, измерение уровня затопления отсеков должно быть обеспечено, в том числе, и в режиме противохимической защиты корабля, когда в его герметичных отсеках и надстройке создается подпор давлением воздуха, превышающим наружное атмосферное давление. Это обстоятельство потребует включение в состав системы датчиков, измеряющих наружное атмосферное давление для учета величины этого подпора, что в свою очередь снижает надежность системы из-за увеличения числа элементов.

Датчики гидростатического давления на качке корабля выдают в комплексную систему управления техническими средствами данные с погрешностью, вызванной силами инерции, действующими на жидкий груз или аварийные массы воды в отсеке, так как жидкость, гидростатический напор которой измеряется, является несжимаемой, а мембрана датчика податливой. При этом величина погрешности зависит от параметров качки корабля, в свою очередь зависящих от интенсивности волнения, длины волны, скорости хода корабля, его главных размерений и параметров, характеризующих его остойчивость.

В настоящее время не разработан математический аппарат, позволяющий исключить (отфильтровать) указанные погрешности при измерении уровня жидких грузов или аварийных масс воды в отсеках корабля, удаленных от его центра качки.

Следовательно, для обеспечения измерения этих уровней необходимы датчики, показания которых не содержат указанные погрешности. К таким типам датчиков могут быть отнесены:

- ультразвуковые сигнализаторы уровня, применяемые для сигнализации ВУ и НУ в цистернах, наличия воды в льяльных колодцах, сигнализации о поступлении аварийных масс воды в отсек, защиты насосов;

- измерительные преобразователи, базирующиеся на методе импульсной полиметрии.

Наряду с системой сигнализации уровня жидких грузов и аварийных масс воды применяется система измерения осадок корабля (судна) для периодического дистанционного замера:

- уровней воды в питьевых цистернах – использовались приборы типа МИД и показывающие стрелочные приборы УЗК-1;

- эксплуатационных и аварийных осадок – использовалась система измерения осадок.

Осадки определяются в носовой, средней и кормовой частях корабля по указательным колонкам на местах их установки и в ПЭЖ по показаниям вторичных приборов КД 140 – дифманометров-уровнемеров (эксплуатационные осадки) и дистанционных манометров (аварийные осадки).

В состав системы контроля осадок входят: трубопровод с арматурой, средства измерения и контроля, указательные колонки, электрооборудование. На трубопроводе контроля осадок установлены первичные приборы дифференциального манометра для замера эксплуатационных осадок и манометр избыточного давления для замера аварийных осадок. От первичного прибора комплекта дифференциального манометра дополнительно выведена воздушная труба, соединяющая измерительную камеру прибора с атмосферой, что обеспечивает измерение разности давления между столбом воды действующей ватерлинии и атмосферным давлением, действующим на первичный прибор комплекта дифференциального манометра. Определение осадки производится путем измерения давления столба воды действующей ватерлинии на первичный прибор комплекта манометра.

Показания первичных приборов передаются в ПЭЖ на вторичные приборы типа КД 140. Для исключения резких колебаний в показаниях первичных приборов на трубопроводах, подходящих к ним, установлены дроссельные шайбы. При движении корабля первичные приборы должны быть отключены от гидравлической части во избежание выхода из строя от воздействия гидродинамического напора.

Таким образом, для вычисления объема и массы сред (переменных жидких грузов, балластной воды или аварийных масс воды в отсеке корабля) необходимо в отсеке разместить не менее трех чувствительных элементов (измерительных преобразователей),

подключенных параллельно друг другу и рассредоточенных по объему измеряемой емкости (вариант 1). Это обеспечит фиксацию в данный момент времени положения поверхности среды, положение плоскости которой определяется тремя точками с координатами в системе координат OXYZ.

В случае размещения в контролируемой емкости одного чувствительного элемента (измерительного преобразователя) (вариант 2) для вычисления объема и массы среды в этой емкости необходимо обеспечить ввод в ПО синхронно (в режиме реального времени):

- величины уровня среды в текущий момент времени – от системы измерения уровня;

- величины крена и дифферента корабля (судна) в текущий момент времени – от комплекта приборов посадки.

В варианте 2 положение поверхности колеблющейся среды будет характеризоваться значениями функций в заданный момент времени. Применение варианта 2 для вычисления объема и массы среды в контролируемых отсеках допустимо только при условии допущения о синхронном перемещении положения ватерлинии корабля (судна) и поверхности среды в контролируемых отсеках. Полунатурные опыты по оценке поведения поверхности аварийных масс воды в отсеках судна на качке, проведенные в Калининградском институте водного транспорта, показали, что период качки поверхности жидкого груза, как правило, не совпадает с периодом качки корабля (судна) и для отсека определяется отношением его высоты к ширине.

Использование систем автоматизированного контроля осадки и поступления воды в отсеки и цистерны наряду с ПО, которое кроме отображения информации производит расчеты посадки и остойчивости, позволит вывести на качественно новый уровень задачу обеспечения непотопляемости кораблей и судов. Применение данных систем позволит повысить уровень безопасности кораблей и судов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Муру Н.П. Основы непотопляемости корабля. – СПб.: Воениздат, 1990.
2. Муру Н.П. [и др.]. Справочник по теории корабля. – Л.: Воениздат, 1984.

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 незначущих 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://kmtpru.ru/>
<http://www.efg-berlin.de/>

Российский морской регистр судоходства
Журнал
«Научно-технический сборник
Российского морского регистра судоходства»
вып. 42/43

Редакционная коллегия журнала

Ответственные за выпуск: *А.В. Зухарь, М.Р. Маркушина*
Редактор *Е.Б. Мюллер*
Компьютерная верстка *С.С. Лазарева*
Дизайн концепции *М.В. Батракова*

Подписано в печать 22.06.2016. Формат 60 × 84/8
Усл. печ. л.: 16,2. Уч.-изд.л.: 15,9. Тираж 500

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