

РОССИЙСКИЙ МОРСКОЙ



РЕГИСТР СУДОХОДСТВА

НАУЧНО- ТЕХНИЧЕСКИЙ СБОРНИК

ВЫПУСК

32

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ

2009

Редакционная коллегия Российского морского регистра судоходства:

Н.А. Решетов, (председатель) В.И. Евенко, С.С. Кощий (заместители председателя), А.Е. Сазонов, С.В. Балагура, А.Ю. Бессонов, С.А. Быстров, А.А. Захаров, С.В. Кириллов, М.Ф. Ковзова, И.Н. Копилец, М.Н. Кринская, М.А. Кутейников, Е.Б. Мюллер, А.А. Сергеев, М.Р. Стерлинг, А.В. Фокин, В.А. Хоботов.

УДК 211-17 629.5.011:061.6:009.13

Н.А. Решетов, Э.К. Блинов

УЧАСТИЕ РОССИЙСКОГО МОРСКОГО РЕГИСТРА СУДОХОДСТВА В АРКТИЧЕСКОЙ СТРАТЕГИИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

В настоящее время одной из главных задач Российского государства является освоение углеводородных запасов на арктическом шельфе РФ. Основные цели, задачи, приоритеты Российской Федерации в данной области изложены в документе «Основы государственной политики Российской Федерации в Арктике на период до 2020 года и дальнейшую перспективу» (далее – Основы) [1]. Основы были утверждены 18 сентября 2008 г. Президентом Российской Федерации Дмитрием Медведевым (Пр-1969) и опубликованы на страницах «Российской газеты» 30 марта 2009 г.

Данный документ определяет главные цели, основные задачи, стратегические приоритеты и механизмы реализации государственной политики Российской Федерации в Арктике на указанный выше период, а также систему мер стратегического планирования социально-экономического развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности России.

Одним из ключевых моментов, составляющих этот документ, являются национальные интересы Российской Федерации в Арктике, предусматривающие использование Северного морского пути (СМП) в качестве национальной единой транспортной коммуникации РФ. Вопросы поддержания и дальнейшего эффективного развития СМП имеют прямое отношение к основной деятельности Российского морского регистра судоходства (РС). Освоение энергоресурсов аркти-

ческого шельфа, поддержание инфраструктуры СМП невозможно без современного арктического флота, а РС как классификационное общество является лидирующей организацией в области обеспечения безопасной эксплуатации ледокольных судов в тяжелых ледовых условиях Арктики. Морские суда различных назначений, включая суда ледокольного и вспомогательного флотов, способные обеспечить бесперебойное функционирование данной транспортной системы, будут в долгосрочной перспективе являться приоритетным транспортным средством на трассе СМП, в первую очередь в районах Баренцева моря и о. Сахалин. Кроме того, в Арктической зоне на шельфе предполагается использование плавучих буровых установок и морских стационарных платформ, плавучих атомных электростанций (ПАЭС) и т. д. Полагаем, что все виды используемых на трассе судов и плавучих средств других назначений будут нести флаг РФ и будут сертифицированы на класс РС.

Арктика представляет собой северную область Земли, включающую глубоководный Арктический бассейн, мелководные окраинные моря с островами и прилегающими частями материковой суши Европы, Азии и Северной Америки. В пределах Арктики расположены пять приарктических государств – Россия, Канада, Соединенные Штаты Америки, Норвегия и Дания, которые обладают исключительной экономической зоной и континентальным шельфом в Северном Ледовитом океане. Для РС важным является тот факт, что три из указанных пяти государств [2] имеют на своей территории международные классификационные общества: ABS, РС, DNV. Все они имеют прямое отношение не только к международному судоходству, но и к вопросам полярного судоходства в Арктике в рамках своих исключительных экономических зон.

Для российской государственной политики одним из стратегических приоритетов в данном регионе, согласно Основам, является установление и укрепление добрососедских отношений России с приарктическими государствами, как на двусторонней основе, так и в рамках региональных организаций (Арктический совет, Совет Баренцева/Евроарктического региона и др.). Полагается, решение этой задачи позволит активизировать экономическое, научно-техническое и культурное взаимодействие, а также обеспечит условия для взаимовыгодного сотрудничества в области судоходства, эффективного освоения природных ресурсов и сохранения окружающей природной среды в Арктике. Это также будет содействовать использованию СМП [3] для международного судоходства в рамках юрисдикции Рос-

сиейской Федерации и в соответствии с международными договорами, касающимися Арктики.

Основы также рекомендуют российским государственным учреждениям и общественным организациям принимать активное участие в работе международных форумов, посвященных арктической проблематике, включая межпарламентское взаимодействие в рамках партнерства Россия–Европейский союз. В этом предполагается и участие РС.

Таким образом, РС становится одним из профессиональных участников процесса освоения арктического региона, причем на долгосрочную перспективу и по многим целям и задачам, прописанным в Основах.

Особая тема, обозначенная в Основах, предусматривает активную модернизацию и развитие инфраструктуры арктической транспортной системы и рыбохозяйственного комплекса в Арктической зоне Российской Федерации. В первую очередь будет уделено внимание строительству новых судов: грузовых, нефтедобывающих, а также рыболовных, непременно с ледовым классом. В частности требуется обеспечить реструктуризацию объемов грузоперевозок по СМП, в том числе за счет государственной поддержки строительства судов ледокольного, аварийно-спасательного и вспомогательного флотов, а также береговой инфраструктуры. Госполитика РФ предполагает, что на трассе СМП будут использоваться суда в основном с классом РС. Следовательно, складываются все условия для присутствия и активного участия РС в процессе освоения Арктики и эффективного развития арктического судоходства.

Основами предписывается сформировать систему контроля обеспечения безопасности судоходства, управления транспортными потоками в районах интенсивного движения судов, обеспечить подготовку и переподготовку специалистов в системе высшего и среднего специального образования для работы в арктических условиях, определить государственные социальные гарантии и компенсации для лиц, работающих и проживающих в Арктической зоне Российской Федерации. Во всех этих новациях уже сейчас просматривается перспектива участия РС.

В Арктической зоне в настоящее время уже существуют региональные инспекции и участки РС. Поэтому в соответствии с указанными в Основах этапами реализации российской государственной политики в Арктике, РС потребуются осмысление и планирование соответствующих действий и мероприятий по совершенствованию

своего структурного присутствия и системы управления в арктическом регионе.

Особое место в Основах отводится созданию программы по осуществлению плановой утилизации судов с ядерными энергетическими установками (ЯЭУ), отслуживших установленные сроки эксплуатации. Всем известно, что в первую очередь это касается ледоколов с ЯЭУ, и что они все имеют класс РС.

Также Основами предписывается обеспечить реализацию государственной программы развития научно-исследовательского флота Российской Федерации, предусматривающей научные исследования в Арктике в области глубоководной деятельности и гидронавтики, включая внедрение технических средств и приборной базы, адаптированных к проведению полярных научных исследований.

При рассмотрении этого раздела нужно вспомнить утвержденные Правительством РФ Федеральные целевые программы (ФЦП) «Мировой океан» (1998 г.) [4] и «Развитие гражданской морской техники на 2009–2016 годы» (2008 г.) [5]. Этими программами предусмотрено строительство многих специализированных морских объектов и судов ледового плавания в соответствии с требованиями Правил РС. Строительство некоторых из них уже ведется на верфях России и за рубежом.

Например, на верфях Санкт-Петербурга строятся ледовые челночные танкеры для ОАО «Совкомфлот», дизель-электрические ледоколы для ФГУП «Росморпорт», научно-экспедиционное судно для ГУ АНИИ, предполагается начало строительства ледоколов с ЯЭУ для ФГУП «Атомфлот», плавучие АТЭС ММ с реакторными установками КЛТ-40С для ОАО «Концерн Энергоатом» [6] и т. д.

В этой связи необходимо отметить предусмотрительность и своевременность действий РС по дополнению и совершенствованию основного нормативного документа – Правил классификации и постройки морских судов (2010) [7]. Особенно в части касающейся судов, строящихся для использования при низких природных температурах. В их составе – новая часть XVII «Дополнительные знаки символа класса и словесные характеристики, определяющие конструктивные или эксплуатационные особенности судна» (далее – часть XVII), которая имеет прямое отношение к условиям плавания морских судов и объектов в Арктике. Например, разд. 3 «Требования по оборудованию судов на соответствие знакам **ECO** и **ECO-S** в символе класса», где приведены условия соблюдения полярной экологии в соответствии с международными экологическими требованиями для полярных ре-

гионов Земли, или разд. 7 «Требования по оборудованию судов для обеспечения длительной эксплуатации при низких температурах» (далее – Требования) [7].

Именно суда, соответствующие указанным требованиям, должны работать в Арктике на трассе СМП или в районах Антарктики (см. также [8]). Судам, отвечающим настоящим требованиям, к основному символу класса судна может быть добавлен дополнительный знак **WINTERIZATION(DAT)**. В скобках указывается расчетная внешняя температура, °С, например **WINTERIZATION(-40)**. Необходимыми условиями для присвоения дополнительного знака **WINTERIZATION(DAT)** являются:

наличие знака категории ледовых усилений не ниже **Arc4** в соответствии с 2.2.3 части I «Классификация» [7]. По желанию судовладельца дополнительный знак **WINTERIZATION(DAT)** может быть присвоен судам с категорией ледовых усилений **Ice3** и ниже, при этом объем выполнения Требований является предметом специального рассмотрения Регистром;

наличие знака средств защиты от обледенения **ANTI-ICE** в соответствии с разд. 4 части XVII;

наличие знака экологической безопасности не ниже **ECO** в соответствии с разд. 3 части XVII.

Благодаря этим своевременным действиям созданы нормативные условия для строительства новых и модернизации действующих судов с классом РС для Арктики и Антарктики. Теперь одной из принципиальных позиций РС, является включение новых разделов разработанных Правил и нормативных требований в Генеральные проекты каждого вновь строящегося судна, предназначенного для использования в Арктике. Предполагается, что эта важная работа продолжится и применительно к другим объектам морской гражданской техники, таким как ПБУ, МСП, плавучие АТЭС и др.

В Основах сделан акцент на том, что государственная политика Российской Федерации в Арктике проводится посредством целенаправленной и скоординированной деятельности заинтересованных федеральных органов исполнительной власти, органов государственной власти субъектов Российской Федерации, органов местного самоуправления, коммерческих и некоммерческих организаций в соответствии с их полномочиями и сферами деятельности на принципах государственно-частного партнерства, а также в рамках сотрудничества Российской Федерации с иностранными государствами и международными организациями. Данный тезис позволяет РС, в рамках

своих полномочий, скоординировать и успешно осуществлять свою работу в Арктике, последовательно проводить и поддерживать интересы РФ в ИМО и МАКО. Важную роль при этом играет участие РС в работе международных организаций по формированию современной международной нормативной базы для судов ледового класса, новые возможности по выстраиванию в арктическом секторе двусторонних профессиональных взаимоотношений с классификационными обществами ABS и DNV.

Основами рекомендуется также широко освещать в средствах массовой информации вопросы, связанные с национальными интересами Российской Федерации в Арктике, включая организацию выставок, конференций, «круглых столов», посвященных истории освоения Арктики российскими исследователями, а также с возможностями СМП в целях формирования позитивного имиджа России. Участвуя в этих процессах, РС необходимо активизировать рекламную деятельность, направленную на поддержание приоритетности класса РС. В этой связи РС может предложить вниманию потенциальных заказчиков новых судов и другой гражданской морской техники для российской Арктики свое видение решения поставленных задач и свою нормативную базу.

Важным является то, что Основы предусматривают поэтапную реализацию поставленных целей и задач с указанием конкретных сроков:

на первом этапе (2008 – 2010 гг.), в частности, должно быть обеспечено проведение работ по подготовке материалов для обоснования внешней границы Арктической зоны РФ;

на втором этапе (2011 – 2015 гг.), в частности, должно быть обеспечено создание и развитие инфраструктуры и системы управления коммуникациями Северного морского пути для решения задач обеспечения евразийского транзита;

на третьем этапе (2016 – 2020 гг.) должно быть обеспечено превращение Арктической зоны РФ в ведущую стратегическую ресурсную базу нашей страны.

Конкретизация сроков реализации Основ позволяет РС более четко ориентироваться по времени своего участия в процессе освоения Арктической зоны РФ. Она также дает РС возможность на долгосрочную перспективу разработать свою собственную профессиональную программу действий для решения предстоящих задач и своевременно быть готовым к вызовам Арктики следующего десятилетия.

Список литературы

1. Основы государственной политики Российской Федерации в Арктике на период до 2020 года и дальнейшую перспективу [Текст] : [утвержден Президентом Рос. Федерации 18 сентября 2008 г. (Пр-1969)] // Рос. газ. – 2009. – 30 марта. – С. 5.
2. Норвегия претендует на месторождения в районе Шпицбергена : [статья]. – 1 стр. – <http://www.rg.ru/2009/05/13/shpicbergen.html>.
3. Ходырев В.Я., Блинов Э.К. Эксплуатация Северного морского пути – этап современного инновационного развития России // Транспорт РФ. – № 1(20) 2009. – С. 4 – 7.
4. Федеральная целевая программа «Мировой океан» : [Постановление Правительства РФ от 10.08.1998 г. № 919].
5. Федеральная целевая программа «Развитие гражданской морской техники» на 2009 – 2016 гг.: [Постановление Правительства РФ от 21.02.2008 г. № 103].
6. Плавучие ПАТЭС : [статья]. – 1 стр. – <http://www.polit.ru/18/05/2009/economy>.
7. Правила классификации и постройки морских судов. Т. 3. – СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2010.
8. Евенко В.И., Грубов Д.А., Тряскин В.Н. Развитие требований Российского морского регистра судоходства к судам, предназначенным для эксплуатации в условиях низких температур // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – Вып. 31. – 2008. – С. 69 – 80.

*В.Н. Тряскин, А.В. Дидковский, М.А. Кутейников,
Д.А. Грубов, А.В. Андрюшин*

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО СТРУКТУРЕ СВИДЕТЕЛЬСТВА О БЕЗОПАСНОСТИ СУДНА ЛЕДОВОГО ПЛАВАНИЯ И НОРМАТИВНО-МЕТОДИЧЕСКИХ УКАЗАНИЙ РС ДЛЯ ЕГО РАЗРАБОТКИ

Введение

В соответствии с Требованиями по оборудованию судов для обеспечения длительной эксплуатации при низких температурах [1] одним из документов, предъявляемых Российскому морскому регистру судоходства (далее – РС) на одобрение с целью присвоения дополнительного знака **WINTERIZATION(DAT)**¹ в основном символе класса, является Ледовый паспорт или Свидетельство о безопасности судна ледового плавания (далее – Свидетельство). Поэтому разработка нормативно-методических указаний РС, регламентирующих структуру и содержание такого документа, является частью работы по проблеме **WINTERIZATION**.

Идея создания документа, определяющего допустимые условия эксплуатации судна во льдах, имеет длинную историю. Впервые, по видимому, методика разработки такого документа обстоятельно была описана более 40 лет назад в монографии [2], изданной сотрудниками ААНИИ. Введено понятие «безопасная допустимая скорость» движения во льдах, с которой судно может двигаться без повреждения корпусных конструкций. Отмечено, что требования, предъявляемые к судну в отношении его ледовой ходкости и прочности корпуса, тесно связаны между собой и при определении безопасных скоростей движения судна во льдах должны учитываться совместно.

Для определения возможных безопасных режимов движения судна во льдах предложено совмещать кривые ледовой ходкости, представляемые в виде зависимостей скорости движения судна во льдах

¹ DAT – Design Ambient Temperature (расчетная внешняя температура, °С).

от толщины льда (или его сплоченности, интенсивности сжатия и т. п.) при различных режимах работы энергетической установки, и кривые «строительной и предельной прочности»² [2].

Для построения кривых ледовой ходкости в рассматриваемой монографии даны соответствующие рекомендации (алгоритмы и расчетные формулы). Для решения этой задачи необходимо располагать значениями эмпирических коэффициентов, полученными на основе данных модельных или натуральных испытаний.

Для построения кривых «строительной и предельной прочности» предложено использовать результаты исследований, приведенные в другой монографии, написанной также сотрудниками ААНИИ [3]. Из этой работы следует, что кривая «строительной прочности» соответствует таким скоростям движения, при которых наибольшие напряжения, возникающие в корпусных конструкциях в момент взаимодействия со льдом, равны пределу текучести материала (фибровая текучесть). Кривая «предельной прочности» определяется на основании расчета конструкций в упругопластической стадии и соответствует скоростям движения, при которых несущая способность конструкции считается исчерпанной.

В работе [2] отмечается, что максимальной эффективности использования флота в арктических и замерзающих неарктических морях можно добиться в том случае, если все суда будут плавать со скоростями, близкими к безопасно возможному. На основании этого делается вывод, что для каждого судна ледового плавания целесообразно иметь специальный документ, позволяющий судоводителям, планово-экономическим службам пароконств и руководству морских операций оперативно определять эти скорости. Такой документ было предложено назвать Ледовым паспортом судна. Предполагалось, что он позволит назначать технически обоснованные скорости движения с учетом ледовой ходкости и прочности корпуса судна, особенностей ледовых условий плавания.

По мнению авторов работы [2] Ледовый паспорт судна должен включать комплект диаграмм, определяющих допустимые скорости, построенных для различных видов работы судна во льдах (автономного плавания, движения в канале за ледоколом, буксировке), раз-

² Кривые «строительной и предельной прочности», введенные в работе [2], в современном представлении – это кривые ледовой прочности, построенные для различных допускаемых состояний конструкций корпуса судна.

личных периодов навигации и ледовых условий (сплошной, дрейфующий лед и т. п.). В Ледовый паспорт предложено включать данные о маневренных и инерционных характеристиках судна, надежности работы энергетической установки, прочности гребных валов и винтов, защищенности винтов и рулей, их соответствия ледовому классу судна. В случае несоответствия каких-либо элементов этим требованиям должны накладываться ограничения на скорость движения судна. Признается, что поправки на реальные условия плавания (например, метеорологические), не учитываемые в Ледовом паспорте, неизбежны, но это не снижает практической целесообразности такого документа.

С конца 60-х по конец 80-х гг. прошлого века ледовые паспорта были разработаны для большинства судов ледового плавания на методической основе работ [2, 3] в основном специалистами ААНИИ по заказу ЦНИИ Морского флота.

Следует отметить, что в конце 70-х гг. была создана новая методика построения кривых допустимых скоростей – кривых ледовой прочности. Эта методика была основана на гидродинамической модели взаимодействия корпуса судна со льдом, известной под названием модель Хейсина-Курдюмова [4]. Впервые соответствующие кривые допустимых скоростей были получены при обосновании высокоширотного рейса т/х «Капитан Мышевский» (1977 г.). Работа выполнялась по заказу ЦНИИ Морского флота сотрудниками кафедры конструкции судов ЛКИ (ныне СПбГМТУ) В.А.Курдюмовым и В.Н.Тряскиным под руководством Д.Е.Хейсина. Насколько известно, полученные результаты не противоречили практике ледового плавания. Четко зафиксировано понятие «ледовая прочность конструкций корпуса судна» – это предельно допустимые значения параметров, определяющих внешние условия и режим взаимодействия корпуса судна со льдом, которым соответствует заданное допускаемое состояние конструкций. Для различных режимов ударного взаимодействия корпуса со льдом такими параметрами будут: скорость движения судна во льдах V_0 , толщина льда H и характеристики прочности льда (динамическая прочность льда на раздробление a_p и предел прочности льда на изгиб σ_p).

Достаточно подробное описание алгоритма определения допустимых скоростей и построения кривых ледовой прочности на основе зависимостей гидродинамической модели, представлено в работах [5, 6] и обобщено в монографии [7].

Обстоятельные исследования ледовой прочности конструкций крупнотоннажного лихтеровоза «Севморпуть» на основе гидродина-

мической модели взаимодействия корпуса судна со льдом были выполнены сотрудниками кафедры конструкции судов ЛКИ в 1979 г. [8]. Эти исследования легли в основу соответствующего Ледового паспорта, разработанного ААНИИ по заказу ЦКБ «Балтсудопроект».

В монографии [7], также как и в [2], отмечено, что для достижения максимальной эффективности работы судов следует стремиться к повышению скоростей движения при различных условиях эксплуатации. При плавании на чистой воде скорость часто ограничена гидрометеорологическими и навигационными факторами, а при движении во льдах – прочностью корпуса. Опыт эксплуатации показывает, что основными причинами ледовых повреждений являются превышение некоторой безопасной скорости движения судна, несоблюдение безопасной дистанции в процессе ледокольной проводки, а также сильные ледовые сжатия. Они различны для каждого судна и зависят от ледовых условий. При их выборе надо, с одной стороны, избегать необоснованного риска, а с другой – не перестраховываться. Решение поставленной задачи сводится к согласованию требований в отношении ледовой ходкости, прочности и маневренности судна, которые зачастую противоречивы. Исходя из этих рассуждений, в работе [7] уточняются основные понятия:

безопасная возможная скорость – максимальная скорость, которую может развивать судно при автономном плавании или при движении в канале за ледоколом в заданных ледовых условиях, не подвергаясь риску получить повреждения корпусных конструкций;

безопасная эффективная дистанция проводки – минимально допустимое расстояние между ледоколом и судном, при котором исключается возможность столкновения в случае внезапной остановки ледокола или судна, идущего впереди каравана.

Действительно, наибольшую скорость судно может развить, следуя за ледоколом на короткой дистанции, т. к. при этом канал медленнее заполняется мелкобитым льдом и имеет наибольшую ширину. По мере увеличения дистанции сплоченность льда в канале возрастает, а при движении в дрейфующем льду его кромки успевают сомкнуться. Однако очень короткая дистанция опасна, так как при внезапной остановке ледокола судно, следующее за ним, не успевает погасить инерцию и может натолкнуться на корму ледокола. Подобные столкновения (навалы) нередки на практике. Иногда они сопровождаются серьезными повреждениями, на устранение которых требуются значительные затраты, что отражается на общих экономических показателях работы флота.

В работе [7] констатируется, что повреждения судов, вызванные ледовыми сжатиями, на практике встречаются относительно редко. Как правило, они бывают во время экспедиционных рейсов судов, которые проходят в особо сложных ледовых условиях. На действующих трассах судам, попавшим в сильное сжатие, удается оказать своевременную ледокольную помощь. Для корпуса современного судна опасность представляют только сильные сжатия, при которых оно не может двигаться и вынуждено дрейфовать в ожидании улучшения обстановки. В данном случае для оценки безопасности корпуса судна можно использовать предельную толщину льда, которую он способен выдержать при сжатии. Ее определяют при расчетах прочности.

Важные требования к Свидетельству вытекают из дополнительных нормативных документов. В частности, заслуживают внимания: Руководство для сквозного плавания судов по Северному морскому пути [9] и Правила классификации и постройки морских судов РС [1].

Руководство для сквозного плавания судов по Северному морскому пути. Рассматриваемый нормативный документ предназначен главным образом для плавсостава, эксплуатирующего судно в ледовых условиях. Большая часть его содержит подробное описание навигационных условий на Северном морском пути. Лишь небольшая часть посвящена практике эксплуатации судов при самостоятельном плавании и под проводкой ледокола.

Небольшая глава посвящена требованиям к конструкции, оборудованию и снабжению судов, следующих по Северному морскому пути. В ней содержатся требования (в основном дублирующие требования Правил РС) к корпусу, механической установке, системам и устройствам, техническим средствам судовождения и связи, снабжению и аварийному имуществу, комплектации экипажа, которые должен обеспечить проектант. Только два пункта имеют непосредственное отношение к Свидетельству:

1. *«Для обеспечения безопасного, с учетом прочности корпуса, плавания по трассам СМП рекомендуется иметь «Ледовый паспорт судна» или, при отсутствии такового, «Временные рекомендации по безопасным скоростям движения во льдах», позволяющие судоводителям определять скорость безопасного движения судна во льдах в зависимости от района эксплуатации и сезона ледовых условий на трассе, а также технического состояния корпуса».*

2. *«При решении вопроса о возможности плавания по трассам СМП отечественных судов, построенных по Правилам морского*

Регистра, действовавшим до 1981 г., техническое состояние, конструкция и прочность корпуса должны быть предметом специального рассмотрения Администрации (Штаба)».

Из приведенных требований следует одно важное положение, которое необходимо учитывать при разработке Свидетельства, а именно: расчеты прочности конструкций, подверженных воздействию ледовых нагрузок, а, следовательно, и определение допустимых скоростей необходимо производить с учетом реального технического состояния элементов корпуса судна (обшивки, балок набора).

Правила классификации и постройки морских судов. Отечественные Правила [1] в отношении ледовых паспортов содержат лишь формулировку общего характера:

«В Правилах предполагается, что в эксплуатации судовладелец будет руководствоваться требованиями Ледового паспорта судна, разработанного компетентной организацией и конкретизирующего условия безопасной эксплуатации судна во льдах, в зависимости от знака категории ледовых усилений, ледовых условий и ледокольного обеспечения» (п. 3.10.1.1.5 части II «Корпус»).

Наличие такого требования продиктовано стремлением обеспечить надежную эксплуатацию судна даже когда фактические условия взаимодействия корпуса со льдом отличаются от расчетных. Например, в таком практически возможном случае, когда фактическая осадка судна меньше расчетной, а параметры формы корпуса на уровне этой эксплуатационной осадки при проектировании ледовых усилений не контролируются и могут привести к существенно большей величине расчетных ледовых нагрузок. Так, в работе [10], где анализируются причины повреждения бортовых конструкций танкеров типа «Самотлор», показано, что расчетные ледовые нагрузки для балок бортового набора ледового пояса в носовой части на уровне осадки, соответствующей 80 % максимальной, могут более чем в два раза превышать проектные величины.

Дополнительно в Правилах вводится указание о возможности их применения *«только для судов ледового плавания и ледоколов с традиционной формой обводов корпуса, отвечающих требованиям 3.10.1.2. Возможность отступления от этих требований, а также использование нетрадиционной формы носовой оконечности (ложкообразной, плоскогранной и т. п.) являются предметом специального рассмотрения Регистром» (п. 3.10.1.1.4 части II «Корпус»).*

Действительно, при обосновании ледовых усилений корпуса трубокладочного судна для Арктики пр. 50020, имеющего плоскогранную

форму корпуса в носовой оконечности, требования указанных Правил применить не удалось [11]. Расчетные нагрузки определялись по специальной методике, согласованной с РС. В работе сделана оценка допустимых скоростей движения судна под проводкой ледокола «Арктика», т. е. разработаны элементы ледового паспорта или, скорее, «Временные рекомендации по безопасным скоростям движения во льдах» – в соответствии с формулировкой Руководства для сквозного плавания судов по Северному морскому пути.

Анализ структуры и содержания ледовых паспортов, разработанных для ряда судов, реально эксплуатирующихся в ледовых условиях, также представляет практический интерес для создания рассматриваемого документа. Такой анализ показал, что структура и содержание ледовых паспортов, разработанных двумя организациями (ААНИИ, ЦНИИМФ), традиционно занимавшимися этой проблемой, во многом схожи. Различными являются лишь методики определения достижимых и допустимых скоростей.

В документах, разработанных ААНИИ, приведены все необходимые зависимости для расчета характеристик кривых допустимых и достижимых скоростей или имеются ссылки на источники, где соответствующие методики или формулы описаны. В документах ЦНИИМФ такая информация часто отсутствует. Представляется, что документ такого же назначения, требующий согласования с РС, должен обеспечивать возможность контроля правильности всех выполненных расчетов.

В ледовых паспортах, разработанных в последние 20–25 лет, при определении допустимых скоростей – характеристик ледовой прочности корпусных конструкций используется гидродинамическая модель взаимодействия корпуса судна со льдом. Рассматриваются различные режимы взаимодействия: удар о кромку ледяного поля, удары о плавающие льдины заданной массы. В качестве критериев допускаемого состояния принимаются: критерии фибровой текучести, предельного состояния, нормативы допускаемых остаточных деформаций, полученные из Инструкции РС для оценки технического состояния. Расчеты прочности бортовых конструкций выполняются либо на основе требований Правил, либо с использованием конечно-элементных моделей перекрытий / частей корпуса судна.

Следует отметить, что существует недостаточная определенность при выборе расчетных параметров, определяющих ледовые нагрузки: значения динамической прочности льда на раздробление, предела прочности льда на изгиб, числовых параметров, входящих в формулы

для определения расчетных нагрузок. Это приведет к тому, что характеристики допустимых режимов, полученные разными разработчиками документа, будут отличаться. Указанное говорит о необходимости унификации методик и исходных данных для выполнения расчетов ледовой ходкости и ледовой прочности. Расчетные значения параметров, определяющих величину ледовых нагрузок, следует назначать с учетом опыта проектирования и эксплуатации судов во льдах (используя общепринятую философию разработки требований Правил). Такой подход позволит получать такие значения параметров допускаемых или опасных режимов эксплуатации (скоростей движения и характеристик ледяного покрова), которые не противоречат практике ледового плавания, т. е. обеспечивает приемлемую точность выполненных расчетов.

В ледовых паспортах используются специальные термины, которые могут по-разному пониматься разработчиками документа, судовладельцем и капитаном. Поэтому целесообразно в Свидетельстве привести терминологический словарь, определяющий основные понятия документа.

Для разработки Свидетельства необходимы специальные нормативно-методические указания (НМУ), которые должны регламентировать его статус, требования к организациям – разработчикам Свидетельства, порядок разработки и согласования, срок действия. В НМУ должна быть четко определена структура Свидетельства, даны рекомендации по содержанию и разработке каждого раздела. В НМУ должны быть определены (рекомендованы) методы расчета, даны указания для выбора параметров, входящих в расчетные зависимости.

Приведенный ретроспективный обзор работ по проблеме создания ледовых паспортов, а также изучение фактических документов (ледовых паспортов), разработанных для ряда судов, позволили определить структуру и содержание Свидетельства, а также подготовить первую версию НМУ РС для его разработки. Предлагаемая структура Свидетельства и краткая характеристика содержания его разделов рассмотрены ниже.

Структура Свидетельства о безопасности судна ледового плавания

1. Вводная часть. Дается характеристика содержания документа, его основного назначения, статуса Свидетельства, срока действия и условий при которых этот срок является правомочным.

2. Основные понятия и определения. Представлен список основных понятий и определений, используемых в Свидетельстве в целях однозначного понимания документа разработчиками и пользователями.

3. Характеристики судна. Приводится общая информация о судне и его подсистемах: корпусе, энергетической установке, винторулевом комплексе и т. д. Информация, приведенная в данном пункте, используется для выполнения расчетов и компоновки отчетного документа. При необходимости в приложении к Свидетельству представляются более подробные материалы: теоретический чертеж, конструктивные чертежи, содержащие необходимые данные о ледовых усилениях.

4. Определение ледовых условий в районах вероятной эксплуатации судна. Данный раздел Свидетельства содержит информацию о ледовых условиях в предполагаемых районах эксплуатации судна. Источники информации – обобщенные многолетние данные, заимствованные из официальных материалов соответствующих организаций, результаты аэрофотосъемки, спутниковые снимки, краткосрочные прогнозы.

5. Определение расчетных эксплуатационных режимов. Здесь конкретизируются расчетные режимы (сценарии) взаимодействия корпуса судна со льдом, подлежащие рассмотрению. Выбор расчетных сценариев производится в соответствии с указаниями (рекомендациями) НМУ в зависимости от категории ледовых усиления корпуса. Основа этих рекомендаций – обобщение опыта эксплуатации судов во льдах.

6. Определение достижимых скоростей движения судна. В этом разделе приводятся результаты расчетов ледовой ходкости судна в различных ледовых условиях (самостоятельно или под проводкой ледокола). Учитывая проблемы расчетов ледовой ходкости, в связи с необходимостью располагать данными натурных или модельных испытаний, этот раздел может быть исключен из документа. Взамен этого в Свидетельство должны быть включены указания капитану судна о необходимости контролировать скорость движения во льдах с учетом данных по допустимым скоростям, которые рассчитываются по фактической прочности корпусных конструкций с использованием зависимостей физической модели взаимодействия корпуса судна со льдом. Такая постановка значительно упрощает задачу разработки Свидетельства. Раздел является обязательным применительно ко вновь проектируемым судам, предназначенным

для активной эксплуатации во льдах, с категорией усиления корпуса **Arc5** и выше.

7. Определение допустимых скоростей движения судна в канале за ледоколом и при самостоятельном плавании в различных ледовых условиях. Раздел содержит результаты решения задачи оценки ледовой прочности (определения допустимой комбинации значений внешних параметров) для всех расчетных режимов (сценариев) взаимодействия корпуса судна со льдом, подлежащих рассмотрению (п. 5). Если рассматриваемое судно является судном двойного действия, оценка ледовой прочности конструкций кормовой оконечности – тоже одна из составляющих частей Свидетельства.

При расчетах ледовой прочности предлагается использовать критерий фибровой текучести – для балок основного набора и критерий ограниченных пластических деформаций, соответствующий условному состоянию: два пластических шарнира в опорных сечениях балки-полоски – для обшивки ледового пояса. Указанный подход соответствует допущению о малой вероятности повреждений конструкций ледового пояса при действии нормальных эксплуатационных нагрузок. Соответствующие характеристики опасных режимов могут быть оценены через коэффициенты запаса предельной прочности обшивки и набора с учетом зависимостей давления и погонной нагрузки от формы корпуса и скорости движения судна при ударе о лед.

Расчеты строительной прочности конструкций, которые являются неотъемлемой частью расчетов ледовой прочности, должны выполняться с учетом фактического технического состояния обшивки и набора ледового пояса на момент разработки свидетельства. Для вновь проектируемых судов расчеты базируются на строительной прочности конструкций нового судна. Для судов в эксплуатации разработку Свидетельства целесообразно согласовать со сроком очередного освидетельствования. В отдельных случаях, могут быть использованы результаты предыдущей дефектации, на основе которых фактическое состояние конструкции оценивается методом линейной экстраполяции.

Для решения задачи определения допустимых скоростей предлагается использовать специализированное программное обеспечение, отработанное в процессе многократного использования для решения таких задач.

8. Оценка безопасных дистанций движения судна под проводкой ледокола. В разделе представляются расчеты безопасных

дистанций проводки рассматриваемого судна в канале с различной сплоченностью льда. Решение этих задач также связано с необходимостью определять ледовую ходкость судна в различных ледовых условиях. Раздел является обязательным применительно ко вновь проектируемым судам, предназначенным для эксплуатации во льдах, как самостоятельно, так и под проводкой ледокола. Соответствующие указания для его разработки приведены в НМУ и в дополнительной литературе. Для эксплуатирующихся судов, реклассифицируемых судов указанная задача может быть решена с использованием данных близкого прототипа.

9. Оценка прочности бортовых конструкций при ледовых сжатиях. В данном разделе должны быть представлены расчеты предельной толщины льда, которую корпус судна способен выдержать при сжатии. Допускаемые значения толщины и прочности льда определяются на основе сопоставления несущей способности конструкции и ледяного покрова. Ни одно транспортное судно не может выдержать ледовые сжатия во льдах любой толщины и прочности. Поэтому при разработке Свидетельства ледовые сжатия следует считать предельным эксплуатационным режимом.

Для оценки несущей способности бортовых конструкций предлагается использовать модели определения предельных нагрузок. При этом размеры элементов конструкций принимаются с учетом их реального технического состояния.

Для оценки несущей способности ледяного покрова используются модели потери устойчивости, стесненного поворота, местного раздробления кромки при статическом смятии, разрушения льда от изгиба (для участков наклонного борта).

Результаты расчетов определяют ограничения на допустимые ледовые условия.

10. Оценка надежности ЭУ и винторулевого комплекса. Раздел должен включать данные о состоянии энергетической установки и гребных валов, соответствии мощности ЭУ нормативным требованиям для ледового класса судна (проблема часто возникает у эксплуатирующихся (старых) судов). Данные о маневренных качествах судна, состоянии гребных винтов, защищенности винтов и рулей, их соответствия ледовому классу судна.

11. Общие выводы и рекомендации. Раздел содержит в сжатой форме все основные результаты выполненных расчетов. В завершении дается заключение об уровне безопасности рассматриваемого судна в различных условиях.

Общий принцип построения нормативно-методических указаний (НМУ) для разработки Свидетельства о безопасности судна ледового плавания

НМУ регламентируют структуру и содержание каждого раздела Свидетельства, содержат описание методик расчета, состав входной и выходной информации. Каждый раздел необходимо (желательно) представлять в унифицированной форме (структуре). Рекомендуется принять следующую структуру:

- X. НАИМЕНОВАНИЕ РАЗДЕЛА**
- X.1. Цель**
- X.1.1. XXXX
- X.2. Методы**
- X.2.1. XXXX
- X.3. Исходные данные**
- X.3.1. XXXX
- X.4. Результаты**
- X.4.1. XXXX

В параграфе «Цель» дается описание назначения рассматриваемого раздела. Указывается, какие результаты должны быть получены при выполнении соответствующих расчетов.

В параграфе «Методы» дается краткое описание методики выполнения расчетов, приводятся основные расчетные зависимости. Если расчеты выполняются по программе, сертифицированной РС, указывается имя программы, данные сертификата.

В параграфе «Исходные данные» приводятся, например, значения условных параметров и коэффициентов, входящих в расчетные зависимости для определения ледовых нагрузок или характеристик ледовой ходкости, или определяются характеристики конструкций корпуса судна: система набора, шпация, расположение балок основного и рамного набора, предел текучести материала (для расчета их ледовой прочности) и т. п.

В параграфе «Результаты» приводятся результаты расчетов, представленные в табличной или графической форме.

Заключение

1. На начальном этапе (этапе опытной эксплуатации) НМУ РС для разработки Свидетельства должны иметь статус Руководства.

2. НМУ РС для разработки Свидетельства и соответствующие циркуляры должны давать возможность разработки такого документа любой компетентной организации.

3. РС должен располагать инструментом (методикой, программными средствами) для проверки результатов, представленных в Свидетельстве, разработанном по заказу судовладельца.

4. Соответствие результатов, предоставленных разработчиками Свидетельства, и результатов проверочных расчетов должно удовлетворять требованиям, которые должны регламентироваться в НМУ РС.

Список литературы

1. Правила классификации и постройки морских судов. – СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2010.

2. Каштелян В.Я., Позняк И.И., Рывлин А.Я. Соппротивление льда движению судна. – Л.: Судостроение, 1968. – 240 с.

3. Попов Ю.Н., Фаддеев О.В., Хейсин Д.Е., Яковлев А.А. Прочность судов, плавающих во льдах. – Л.: Судостроение, 1967. – 224 с.

4. Курдюмов В.А., Хейсин Д.Е. Гидродинамическая модель удара твердого тела о лед // Прикладная механика. – Киев, 1976. – Ч. XII. – № 10. – С. 103 – 109.

5. Курдюмов В.А., Хейсин Д.Е. Характеристики строительной и ледовой прочности конструкций ледового пояса ледоколов // Науч.-техн. сб. Регистра СССР. – Л.: Транспорт, 1976. – № 6.

6. Курдюмов В.А., Тряскин В.Н., Хейсин Д.Е. Определение ледовой прочности корпусов транспортных судов // Науч.-техн. сб. Регистра СССР. – Л.: Транспорт, 1979. – № 9.

7. Рывлин А.Я., Хейсин Д.Е. Испытания судов во льдах. – Л.: Судостроение, 1980. – 208 с.

8. Тряскин В.Н. Исследование работы бортовых конструкций транспортных судов ледового плавания / Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Л.: ЛКИ, 1979. – 191с.

9. Администрация Северного морского пути. Государственное гидрографическое предприятие министерства транспорта РФ. Руководство для сквозного плавания по СМП / Главное управление навигации и океанографии МО РФ, 1995. – 414 с.

10. Тряскин В.Н. Киреев В.Н. Некоторые причины повреждаемости конструкций корпуса танкеров ледового плавания // НТО Судостроителей имени академика А.Н.Крылова : Материалы по обмену опытом. Вып. 26. 300 лет Российскому флоту. Постройка и проектирование судов, ч. II. – СПб., 1996. – С. 161 – 172.

11. Расчетное определение ледовых усилений корпуса трубоукладочного судна пр. 50020 на категорию УЛ Правил Регистра / Научно-технический отчет. НИЧ ЛКИ. 1994. – 83 с.

М.Д. Емельянов

СИСТЕМА КОМПЬЮТЕРНОГО МОНИТОРИНГА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ МОРСКИХ СУДОВ С ОЦЕНКОЙ РИСКОВ

Необходимость оценки риска возникает тогда, когда из имеющихся вариантов технических решений требуется выбрать оптимальный с точки зрения минимизации затрат на его создание и возможных убытков от последствий реализации данного решения на практике.

С этой целью ИМО для морского судоходства в 1997 г. разработала Временное руководство по Формализованной оценке безопасности (ФОБ), а в 2007 г. представила консолидированный текст Руководства [1].

Формализованная оценка безопасности направлена на повышение безопасности в судоходстве и предназначена для использования в качестве инструмента при разработке новых Правил (регламентирующих документов), при сравнении существующих Правил с новыми нормативными документами, анализа различных технических и эксплуатационных решений, включая человеческий фактор, и установления баланса между безопасностью и ценой ее обеспечения. В ФОБ возможно сочетание данных по авариям и эксплуатационным отказам с творческим подходом. Главное достоинство ФОБ заключается в том, что недостаточность или отсутствие информации по авариям и отказам при оценке риска восполняется использованием экспертной оценки.

Заметим, что Формализованная оценка безопасности – не методика, с помощью которой инженер может рассчитать риски нанесения ущерба от различных аспектов деятельности судна. ФОБ – это методология, т. е. система правил и рекомендаций, которых следует придерживаться при проведении исследования, чтобы в результате получить ответ на конкретно заданный вопрос. Каждая такая оценка выливается в отдельное исследование, в котором участвуют высококвалифицированные специалисты разного профиля. Поэтому прямое использование ФОБ для решения инженерных задач оказывается до-

статочно трудоемким из-за необходимости проведения процедуры экспертной оценки. Кроме того, если независимые группы экспертов при решении одной и той же задачи придут к разным результатам, то это может поставить под сомнение достоверность самой методологии.

Источниками возможных погрешностей ФОБ могут быть следующие.

Во-первых, это ошибки при классификации аварийных случаев (АС). Например, рассмотрим следующее описание АС: «Судно стояло на якорной стоянке на внешнем рейде. Внезапно налетел шторм. В результате штормового воздействия произошел обрыв якорной цепи и судно выбросило на берег». На первый взгляд аварийный случай можно отнести к недостаточности якорного устройства. Однако это было бы ошибочным мнением, поскольку якорные устройства не рассчитываются на удержание судна во время шторма. При получении штормового предупреждения судоводитель должен был либо найти укрытие в закрытой гавани, либо выйти в открытое море. Т. е. данный аварийный случай следует отнести к навигационным авариям, причиной которого была ошибка судоводителя.

Во-вторых, при ранжировании тяжести последствий ФОБ не дает конкретных указаний, какие последствия следует считать незначительными, значительными, серьезными и катастрофическими. Это создает неопределенность при ранжировании, особенно, когда ущерб касается разных аспектов судна. Поэтому экспертам необходимо иметь ориентиры, которых они могли бы придерживаться, чтобы оценки выполнялись в едином масштабе. Ситуация усугубляется тем, что ФОБ предлагает оперировать с рангами, как если бы они принадлежали к равномерной шкале. Отметим, что ранг – это порядковый номер уровня. Интервалы между соседними рангами обычно неодинаковы и неизвестны, что с математической точки зрения делает некорректной операцию суммирования рангов тяжести последствий и частоты аварийного случая для получения индекса риска, предлагаемую ФОБ.

В-третьих, наибольшую погрешность привносит экспертная оценка частоты АС. Дело в том, что человеческий мозг – не бесстрастный компьютер. В человеческой памяти запечатлеваются наиболее яркие и значительные события, даже если они имели место один раз, а мелкие и рутинные, несмотря на неоднократное повторение, могут выпасть из памяти. Так, например, массовые аварийные случаи с нефтерудовозами в 2001 – 2003 гг. (по 2 – 3 АС в год на серию из 49 судов) создали впечатление о чрезвычайно низкой их надежности. Однако за период с 1998 по 2007 гг. аварийность нефтерудовозов в среднем не

отличалась от аварийности аналогичных рудовозов и навалочников и составляла для тех и других $0,028$ судолет⁻¹ [2]. Поэтому, если частоту событий определять, основываясь на памяти экспертов, то результат может оказаться чересчур грубым.

Для того, чтобы отмеченные недостатки не перечеркнули самое ценное в ФОб – идею экспертной оценки, Формализованную оценку безопасности следует рассматривать как методологическую основу для разработки инженерных подходов в оценке риска.

Поэтому **первой задачей** для осуществления управлением рисками является разработка достаточно простых и удобных для применения в инженерной практике методов их оценки.

На первый взгляд, такая задача выглядит трудновыполнимой из-за необходимости составления полно-вероятностной модели такой сложной инженерной системы, включающей человеческий элемент, какой является система «судно-груз-человек». Но если задачу сузить и рассматривать только критические узлы и элементы, отказ которых приводит к высокому риску нанесения ущерба, то количество рассматриваемых элементов системы можно существенно уменьшить.

Второй задачей внедрения численной оценки риска для широкого круга эксплуатирующихся судов является организация компьютерной системы сбора и обработки информации по судам.

Третья задача по оценке рисков заключается в том, чтобы сделать форму представления ее результатов простой, наглядной и исчерпывающей для всех участников морских перевозок (судовладельцев, судового экипажа, классификационного общества, органов государственного контроля, фрахтователей и страховщиков).

Риск нанесения ущерба от аварийного случая

Риск нанесения ущерба R обычно выражают формулой

$$R = P \cdot C, \tag{1}$$

где P – вероятность наступления неблагоприятного события;

C – возможный ущерб при наступлении неблагоприятного события.

Тяжесть последствий от инцидента может быть неодинакова для судна, груза, человека и для окружающей среды. С формальной точки зрения оценку риска следовало бы осуществлять по этим видам ущерба.

К сожалению, в настоящее время отсутствует общепринятый подход в оценке размера возможного ущерба при человеческих потерях и нанесении вреда окружающей среде. Сбор фактических данных достаточно трудоемок, зачастую они являются коммерческой тайной, что не позволяет получить исчерпывающий объем информации для практического применения.

Универсальный подход в оценке ущерба при наступлении аварийного случая предлагается как в ФОб, так и при оценке технического состояния судов по методу *CAP* (Condition Assessment Program), которая разрабатывалась ведущими классификационными обществами, начиная с 1980 г., в том числе и Российским морским регистром судоходства (РС) [3]. Суть оценки тяжести последствий аварийного случая в этих подходах заключается в назначении степени ущерба S , соответствующей определенному ущербу для человека, судна и окружающей среды.

Предлагаемая классификация последствий аварийных случаев является попыткой представить возможный ущерб в одномерном виде, при котором риск R возникновения ущерба определяется по формуле (1), в которой возможный ущерб C представлен в виде

$$C \approx C_0 \cdot 10^{-(S_{max} - S)}, \quad (2)$$

где C_0 – ущерб при катастрофических последствиях;
 S_{max} – максимальное значение степени ущерба;
 S – степень ущерба.

Для предварительного анализа рисков удобно выразить его в логарифмической форме через индексы. Логарифмируя формулу (1), с учетом выражения (2), получим:

$$\lg R = \lg C + \lg P = Const + S + I_F,$$

откуда индекс риска I_R может быть представлен в виде

$$I_R = S + I_F, \quad (3)$$

где I_F – индекс частоты.

Выражение (3) для индекса риска I_R позволяет оценивать риск по результатам экспертной оценки степени ущерба S и частоты, вычисленной путем обработки статистических данных по аварийности.

В Руководстве ИМО по ФОб, в стандартах ISO/TC 108 SC 5 № 179, ISO/DIS 13379 и ГОСТ 27.310-95 приведен подход при оценке вероятностей отказов с использованием групп по частоте их возникновения. В случае использования шкалы из 7 рангов и представления частоты в десятичных логарифмах, индекс частоты рассчитывается по формуле $I_F = 7 + \lg F$.

Оценка тяжести ущерба от аварийного случая

Для определения степени ущерба, который эксперты должны оценить по описаниям, приведенным в Извещении или в Акте о внеочередном освидетельствовании в связи с аварийным случаем, необходимо располагать таблицей, которая связывала бы качественное описание развития АС и их последствий со степенью ущерба S .

Основу ранжирования составляет степень утери мореходных качеств судна и ее продолжительность, дополненная степенью нанесения вреда жизни и здоровью людей, потенциальной угрозы безопасности судна и экологического ущерба.

В результате можно получить табл. 1, содержащую 7 рангов, которая устанавливает соответствие между описанием последствий АС с рангом тяжести последствий R_s .

В основу классификации по видам опасностей или видам аварийных случаев (видам АС) положены такие состояния судна, при которых создается реальная угроза его безопасности и происходит утеря мореходных качеств. К таким состояниям относятся 6 основных видов опасностей [2], а именно:

повреждение корпуса и нарушение его целостности вследствие воздействия внешних экстремальных эксплуатационных нагрузок;

опрокидывание судна или чрезмерное его накренение, не позволяющее продолжить рейс;

затопление судна (потеря плавучести), непосредственно не связанное с воздействием экстремальных эксплуатационных нагрузок;

потеря хода и управляемости вследствие отказа механической установки или вало-винто-рулевого комплекса;

контакт с внешними объектами (навигационные АС);

пожар или взрыв в помещениях судна.

С помощью табл. 1 можно построить гистограммы распределения рангов тяжести последствий для основных видов опасностей (АС). Анализ форм гистограмм, выполненный в работе [4], показывает, что они являются результатом наложения элементарных плотностей ве-

роятностей R_s , возникающих при отказе отдельных элементов судна, форма которых близка к треугольному закону.

Треугольный закон для правой ветви распределения степени ущерба S от моды S_{mod} вытекает из принципа эквивалентности потерь, который гласит: «100 инцидентов с единичным ущербом эквивалентны 1 инциденту с 100-кратным ущербом». Снижение плотности вероятности S влево от моды можно объяснить тем, что при незначительном ущербе повреждения могут не превышать предельно-допустимых значений и, соответственно, не фиксироваться; быть не обнаружены сразу после АС и устраняться при плановых ремонтах или, наконец, ввиду незначительности ущерба администрация судна может не ставить в известность об инциденте классификационное общество.

Приняв в качестве рабочей гипотезы треугольный закон распределения для плотности вероятности степени ущерба S , можно определить нижнюю S_n и верхнюю S_b границы для каждого ранга и его соответствие среднему значению S_{cp} .

Для этого сведем данные по всем опасностям вместе и получим гистограмму, приведенную на рис. 1.

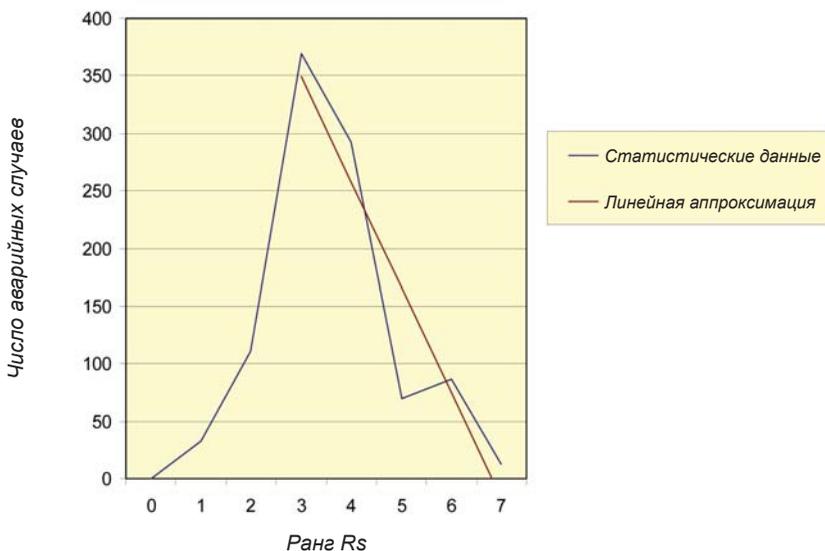


Рис. 1
Распределение тяжести потерь за период 1993 – 2008 гг. ($N = 975$)

Линейная аппроксимация методом наименьших квадратов показала хорошую сходимость с коэффициентом корреляции $r = -0,94$. По расчетным зависимостям, приведенным в работе [4], определялись границы $S_{i,i+1}$ между рангами тяжести последствий Rs_i и Rs_{i+1} и средние значения S_{cpi} степени ущерба для i -го ранга, которые представлены в табл. 2.

Полученные значения S_{cpi} свидетельствуют о достаточно хорошем совпадении с номером ранга. Практическая значимость табл. 2 заключается в том, что с ее помощью даже один эксперт может обрабатывать Извещения об АС и Акты внеочередных освидетельствований с присвоением соответствующего ранга Rs и степени ущерба S по каждому аварийному случаю.

Теперь плотность вероятности распределения степени ущерба $p_S(S)$ для элементарных ущербов может быть записана в виде

$$p_S(S) = \begin{cases} a_1 S - b_1 & \text{при } S \leq S_{mod}; \\ b_2 - a_2 S & \text{при } S > S_{mod}, \end{cases} \quad (4)$$

где S_{mod} – мода распределения S ;
 a_1, b_1, a_2, b_2 – параметры треугольного закона распределения, определяемые из выражений:

$$a_1 = \frac{2}{(S_2 - S_1)(S_{mod} - S_1)}; \quad b_1 = \frac{2 \cdot S_1}{(S_2 - S_1)(S_{mod} - S_1)};$$

$$a_2 = \frac{2}{(S_2 - S_1)(S_2 - S_{mod})}; \quad b_2 = \frac{2 \cdot S_2}{(S_2 - S_1)(S_2 - S_{mod})};$$

S_1, S_2 – наименьшее и наибольшее значения степени ущерба, соответственно, определяемые из табл. 1.

Оценка уровня риска в индексах

После установления соответствия степени ущерба с номером ранга можно с помощью формулы (3) вычислить индексы риска для видов и подвидов опасности, модулей, узлов и элементов системы «судно-груз-человек».

**Номер ранга R_s и степень ущерба S
в зависимости от тяжести последствий АС**

R_s	Масштаб последствий	Последствия	S_{cp}	Нижняя граница S_n	Верхняя граница S_v
1	2	3	4	5	6
0	Несущественный	Никакого существенного вреда людям, не влияет на эксплуатационную безопасность, не имеет заметных последствий			
1	Незначительный	Незначительное ухудшение характеристик управления или допустимых условий эксплуатации; локальный пожар без повреждения ответственного электрооборудования и кабелей, ликвидированный переносными средствами пожаротушения или судовой противопожарной системой без привлечения посторонней помощи	1,22	0,5	1,5
2		Умеренные повреждения без утраты мореходных качеств; кратковременная потеря мореходных качеств с проведением аварийно-ремонтных работ силами экипажа или нахождение на мели менее 24 ч; смещение груза без утраты мореходных качеств; умеренные повреждения лопастей гребного винта; вмятины в НО или бухтины ВП без нарушения герметичности; повреждения фальшборта, конструкций надстроек выше 1-го яруса; пожар в пределах грузового отсека, в МО, в нескольких помещениях надстройки без повреждения ответственного электрооборудования и кабелей	2,14	1,5	2,5

1	2	3	4	5	6
3	Значительный	Потеря, по крайней мере, одного мореходного качества или посадка на мель на срок свыше 24 ч; существенное ухудшение эксплуатационных характеристик и характеристик управления, но позволяющее закончить рейс; легкие травмы или заболевания вследствие АС; облом лопасти гребного винта; отказ ГД или редуктора в СЭУ из 2-х и более ГД, отказ валопровода и винторулевого комплекса в 2-х и более вальной движительной установке; нарушение герметичности ВП, НО выше ватерлинии или в районе двойного борта, второго дна, форпика; пожар с повреждением конвенционного электрооборудования и кабелей	3,13	2,5	3,60
4		Необходимость получения посторонней помощи или буксировки; тяжелые травмы или заболевания; поступление воды в отсек с сохранением плавучести судна; пожар с повреждением электрооборудования и кабелей, обеспечивающих управление, контроль и энергообеспечение судна	4,33	3,60	4,86
5	Опасный	Повреждение судна, приведшее к гибели людей; значительные повреждения, создающие угрозу безопасности судна; поперечные трещины в миделевом сечении корпуса; необходимость получения посторонней помощи; поступление воды в отсек с угрозой затопления судна; затопление МО с сохранением плавучести; выгорание всех помещений надстройки	5,10	4,86	5,32
6	Катастрофический	Гибель судна, единичные смерти; выгорание всех помещений судна; загрязнение окружающей среды	5,80	5,32	6,27
7		Гибель судна и людей; серьезный экологический ущерб	6,47	6,27	6,81
Примечание. ГД – главный двигатель; НО – наружная обшивка; ВП – верхняя палуба; СЭУ – судовая энергетическая установка; МО – машинное отделение.					

Результаты вычисления индексов риска для видов и подвидов опасностей, приведенные в [4], позволяют сделать ряд частных выводов относительно безопасности тех или иных технических решений.

Так, например, применение дублирующих технических средств (2-х и более главных двигателей, валопроводов, гребных винтов и рулей) приводит к снижению ущерба приблизительно на 1 порядок (на 10^1). В то же время сравнение подвидов опасностей «Столкновение» и «Посадка на мель» показывает, что эффективность конструктивных защитных мер (двойных бортов, второго дна) разная: около 1,6 порядка – для двойных бортов при столкновении и около 0,5 порядка – для второго дна при посадке на мель. Меньшее снижение степени ущерба при наличии второго дна в случае посадки на мель можно объяснить тем, что повреждения днищевой обшивки более обширны и могут охватывать днище по всей длине судна. Вторая причина заключается в том, что настил второго дна может иметь скрытые трещины или сквозную коррозию, которые не удастся обнаружить путем визуального осмотра, даже при наличии свободного доступа к ним.

Допустимый уровень риска

Для выявления критичных узлов и элементов, отказ которых может привести к тяжелым последствиям, необходимо задаться граничным уровнем риска, при котором элементы с меньшим значением риска могут быть исключены из рассмотрения. Выбор граничного уровня риска произволен, но он не должен быть чрезмерно высоким, чтобы не исключить элементы с достаточно серьезным вкладом в риск, и не должен быть чрезмерно низким, чтобы необоснованно не перегружать перечень критичных элементов членами с несущественным вкладом в риск.

В ФОб есть понятие допустимого уровня риска, имеющего нижнюю и верхнюю границы. Нижней границей считается та, ниже которой риск ничтожен и может не приниматься во внимание. Верхняя граница означает то, что риск выше нее недопустим ни в каких случаях и должен быть уменьшен любой ценой. Риск, находящийся между этими границами, является областью регулирования, в которой рассматриваются мероприятия по минимизации суммы затрат на повышение безопасности и цена риска.

В качестве граничного уровня риска примем верхнюю границу допустимого риска. В этом случае в перечне критичных элементов и

узлов останутся только те, отказ которых необходимо предотвратить и которые должны стать предметом пристального внимания. В ФОб верхней границей допустимого риска предлагается считать смерть члена экипажа с вероятностью 10^{-3} в год на судно. В этом случае допустимое значение индекса риска по всем видам опасностей будет соответствовать $[I_R] = 9,10$.

При дроблении генеральной совокупности аварийных случаев на более мелкие статистические группы по видам опасностей, их подвидам и критичным элементам (узлам) допустимое значение индекса риска необходимо откорректировать следующим образом:

$$[I_R]_i = 9,10 + \lg(G_i);$$

$$[I_R]_{ij} = 9,10 + \lg(G_j) + \lg(g_{ij});$$

$$[I_R]_{ijk} = 9,10 + \lg(G_k) + \lg(g_{ij}) + \lg(y_{ijk}),$$

где G_i, g_{ij}, y_{ijk} – удельный вес (относительная частота), соответственно, вида опасности, его подвида и критичного элемента (узла), причем $\sum_i G_i = 1, \sum_j g_{ij} = 1, \sum_k y_{ijk} = 1$;
 i, j, k – порядковые номера, соответственно, вида опасности, его подвида и критичного элемента (узла).

Результаты вычисления превышения фактическим риском его допустимого уровня для видов и подвидов опасностей [4] в сокращенном виде приведены в табл. 2. Относительная частота возникновения аварийных случаев по видам опасностей и соответствующий им риск представлены на рис. 2. Для определения во сколько раз фактический риск превышает допустимый уровень, необходимо число 10 возвести в степень превышения, обозначенную на диаграмме красным цветом.

Таблица 2

Удельный вес вида G_i и подвида g_{ij} опасностей, степень ущерба S , фактический индекс риска I_R и его допустимый уровень $[I_R]$

№	Наименование вида и подвида опасности	Уд.вес	I_R	$[I_R]$
1	2	3	4	5
1	Повреждение корпуса	0,034	9,101	7,629
1.1	Нарушение общей прочности корпуса	0,152	8,969	6,809
1.2	Ледовые повреждения	0,667	8,517	7,453
1.3	Повреждение палубных конструкций	0,090	5,754	6,588

Продолжение табл. 2

1	2	3	4	5
1.4	Повреждение конструкций ахтерштевня и пяты рудерпоста	0,061	5,750	6,411
1.5	Отрыв кронштейна гребного вала	0,030	5,449	6,110
2	Опрокидывание судна	0,037	9,556	7,667
2.1	Неправильная загрузка	0,472	9,137	7,341
2.2	Смещение груза	0,333	9,251	7,190
2.3	Обледенение ($L < 30$ м)	0,195	8,596	6,956
3	Затопление	0,020	9,386	7,390
3.1	Коррозионные повреждения НО	0,400	9,094	6,992
3.2	Коррозионные повреждения трубопроводов	0,500	9,043	7,089
3.3	Нарушение герметичности наружных закрытий	0,100	7,940	6,390
4	Потеря хода и управляемости	0,511	9,250	8,808
4.1	Отказ ГД с эластичной муфтой	0,569	9,539	8,563
4.2	Отказ редуктора	0,031	7,475	7,297
4.3	Отказ валопровода с дейдвудным устройством	0,175	8,029	8,052
4.4	Отказ гребного винта	0,116	8,092	7,873
4.5	Отказ рулевого устройства	0,109	7,950	7,846
5	Контакт с внешними объектами	0,261	9,581	8,516
5.1	Столкновение	0,210	8,777	7,839
5.2	Навал	0,435	7,524	8,154
5.3	Посадка на мель	0,350	9,580	8,060
	Другие	0,005	3,577	6,185
6	Пожар/Взрыв	0,137	9,022	8,238
6.1	Замыкание электропроводки, возгорание штатных электроприборов	0,300	8,611	7,715
6.2	Неосторожное обращение с огнем в быту, использование нештатных бытовых нагревательных приборов	0,100	8,344	7,238
6.3	Проведение ремонтных (сварочных, огневых или окрасочных) работ	0,211	8,432	7,562
6.4	Попадания топлива или масла на горячие поверхности работающего двигателя	0,111	7,461	7,284
6.5	Взрыв паров масел в картере ДВС, выброс пламени из котла	0,033	7,525	6,761
6.6	Воспламенение в выхлопном тракте	0,022	6,714	6,585

1	2	3	4	5
6.7	Самовоспламенение груза, тары	0,089	7,671	7,187
6.8	Самовоспламенение пожароопасных материалов	0,056	5,993	6,983
6.9	Удар молнии	0,022	5,529	6,585
6.10	Умышленный поджог (взрыв)	0,011	6,413	6,284
	Причина не установлена	0,044	7,539	6,886

Примечание. – подвиды опасностей, у которых значение фактического индекса риска меньше допускаемого уровня.

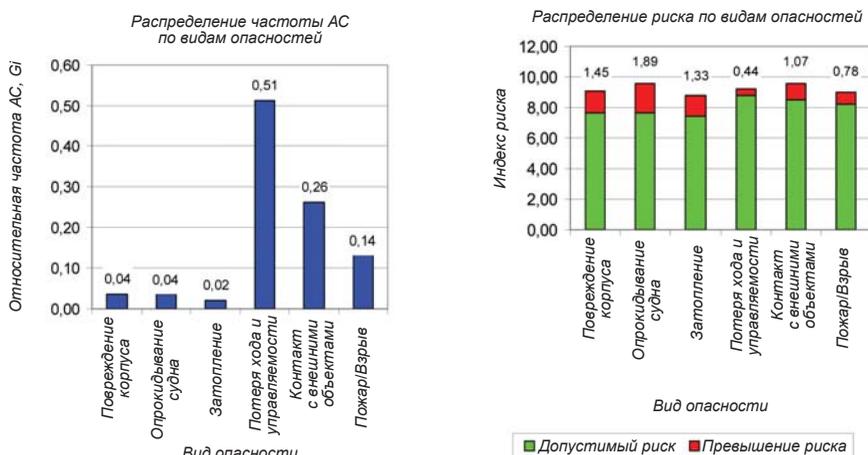


Рис. 2
Относительная частота (удельный вес) G_i и индекс риска I_R для основных видов опасностей

Выявление критичных элементов

Сопоставление относительной частоты возникновения и индекса риска по видам опасностей позволяет правильно расставить приоритеты. Несмотря на то, что аварийные случаи вида: «Потеря хода и управляемости» встречается почти в 50 % всех аварийных случаев, они наименее опасны. При этом достаточно редкие виды АС, такие

как: «Повреждение корпуса», «Опрокидывание судна» и «Затопление судна» – несут наибольший риск нанесения ущерба.

Отбор критичных элементов и узлов выполняется для тех подвигов опасностей, фактическое значение риска которых превышает допустимый уровень.

Процедура выявления критичных элементов состоит в следующем. В процессе обработки Актов о внеочередном освидетельствовании судна в связи с аварийным случаем или Извещений о них определяются первопричинные элементы, отказ которых приводит к АС. После группировки этих элементов вычисляются фактическое значение риска и его допустимый уровень. Критичным элементом принимается тот, у которого фактический риск превышает допустимый уровень.

Выявленные критичные элементы важны не только как этап в оценке риска для всего судна, но и представляют самостоятельный интерес, так как знание «узких мест» способствует снижению аварийности и тяжести последствий.

Значения фактического риска критичных элементов могут оказаться полезными и производителям судового оборудования. Обычно проектант и изготовитель при выборе необходимого уровня надежности ориентируются на минимизацию суммарных затрат на изготовление оборудования и его ремонт в эксплуатации. При этом возможные последствия при отказе оборудования на судне, выполняющем коммерческий рейс, зачастую не рассматриваются. В то же время, например, в случае отказа топливного насоса высокого давления (ТНВД) и отсутствия запасного на судне, его стоимость является ничтожной по сравнению с издержками, вызванными задержкой в доставке груза, стоимостью услуг по буксировке судна и выведением его из эксплуатации для проведения ремонтных работ.

Чтобы получить более точную оценку риска по конкретному судну с учетом его фактического технического состояния, следует проанализировать причины отказов критичных элементов с составлением расчетных зависимостей по вероятности возникновения отказа и оценить эффективность защитных мер, снижающих степень ущерба при возникновении аварийного случая.

Для этого необходимо определить факторы, влияющие на частоту и тяжесть последствий отказов, выявить технические параметры, характеризующие состояние критичного элемента, и установить критерии наступления предельного состояния для него. Тогда при наличии математической модели наступления отказа вероятность возникновения аварийного случая P может быть получена из условия

$$P = Pr[x \geq x_{пр}], \quad (5)$$

где x – параметр, характеризующий состояние критического элемента;
 $x_{пр}$ – предельное состояние критического элемента.

В случае отсутствия математической модели можно воспользоваться результатами статистического факторного анализа и заменить вероятности P на частоту возникновения аварийного случая f для разных уровней влияющих факторов.

Таким образом, используя выражения для вероятности возникновения АС (5), плотности вероятности распределения степени ущерба (4) или среднее значение степени ущерба, а также зависимость (2), можно оценить по формуле (1) риск нанесения ущерба при отказе данного критического элемента, находящегося в определенном техническом состоянии и в конкретных условиях эксплуатации.

Система компьютерного мониторинга технического состояния судов с оценкой риска

Компьютер способен выполнять по заданному алгоритму миллионы операций в секунду. Но время, необходимое на расчеты риска, будет определяться трудоемкостью сбора необходимой информации и ее ручным вводом в компьютер. При этом часть из этой необходимой информации может не сохраняться на судне. В результате основная часть первичной информации по техническому состоянию безвозвратно теряется.

Суть Системы компьютерного мониторинга технического состояния судов заключается в том, чтобы сохранить ту информацию, которая предоставляется инспектору Регистра при проведении очередных освидетельствований, ходовых и швартовных испытаний и т. п.

Причем, форма хранения информации должна быть пригодна для автоматизированной обработки данных и содержать значения параметров, характеризующих техническое состояние критических элементов. Наиболее подходящими для этой цели являются форматы типа *Excel* и *Access* либо такие макеты документов, которые позволяют выполнять компьютерную обработку данных.

В настоящее время основные документы, содержащие информацию о техническом состоянии судна (акты очередных и внеочередных освидетельствований, акты дефектаций, ходовых и швартовных испытаний и т. п.), хранятся в текстовом формате *Word* или в графиче-

ческом формате *Adobe*, не предназначенных для работы с числовой информацией.

В то же время создание и пополнение базы данных по техническому состоянию судов не требует существенного вложения труда и средств, если отчетные документы будут выполнены, например, в формате *Excel*. В случае, если в Регистр будут предоставляться документы как на бумажном носителе, так и в электронном виде требуемого формата, то ввод контролируемых параметров в базу данных будет осуществляться по программе в автоматизированном режиме. При этом внешне на бумажном носителе отчетные документы ничем не будут отличаться от применяемых в настоящее время. Таким образом, без заметного увеличения трудоемкости по оформлению отчетных документов будет осуществляться автоматическое пополнение базы данных по техническому состоянию судов.

В идеале функционирование системы компьютерного мониторинга может выглядеть следующим образом.

Инспектор Регистра с удаленного терминала, «кликнув» мышкой по кнопке меню, может сделать запрос, например, о состоянии обшивки корпуса конкретного судна через какой-то промежуток времени. По этой команде программа обрабатывает данные предыдущих дефектаций и делает прогноз состояния обшивки корпуса на требуемую дату. Подобные ситуации возникают, в тех случаях, когда судовладелец обращается в Регистр об отсрочке в прохождении очередного освидетельствовании и выдаче Временного классификационного свидетельства. При этом количество возможных прикладных программ может быть неограниченным.

Создание базы данных по техническому состоянию судов существенно расширяет возможности инспектора Регистра и снижает вероятность допустить ошибку при осуществлении им наблюдения за судном.

В настоящее время инспектор Регистра, зачастую, оказывается в положении врача, который видит пациента впервые. Но если врачу может помочь в постановке диагноза «история болезни», то инспектор лишен этой возможности. В результате, он вынужден в условиях ограниченного времени проводить обследование в том объеме и тех элементах судна, которые, на его взгляд, наиболее важны.

С вводом в действие Системы компьютерного мониторинга ситуация кардинально меняется.

Теперь перед проведением обследования инспектор по запросу может получить от Системы информацию об элементах, узлах и

районах судна, где значения технических параметров приближаются к предельно-допустимым величинам с ранжированием по значимости. И, как результат, его обследование будет носить более целенаправленный характер, что снизит уровень аварийности судов.

Паспорт безопасности судна

Как показывает практика, в большинстве случаев причиной аварий является человеческий фактор. Принятию оператором необоснованно рискованных решений способствует бытующее представление о том, что инженерные конструкции рассчитываются с достаточным запасом прочности и некоторое превышение технических норм не опасно. В действительности это не так. Например, для судов, имеющих ограничение по районам плавания, превышение допустимой балльности волнения (высоты волны 3-процентной обеспеченности) на 25 % приводит к возрастанию вероятности перелома корпуса в 6 – 7 раз. Многих инцидентов можно было бы избежать, если судовой экипаж был бы информирован об «узких местах», не шел на необоснованный риск и смог бы предусмотреть дополнительные меры безопасности. В порядке обсуждения предлагается эту информацию привести в Паспорте безопасности судна.

В отличие от различных разрешительных Свидетельств этот вид документа является информационным, предоставляющим сведения о возможных опасностях, критичных элементах и уровне риска.

Впервые в практике морского судоходства подобный документ появился в виде Ледового паспорта, который давал информацию о безопасных режимах движения судна в ледовых условиях и вначале носил рекомендательный характер.

Для веществ и материалов с 1994 г. был введен в действие Паспорт безопасности (ГОСТ Р 50587-93), который предназначался для обеспечения потребителя достоверной информацией по безопасности промышленного применения, хранения, транспортирования и утилизации веществ и материалов, а также их использования в бытовых целях.

Приказом МЧС от 4 ноября 2004 г. № 506 был введен в действие Паспорт безопасности опасного объекта с целью определения показателей степени риска возникновения чрезвычайной ситуации (ЧС) для персонала опасного объекта и проживающего вблизи населения; оценке возможных последствий ЧС на опасном объекте и на прилегающей территории; установления готовности к ликвидации ЧС и к смягчению его последствий.

Идея создания Паспорта безопасности для судна не нова, и МЧС рассматривал возможность отнесения судна к опасным объектам. Так, например, по классификации потенциально опасных объектов с угрозой возникновения техногенных чрезвычайных ситуаций, разработанной РАЕН и Московским институтом пожарной безопасности, морской транспорт по степени опасности относится к следующим классам:

радиационно опасные объекты (суда с ядерными двигательными установками и с радиоактивными грузами);

химически опасные объекты (суда с химически опасными веществами);

взрыво- и пожароопасные объекты (суда с нефтью и нефтепродуктами, со сжиженными газами);

опасные транспортные средства (все остальные суда).

Для всех очевидно, что любое береговое предприятие, связанное с обработкой нефтепродуктов, является опасным промышленным объектом. Поэтому танкер или любое другое судно, перевозящее опасные грузы, тем более является опасным объектом, так как кроме возможных отказов технических средств судно подвержено воздействию экстремальных внешних нагрузок и может стать участником транспортного происшествия.

Кроме судов, перевозящих опасные грузы, Паспорт безопасности целесообразно распространить на те типы морских судов, которые имеют повышенную аварийность. На рис. 3 приведена диаграмма аварийности для судов разных типов, полученная в результате обработки данных РС по авариям за период с 1998 – 2007 гг. [2].

Условно, по степени аварийности суда можно объединить в следующие группы:

суда с очень высокой степенью аварийности (более 0,030 аварийных случаев на судно в год): нефтеналивные суда смешанного (река-море) плавания и накатные грузовые суда;

суда с высокой степенью аварийности (0,025 ÷ 0,030 аварийных случаев на судно в год): суда для перевозки генеральных грузов, навалочные и нефтерудовозы;

суда со средней степенью аварийности (0,020 ÷ 0,025 аварийных случаев на судно в год): нефтеналивные суда, химовозы и пассажирские круизные суда;

суда с умеренной степенью аварийности (0,015 ÷ 0,020 аварийных случаев на судно в год): контейнерные, рефрижераторные и грузопассажирские суда;

суда с низкой степенью аварийности (менее 0,015 аварийных случаев на судно в год): пассажирские бескоечные (прогулочные) суда и суда обеспечения плавучих буровых установок.

Из представленной диаграммы на рис. 3 следует, что численная оценка рисков, в первую очередь, необходима для судов с очень высокой и высокой аварийностью. Учитывая тяжесть возможных последствий при аварии для пассажирских круизных судов, оценка риска, по-видимому, необходима и для этих судов.

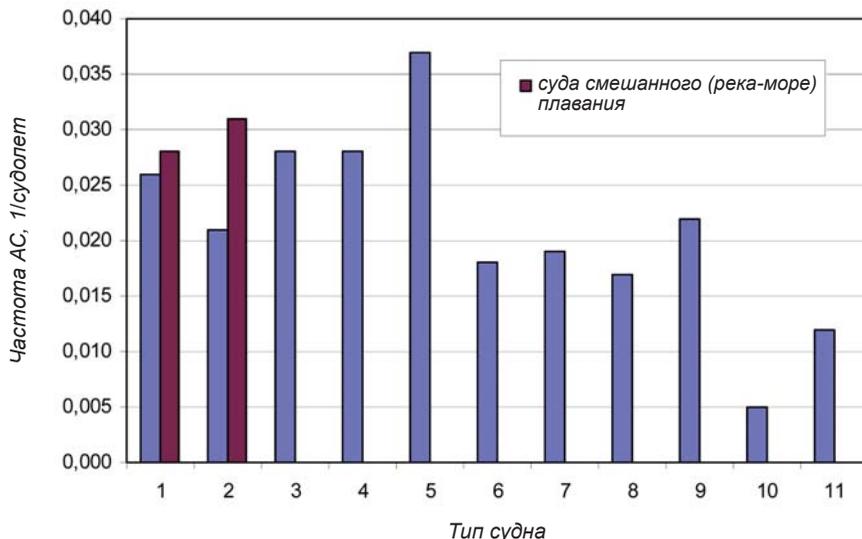


Рис. 3

Аварийность судов разных типов:

- 1 – суда для перевозки генеральных грузов (самоходные);
- 2 – нефтеналивные и нефтеналивные/химовозы; 3 – рудовозы и навалочные суда;
- 4 – нефтерудовозы; 5 – накатные грузовые суда; 6 – контейнерные суда;
- 7 – рефрижераторные суда; 8 – грузопассажирские суда; 9 – пассажирские (круизные) суда; 10 – пассажирские бескоечные суда; 11 – суда обеспечения (ПБУ)

Отметим, что Паспорт безопасности судна гармонично вписывается в Российское законодательство, в частности, в Федеральный Закон от 21.07.1997 № 116-ФЗ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов».

Заключение

Применение теории риска в инженерной практике является логическим продолжением вероятностного подхода, при котором уровень надежности выбирается в зависимости от возможных последствий при повреждении (отказе) элементов объекта, и направлено на повышение безопасности. При этом оценка риска служит той мерой, которая еще на стадии предварительной проработки из имеющихся вариантов технических решений позволяет осуществить оптимальный выбор с точки зрения затрат на создание и возможных убытков при реализации данного решения на практике.

Однако ее широкое применение на эксплуатирующихся судах невозможно без информационной базы, которая является основой Системы компьютерного мониторинга технического состояния судов.

Система компьютерного мониторинга технического состояния судов органично дополняет Систему управления безопасностью (СУБ), Систему управления движением судов (СУДС), электронные картографические системы с позиционированием и образует интегральную систему безопасности, охватывающую все основные аспекты судна:

политику безопасности судоходной компании;

навигационную безопасность;

техническую безопасность и безопасность всей системы «судно–груз–человек».

При этом создание Системы компьютерного мониторинга не требует существенных материальных вложений и сводится к организационным мероприятиям по сохранению информации о техническом состоянии объекта, которой располагает Регистр при осуществлении им наблюдения за судами в эксплуатации.

Развитие методов и технологий теории рисков и создание базы данных по техническому состоянию судов могут оказаться полезными как при осуществлении наблюдения за судами в эксплуатации, так и при разработке новых Правил РС или их корректировке.

Список литературы

1. Consolidated text of the Guidelines for Formal Safety Assessment (FSA) for use in the IMO Rule-making process. (MSC/Circ. 1023 – MEPC/Circ. 392). –14.05.2007.

2. Емельянов М.Д. Безопасность морского транспорта России // Транспорт Российской Федерации. – 2008. – № 2 (15). – С. 38 – 43.

3. Евенко В.И., Егоров Г.В. Методологические основы обеспечения безопасной и рентабельной эксплуатации судов старше 15 лет на базе процедуры РС САР // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – 2002. – Вып. 25. – С. 17 – 32.

4. Емельянов М.Д. Оценка риска и критичные элементы морских судов. Проблемы развития морского флота: Сб. научных трудов ЗАО «ЦНИИМФ». СПб. – 2009. – С. 20 – 41.

А.Р. Тогуняц

ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ ИМО В ОТНОШЕНИИ БЕЗОПАСНОСТИ МАЛЫХ РЫБОЛОВНЫХ СУДОВ И ЕЕ ВЛИЯНИЕ НА НАЦИОНАЛЬНОЕ ЗАКОНОДАТЕЛЬСТВО¹

1 Введение

Рыболовство в морях и океанах является одним из наиболее опасных видов деятельности человека [1, 2]. По оценке Продовольственной и сельскохозяйственной организации ООН (FAO) в море работает 16 млн рыбаков, из которых ежегодно гибнет более 24000². При этом мировой рыболовный флот насчитывает 4 млн судов, из которых 2,7 млн – беспалубные³. В пересчете на 100 000 работающих гибнет 150 рыбаков. Этот статистический показатель в значительной степени зависит от страны и региона. В скандинавских странах, где меры по предотвращению несчастных случаев, обучение персонала, поиск и спасание находятся на высоком уровне, число погибших рыбаков на 100 000 колеблется от 90 до 150 чел. На побережье Западной Африки этот показатель существенно выше: 300 – 1000 погибших рыбаков на 100 000 [2]. Показатель гибели рыбаков существенно превышает средний показатель гибели людей на производстве, что наглядно демонстрирует степень опасности рыболовства. По результатам исследования, выполненного в 1999 г. Международной организацией труда (МОТ) это превышение составляет: 15 – в Республике Корея, 11 – в Эстонии, 21 – в Италии, 11 – в Литве, 9 – в Польше, 6 – в Испании [2].

В то же время FAO отмечает, что статистические данные по рыболовству «являются скудными, неполными и недостоверными» (SLF 48/16). К сожалению, автору не удалось найти полные данные

¹ Данная статья была представлена автором в качестве доклада на 18-м Международном симпозиуме «Теория и практика судостроения» (SORTA 2008, г. Пула, Хорватия, 15 – 18 октября 2008 г.).

² Документ ИМО SLF 48/16, представленный FAO.

³ FAO, The State of World Fisheries and Agriculture 2006.

о гибели рыбаков в Российской Федерации, что подтверждает вывод FAO.

2 Рекомендации ИМО по безопасности малых рыболовных судов

Международная морская организация (ИМО), работая совместно с FAO и MOT по вопросу безопасности рыболовных судов и их экипажей, уделяет этому направлению большое внимание. В настоящее время в ИМО (совместно с FAO и MOT) создается руководящий документ по безопасности для рыболовных судов длиной менее 12 м. Работа началась на 48-й сессии Комитета по остойчивости, грузовой марке и безопасности рыболовных судов (SLF 48, 12 – 16 сентября 2005 г.) по пункту повестки дня «Безопасность малых рыболовных судов» (в соответствии с решением 79-й сессии Комитета по безопасности на море, MSC 79). Документ получил название «Рекомендации по безопасности для палубных рыболовных судов длиной менее 12 м и беспалубных судов» (Рекомендации). Проект Рекомендаций после 50-й сессии SLF (30 апреля – 4 мая 2007 г.) был направлен в специализированные подкомитеты ИМО. Этот документ завершит формирование единого правового подхода к безопасности рыболовных судов по всему диапазону длин, включая беспалубные суда. Он дополнит Торремолиносский протокол 1993 г. (Протокол 93) [3], Кодекс безопасности рыбаков и рыболовных судов [4, 5] (Кодекс) и Добровольное руководство по проектированию, постройке и оборудованию малых рыболовных судов [6], (рис. 1). Кодекс и Добровольное руководство были одобрены 79-й сессией Комитета по безопасности на море (MSC, 1 – 10 декабря 2004 г.), а также FAO и MOT в 2005 г.

В обосновании FAO необходимости разработки документа по безопасности для рыболовных судов длиной менее 12 м говорится, что в большинстве случаев гибели рыбаков происходит именно на таких судах (SLF 48/16). В то же время FAO отметила, что международных стандартов безопасности для таких судов не существует, а национальные правила во многих странах отсутствуют или содержат требования, не подходящие по уровню или объему.

В работу по созданию нового документа, начиная с SLF 48, вовлечены представители 20 стран¹, а возглавил работу представитель Юж-

¹ В работе корреспондентской группы между 49-й и 50-й сессиями SLF участвовали представители Чили, Китая, Кубы, Дании, Германии, Исландии, Японии, Либерии, Нидерландов, Норвегии, Республики Корея, Российской Федерации, Сент-Киттс и Невис, Южной Африки, Сирийской Арабской Республики, Турции, Великобритании, США, Венесуэлы.

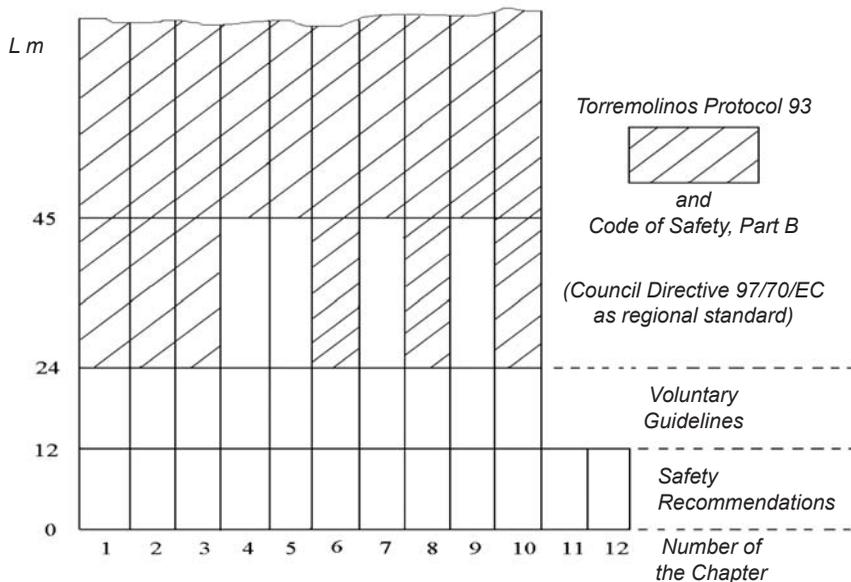


Рис. 1

Документы ИМО по безопасности рыболовных судов.

Области распространения по главам: Торремолиносский протокол 1993 г., длина судов от 24 м и более; Кодекс безопасности, часть Б, длина судов от 24 м и более; Директива Совета 97/70/ЕС, длина судов от 24 м и более;

Добровольное руководство, длина судов от 12 до 24 м;
 Рекомендации по безопасности, длина судов менее 12 м

ной Африки капитан Н. Кампбелл (N. Campbell). Он руководит работой как рабочих групп на сессиях SLF, так и корреспондентских групп в межсессионный период. Большую работу по созданию Рекомендаций выполняет представитель FAO А. Гудмундссон (A. Gudmundsson). Информацию о формате Рекомендаций и круге участников представляет документ SLF 50/5/1 ANNEX (табл. 1).

Таблица 1

Глава/Приложение	Наименование разделов	Страны/организации, представившие документы
1	2	3
Преамбула		Южная Африка
Глава 1	Общие положения	Дания
Глава 2	Конструкция, водонепроницаемость и оборудование	Япония
Глава 3	Остойчивость и связанные с ней мореходные качества	FAO, Испания, Россия, Республика Корея, Япония
Глава 4	Механические и электрические установки	Норвегия
Глава 5	Противопожарная защита, обнаружение и тушение пожаров	Япония
Глава 6	Защита экипажа	Дания
Глава 7	Спасательное оборудование	Республика Корея
Глава 8	Аварийно-спасательные процедуры и обучение требованиям безопасности	Венесуэла
Глава 9	Связь	Норвегия
Глава 10	Навигационное оборудование	Исландия
Глава 11	Жилые помещения	МКСП (JCFU), Южная Африка
Глава 12	Укомплектование личным составом и обучение	Республика Корея
Приложение I	Иллюстрации к терминам, используемым в определениях	FAO
Приложение II	Конструктивные стандарты деревянных судов	FAO
Приложение III	Конструктивные стандарты судов из стеклопластика	FAO
Приложение IV	Конструктивные стандарты стальных судов	FAO
Приложение V	Конструктивные стандарты судов из алюминия	FAO
Приложение VI	Якорное и швартовное оборудование	FAO

Продолжение табл. 1

1	2	3
Приложение VII	Конструктивная прочность люковых закрытий	FAO
Приложение VIII	Руководство по определению размеров штормовых портиков	FAO
Приложение IX	Приближенное определение устойчивости малых судов посредством опыта периода бортовой качки	FAO, Испания
Приложение X	Практические рекомендации по устройству съемных переборок рыбных трюмов	FAO, Испания
Приложение XI	Пример извещения об устойчивости	FAO, Испания
Приложение XII	Руководство по дополнительным критериям устойчивости для траулера с бим-тралом	FAO
Приложение XIII	Практическое испытание плавучести	Норвегия
Приложение XIV	Руководство по содержанию рабочих инструментов и запасных частей	FAO
Приложение XV	Рулевое устройство	FAO
Приложение XVI	Практические рекомендации по выхлопным системам	FAO
Приложение XVII	Руководство по установке электрооборудования	Норвегия
Приложение XVIII	Основные средства оказания первой помощи	FAO
Приложение XIX	Персональная защита одежды	Великобритания
Приложение XX	Требования к плавучим спасательным средствам	Республика Корея
Приложение XXI	Руководство по требованиям к спасательному оборудованию	Республика Корея
Приложение XXII	Рекомендации по испытаниям спасательных жилетов	Республика Корея
Приложение XXIII	Гидростатическое разобщающее устройство	Великобритания
Приложение XXIV	Тренировки по безопасности	Венесуэла

1	2	3
Приложение XXV	Безопасное управление лебедками, буксирными и грузоподъемными устройствами	МКСП (ICFTU), Международная конфедерация свободных профсоюзов
Приложение XXVI	Система ГМССБ	Норвегия
Приложение XXVII	Дальность действия УКВ для различных блоков передающих/приемных радиостанций	Норвегия
Приложение XXVIII	Применение мобильных телефонов при бедствии и безопасность связи	Норвегия
Приложение XXIV	Радиолокационный отражатель	Исландия
Приложение XXX	Оборудование, необходимое для соответствия Правилам предупреждения столкновений	Исландия
Приложение XXXI	Международный свод сигналов	Исландия
Приложение XXXII	Сигналы бедствия	Южная Африка
Приложение XXXIII	Обучение основам безопасности перед рейсом	Южная Африка, Республика Корея
Приложение XXXIV	Аннотированный перечень сопутствующих публикаций	Южная Африка, FAO

Формат Рекомендаций выбран на основе уже существующих документов ИМО [3, 5, 6] и наименования глав с I по X соответствуют упомянутым Конвенции, Кодексу (часть Б) и Добровольному руководству. Кроме того, появились две новые главы: «Судовые помещения» и «Комплектование личного состава и обучение». Такой подход существенно упростил работу над Рекомендациями, так как упорядочил рассмотрение многочисленных документов, поступивших на сайт¹ корреспондентской группы (CG), работавшей между SLF48 (12 – 16 сентября 2005 г.) и SLF 49 (24 – 28 июля 2006 г.). Для использования при составлении Рекомендаций было представлено 23 национальных стандарта, относящихся к безопасности малых рыболовных судов из 14 стран (Канады, Дании, Ирана, Исландии, Ирландии, Японии, Новой Зеландии, Китая, Польши, Республики Корея, Российской Федерации, Южной Африки, Великобритании, США).

¹ Образован Морской администрацией Исландии.

3 Правила для маломерных судов рыбопромыслового флота Российской Федерации

Российская Федерация представила в СГ Правила классификации, проектирования, постройки и оборудования маломерных судов промыслового флота¹ (разработчик – институт «Гипрорыбфлот») [7]. Правила вступили в силу в Российской Федерации в 1999 г. и распространяются на малые рыболовные суда, не подпадающие под требования Правил классификации и постройки морских судов Российского морского регистра судоходства. Это означает, что Правила распространяются на суда рыбопромыслового флота с мощностью главного двигателя менее 55 кВт и несамоходные суда валовой вместимостью менее 80 единиц Международной конвенции по обмеру судов 1969 г. В качестве нижней границы области распространения Правил принята длина судна 4,5 м. По российской терминологии такие суда называются маломерными. При разработке Правил были учтены и использованы положения Добровольного руководства ИМО изд. 1980 г. (область распространения: суда длиной 12 м и более, но менее 24 м). Более близкого документа ИМО в отношении области распространения к моменту начала работы над Правилами не было.

До появления Правил в России действовали технические требования, охватывающие только остойчивость [8]. Формат требований Правил был выбран таким образом, чтобы по широте охвата они соответствовали Добровольному руководству ИМО. Правила были разработаны как составная часть (основной технический документ) системы государственного надзора за маломерными судами рыбопромыслового флота, функционирование которой предполагалось с учетом резолюции ИМО А.739 «Руководство по выдаче полномочий организациям, действующим по поручению администраций». В Правилах учтены не только рекомендации ИМО к рыболовным судам как к инженерным объектам, но и общие рекомендации ИМО к организации государственного надзора за безопасностью мореплавания.

Таким образом, к моменту начала работы SLF в 2005 г. над Рекомендациями в Российской Федерации уже существовал национальный стандарт безопасности для маломерных судов рыбопромыслового флота. Впервые специалисты различных стран смогли познакомиться с Правилами после представления Российской Фе-

¹ Далее – Правила.

дерацией в ИМО на 46-ю сессии SLF (8 – 12 сентября 2003 г.) информационного документа SIF 46/INF2. В рамках работы CG были проанализированы все представленные национальные стандарты. В отношении Правил по разделу «Мореходные качества» CG отметила наличие таблицы минимальных величин надводного борта, а также рекомендации по выбору скорости судна на попутном волнении (в качестве общего замечания была отмечена усложненность некоторых положений).

В процессе деятельности CG SLF 48 – SLF 49 Российская Федерация, основываясь на опыте использования Правил, сделала предложение по включению в гл. 3 «Остойчивость и связанные с ней мореходные качества» нового пункта с требованиями к элементам плавучести беспалубных судов. Для безопасности рыбаков трудно переоценить способность беспалубного судна, залитого водой (в такой степени, что дальнейшее поступление воды вызывает ее переливание через нижнюю точку линии планширя или транца), оставаться на плаву. При этом рыбаки имеют возможность не покидать аварийное судно до прибытия спасателей. В северных широтах это защищает рыбаков от переохлаждения, а в южных – от нападения акул. Кроме того, спасательным службам легче обнаружить аварийное судно, чем одного или нескольких рыбаков в открытом море.

В ходе обсуждения предложения уже на рабочей группе (SLF 49) была принята приемлемая формулировка. Непосредственные требования к материалу для элементов плавучести были исключены. Однако материал для элементов плавучести, согласно формулировке, должен удовлетворять требованиям компетентного органа. Предоставление конкретных решений компетентным органам или администрациям является распространенным приемом при составлении международных документов. Это позволяет избежать ненужной детализации или снять неразрешимые противоречия, возникшие при формулировании требований. В Протоколе 93, например, в соответствующей главе по мореходности на усмотрение Администраций оставлены такие важные вопросы как сильный ветер и бортовая качка, вода на палубе, максимально допустимая эксплуатационная осадка.

В документах конвенционного уровня, таких как Протокол 93, оставление решения вопроса на уровне Администрации, как правило, сопровождается ссылкой на рекомендуемое приложение или резолюцию ИМО. В случае Рекомендаций ИМО старается предоставить максимальную информацию непосредственно в документе, чем объясняется большое количество приложений.

4 Глава «Остойчивость и связанные с ней мореходные качества» Рекомендаций.

Рассмотрим критерии главы «Остойчивость и связанные с ней мореходные качества» Рекомендаций в сравнении с Правилами, Протоколом 93 и Северным лодочным стандартом [9] (см. табл. 2). Задача составления Рекомендаций была осложнена большим разнообразием судов по районам плавания.

Таблица 2
Сравнение критериев остойчивости для палубных судов

Критерий	Рекомендации, есть альтернативные критерии	Правила (морские суда) [7], нет альтернативных критериев	Протокол 93 [3], нет альтернативных критериев	Северный лодочный стандарт [9], нет альтернативных критериев
Начальная метацентрическая высота GM, м	$GM \geq 0,35$	$GM \geq 0,5$ $GM \geq 0,35$ (без улова в трюме)	$GM \geq 0,35$	$GM \geq 0,35$
Плечо диаграммы GZ, м	$GZ \geq 0,2$ при $\theta \geq 30^\circ$, но может быть уменьшена	$GZ \geq 0,22$ при $\theta \geq 30^\circ$	$GZ \geq 0,2$ при $\theta \geq 30^\circ$	$GZ \geq 0,2$ при $\theta \geq 30^\circ$, $GZ \geq 0,1$ при $40^\circ \leq \theta \leq 65^\circ$
Положение GZ_{\max}	GZ_{\max} при $\theta \geq 25^\circ$	GZ_{\max} при $\theta \geq 25^\circ$	GZ_{\max} при $\theta \geq 25^\circ$	GZ_{\max} при $\theta \geq 25^\circ$
Минимальная площадь S, м ² , диаграммы $GZ = f(\theta)$	$S \geq 0,055$ при $0 \leq \theta \leq 30^\circ$, $S \geq 0,090$ при $0 \leq \theta \leq 40^\circ(\theta_r^1)$ $S \geq 0,03$ при $30^\circ \leq \theta \leq 40^\circ(\theta_r)$	нет	$S \geq 0,055$ при $0 \leq \theta \leq 30^\circ$, $S \geq 0,090$ при $0 \leq \theta \leq 40^\circ(\theta_r)$ $S \geq 0,03$ при $30^\circ \leq \theta \leq 40^\circ(\theta_r)$	$S \geq 0,03$ при $30^\circ \leq \theta \leq 40^\circ$ (для лодок с подъемными механизмами)
Угол заката диаграммы	нет	60°	нет	70°

В Рекомендациях выделено пять проектных категорий судов:

1. проектная категория **A**: неограниченное плавание (за исключением ураганов и других аномалий);

¹ θ_r – угол крена, при котором отверстия в корпусе, надстройке или рубках, которые не могут быть быстро и непроницаемо закрыты для ветра и влаги, начинают погружаться в воду.

2. проектная категория **B**: эксплуатация в море с характерной высотой волн до 4 м и силой ветра 8 баллов по шкале Бофорта или менее;
3. проектная категория **C1**: эксплуатация в море с характерной высотой волн до 2 м и силой ветра 6 баллов по шкале Бофорта или менее;
4. проектная категория **C2**: эксплуатация в море с характерной высотой волн до 1 м и силой ветра 5 баллов по шкале Бофорта или менее;
5. проектная категория **D**: эксплуатация в море с характерной высотой волн до 0,3 м включительно и случайными волнами не более 0,5 м и силой ветра 4 балла по шкале Бофорта или менее.

Указанные в табл. 2 критерии остойчивости Рекомендаций применимы, прежде всего, для категорий **A** и **B**. Эти же критерии могут применяться и для других категорий судов. Для случая, когда из-за недостаточности данных по остойчивости применить эти критерии невозможно, в Рекомендациях приведены пять способов приближенного контроля остойчивости судна. Что касается критериев остойчивости (табл. 2), то в Рекомендациях они соответствуют критериям, принятым в Протоколе 93 для судов длиной 24 м и более. Критерии Правил и Северного лодочного стандарта практически равнозначны уровню Протокола 93, так как, несмотря на отсутствие (или сокращенный объем) требований к площади диаграммы статической остойчивости $GZ = f(\theta)$, эти документы имеют критерии по ее протяженности (углы заката, соответственно, 60° и 70°) при прочих равных требованиях (рис. 2). Следует отметить, что ни Северный

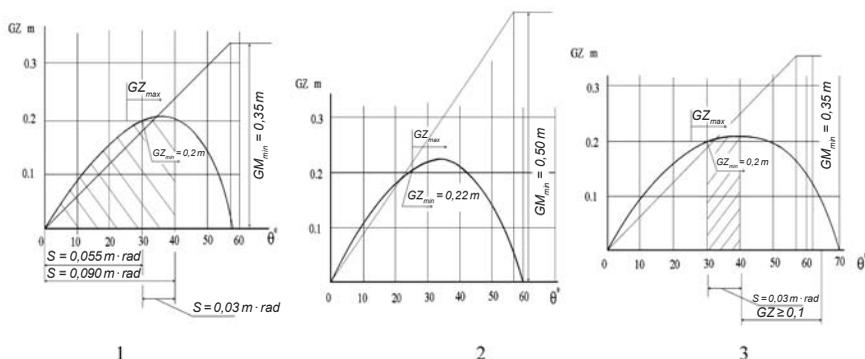


Рис. 2

Требования к диаграмме статической остойчивости:

- 1 – Рекомендации и Протокол 93; 2 – Правила; 3 – Северный лодочный стандарт

лодочный стандарт, ни Правила не содержат альтернативных критериев устойчивости, что свидетельствует о нормативной жесткости этих документов.

Не осталось без внимания СГ и положение о нанесении знака максимально допустимой осадки. В первоначальной версии главы этот пункт присутствовал и был аналогичен положениям, содержащимся в Кодексе и Добровольном руководстве (в эти документы положение было включено в соответствии с предложением Российской Федерации, SLF 42/7, SLF 42/7/1). Наличие знака максимально допустимой эксплуатационной осадки облегчает надзорным органам осуществление контроля нагрузки судна, а капитану – сохранение судна безопасным. К сожалению, в последней редакции Рекомендаций это положение отсутствует, что объясняется намерением оставить вопрос о нанесении этого знака полностью на усмотрение компетентного органа.

5 Планы совершенствования национального законодательства

Разработчики Рекомендаций полагают, что основными пользователями этого документа будут компетентные органы стран, которые видят необходимость в развитии их законодательств в области безопасности мореплавания. Российская Федерация относится к таким странам. В настоящее время институт «Гипрорыбфлот» по заданию Государственного комитета по рыболовству работает над обновлением Правил с учетом Рекомендаций ИМО. В новую редакцию войдут новые главы «Защита экипажа и судовые помещения», «Порядок действий при авариях, обучение и комплектование экипажа». Несомненно, что в определенной степени Рекомендации будут интересны и специалистам Российского морского регистра судоходства (РС), так как, несмотря на малые размеры, рыболовные суда могут иметь мощные силовые установки (несколько сотен киловатт) и, следовательно, попадать в область распространения требований Правил РС.

6 Заключение

Завершить работу над Рекомендациями ИМО планирует в 2010 г. В 2008 – 2009 гг. Рекомендации будут рассматриваться в специализированных подкомитетах ИМО: DE, STW, COMSAR, NAV, FP¹.

На SLF 50 (30 апреля – 4 мая 2007 г.) рабочая группа по безопасности малых рыболовных судов подготовила обоснование для расширения рабочей программы SLF, имея в виду разработку практического руководства по применению Рекомендаций (срок завершения работы 2010 г.). Разработанные международные документы по безопасности рыболовных судов должны быть внедрены в практику рыболовства и надзорной деятельности государств. Неудачный опыт реализации положений Протокола 93², подтверждает необходимость создания документа (практического Руководства) для помощи компетентным органам в совершенствовании национальных законодательств на основе Рекомендаций. Предполагается, что такое Руководство поможет установлению согласованных действий инспекций по безопасности, морских администраций, государственных органов, отвечающих за рыболовство, а также иных государственных ведомств.

Список литературы

1. Menakhem Ben-Yami. Risk and Dangers in Small-Scale Fisheries: an Overview. – ILO, Geneva, 2000.
2. Petursdottir G., Hannibalsson O., Turner J.M.M. Safety at Sea as an Integral Part of Fisheries Management. FAO of the UN, Rome, 2001.
3. 1993 Torremolinos Protocol and Torremolinos International Convention for the Safety of Fishing Vessels. Consolidated edition IMO. – London, 1995.
4. Code of Safety for Fishermen and Fishing Vessels, 2005. Part A. Safety and Health Practice. FAO, ILO, IMO, London, 2006.

¹ DE – Подкомитет по проектированию и оборудованию судов; STW – Подкомитет по подготовке моряков и несению вахты; COMSAR – Подкомитет по радиосвязи, поиску и спасанию; NAV – Подкомитет по безопасности мореплавания; FP – Подкомитет по противопожарной защите.

² Протокол 93, несмотря на усилия, предпринимаемые ИМО, до сих пор не вступил в силу. На SLF 51 (14 – 18 июля 2008 г.) ИМО приступила к разработке Соглашения по выполнению Протокола 93 с целью ускорения его ратификации и вступления в силу. Проект Соглашения должен быть представлен на SLF 52 (январь 2010 г.).

П р и м е ч а н и е . Рыбопромышленный флот России в целом соответствует требованиям Протокола 93 [10], а неприсоединение к нему объясняется задержкой в выполнении юридических процедур.

5. Code of Safety for Fishermen and Fishing Vessels, 2005. Part B. Safety and Health Requirements for the Construction and Equipment of Fishing Vessel, FAO, ILO, IMO, London, 2006.
6. Voluntary Guidelines for Design, Construction and Equipment of Small Fishing Vessels. FAO, ILO, IMO, London, 2006.
7. Правила классификации, проектирования, постройки и оборудования маломерных судов промыслового флота. – СПб.: Гипрорыбфлот, 1998.
8. Лукьянов В.М., Тогуняц А.Р. Правила классификации, проектирования, постройки и оборудования маломерных судов промыслового флота // Безопасность мореплавания и ведения промысла. – Вып. 110. – СПб.: Гидрометеоиздат, 1999.
9. Nordic Boat Standard. Commercial Boat less than 15 metres. 1990.
10. Тогуняц А.Р. О присоединении Российской Федерации к Торремолиносскому протоколу 1993 г. // Безопасность мореплавания и ведения промысла. – Вып. 119. – СПб.: Судостроение, 2005.

УДК 629.5.045

О.Е. Литонов, А.Г. Папин

УТОЧНЕНИЯ К РАСЧЕТУ ИНЕРЦИОННЫХ УСИЛИЙ, ДЕЙСТВУЮЩИХ НА ГРУЗ ИЛИ ЭЛЕМЕНТЫ КОНСТРУКЦИИ КОРПУСА СУДНА В УСЛОВИЯХ КАЧКИ

1 Введение

Анализ правил и руководств Российского морского регистра судоходства (далее – Регистр), а также опыт выполнения авторами расчетов и участие в проведении морских операций в обеспечение транспортировок нестандартизированных крупногабаритных и тяжеловесных грузов убедительно показали, что требуется некоторая корректировка существующих правил и руководств Регистра, касающихся подобных перевозок, внесение соответствующих дополнений в них, более детальная проработка некоторых разделов. В частности в статье рассматривается такой специфический вопрос по разделу внешних нагрузок, действующих на груз, как замена распределенной инерционной нагрузки на сосредоточенную. Этот вопрос актуализируется именно в связи с перевозкой крупногабаритных грузов. Надо отметить, что ни в Правилах Регистра [4], ни в Руководстве по разработке наставлений по креплению грузов [5], ни в методиках ЦНИИ МФ [6], этому вопросу не уделяется должного внимания.

2 Определение инерционных усилий, действующих на груз или элементы конструкции корпуса судна в условиях качки

2.1 Постановка вопроса.

Судно, идущее на волнении, совершает следующие колебательные движения: орбитальное движение центра тяжести в плоскости

бега волны и вращательное движение около центра тяжести, которое можно разделить на три независимых вращения около главных осей инерции судна. Вращение около продольной оси – бортовая качка, около поперечной оси – килевая качка и вращение около вертикальной оси – рысканье. Все эти движения судна создают поля ускорений, сопровождающихся соответствующими силами инерции.

Если на судне находится твердое тело, участвующее в движении судна, и мы желаем найти натяжения связей, которыми оно с судном скреплено, то надо к силе тяжести добавить силы инерции переносного движения.

Любую совокупность внешних сил, действующих на тело можно представить одним главным вектором этих сил и одним главным моментом относительно одной точки, например, центра тяжести рассматриваемого тела. Другими словами, инерционные силы, приложенные в каждом элементе массы тела, можно свести к равнодействующей силе – главному вектору сил, а неравномерность их распределения по телу дает главный момент этих сил.

Существующие правила и руководства Регистра и ЦНИИ МФ, касающиеся этого вопроса, предлагают расчетные формулы для определения значений проекций только главного вектора инерционных сил. Но ни один документ не упоминает о существовании и о необходимости оценки главного момента инерционных усилий и способах его определения.

Как показывает опыт, во многих случаях, действительно, главным инерционным моментом можно пренебречь, это касается, в основном перевозки стандартных генеральных грузов. Но при некоторых соотношениях собственных параметров судна, размещения груза и его габаритов, величина главного момента может выходить за пределы величин, которыми можно пренебрегать. А именно, когда речь идет о перевозке нестандартизированных крупногабаритных и тяжеловесных грузов. По опыту расчетов учет влияния главного момента в некоторых случаях может до 40 % увеличивать расчетный суммарный опрокидывающий момент, действующий на груз, и соответственно на проектируемые средства крепления.

Вопрос разработки уточненной методики расчета инерционных усилий становится сейчас актуальным, т. к. подобных нестандартных перевозок, которые должны классифицироваться уже как морские операции, становится в последнее время все больше и больше. В основном это транспортировки морем составляющих частей или конструкций в целом объектов для освоения шельфа (например, платформ и элементов

платформ), когда формирование конструкции осуществляется крупными блоками, изготавливаемыми в разных регионах, когда конструкцию необходимо доставить на место ее установки в море и т. п. Как правило, характерные параметры подобных транспортировок выходят за установленные предельные параметры существующих методик расчета.

2.2 Определение равнодействующей силы и момента инерционных усилий, действующих на груз в условиях качки.

Проекции ускорений для любой точки (x, y, z) судна на продольную ось X , поперечную ось Y , и вертикальную ось Z , связанные с судном:

$$\begin{aligned} a_x &= -\sin \psi \cdot \ddot{\zeta} + \cos \theta \cdot \ddot{\psi} \cdot z; \\ a_y &= \cos \psi \cdot \sin \theta \cdot \ddot{\zeta} - \ddot{\theta} \cdot z; \\ a_z &= \cos \psi \cdot \cos \theta \cdot \ddot{\zeta} + \ddot{\theta} \cdot y - \cos \theta \cdot \ddot{\psi} \cdot x, \end{aligned} \quad (1)$$

где θ – угол бортовой качки;
 $\ddot{\theta}$ – ускорение бортовой качки, $\ddot{\theta} = (2\pi / T_\theta)^2 \theta$;
 ψ – угол килевой качки;
 $\ddot{\psi}$ – ускорение килевой качки, $\ddot{\psi} = (2\pi / T_\kappa)^2 \psi$;
 T_θ, T_κ – периоды бортовой и килевой качки;
 $\ddot{\zeta}$ – ускорение от вертикальной качки.

Если в точке (x, y, z) находится масса m_i , которая по отношению к судну неподвижна (следовательно с судном связана), то, значит, действие этих связей равносильно сообщению массе ускорения, проекции которого: $-a_x, -a_y, -a_z$, т. е. массу можно рассматривать как свободную, приложив к ней силы: $-m_i a_x, -m_i a_y, -m_i a_z$ (так называемые силы инерции переносного движения).

Расчет упростится, если все силы инерции переносного движения, действующие на груз, свести к главному вектору сил и главному моменту этих сил в центре тяжести груза (x_p, y_p, z_p) . Тогда получим следующие выражения для их проекций на оси X, Y, Z , связанные с судном.

Проекция главного вектора инерционных сил:

$$F_{x, y, z} = -\sum_{i=1}^n m_i \cdot a_{x, y, z(i)}. \quad (2)$$

Проекция главного момента инерционных сил:

$$\begin{aligned} M_x &= -\sum_{i=1}^n m_i \cdot (a_{z(i)} \cdot y_i - a_{y(i)} \cdot z_i); \\ M_y &= -\sum_{i=1}^n m_i \cdot (a_{x(i)} \cdot z_i - a_{z(i)} \cdot x_i); \\ M_z &= -\sum_{i=1}^n m_i \cdot (a_{y(i)} \cdot x_i - a_{x(i)} \cdot y_i), \end{aligned} \quad (3)$$

где $M = \sum_{i=1}^n m_i$ – масса груза;

$$M = P / g;$$

P – вес груза;

g – ускорение силы тяжести;

x_p, y_p, z_p – координаты, отсчитываемые от центра тяжести груза.

После соответствующих преобразований получим следующие выражения для проекций главного вектора инерционных сил:

$$\begin{aligned} F_x &= M \cdot (\sin \psi \cdot \ddot{\zeta} + \ddot{\psi} \cdot z_p); \\ F_y &= M \cdot (\sin \theta \cdot \ddot{\zeta} + \ddot{\theta} \cdot z_p); \\ F_z &= M \cdot (\ddot{\zeta} + \ddot{\theta} \cdot y_p + \ddot{\psi} \cdot x_p) \end{aligned} \quad (4)$$

и проекций главного момента инерционных сил:

$$\begin{aligned} M_x &= I_x \cdot \ddot{\theta} + I_{xy} \cdot \ddot{\psi}; \\ M_y &= I_y \cdot \ddot{\psi} + I_{xy} \cdot \ddot{\theta}; \\ M_z &= I_{xz} \cdot \ddot{\theta} + I_{yz} \cdot \ddot{\psi}, \end{aligned} \quad (5)$$

где x_p, y_p, z_p – координаты центра тяжести груза, отсчитываемые от центра вращения, который принимается в центре тяжести судна;

I_x, I_y – моменты инерции груза;

I_{xy}, I_{yz}, I_{xz} – центробежные моменты инерции груза:

для груза с неравномерным по объему распределением составляющих масс m_i :

$$\begin{aligned} I_x &= \sum_{i=1}^n m_i \cdot (y_i^2 + z_i^2); \\ I_y &= \sum_{i=1}^n m_i \cdot (x_i^2 + z_i^2); \\ I_{xy} &= \sum_{i=1}^n m_i \cdot x_i \cdot y_i; \\ I_{yz} &= \sum_{i=1}^n m_i \cdot y_i \cdot z_i; \\ I_{xz} &= \sum_{i=1}^n m_i \cdot x_i \cdot z_i \end{aligned} \quad (6)$$

или при равномерном распределении массы в теле с объемом V :

$$\begin{aligned} I_x &= M / V \cdot \int (y^2 + z^2) dV; \\ I_y &= M / V \cdot \int (x^2 + z^2) dV; \\ I_{xy} &= M / V \cdot \int x \cdot y dV; \\ I_{yz} &= M / V \cdot \int y \cdot z dV; \\ I_{xz} &= M / V \cdot \int x \cdot z dV, \end{aligned} \quad (7)$$

где x, y, z – координаты груза относительно собственной системы координат с началом отсчета в центре тяжести груза. При этом оси координат груза располагаются параллельно соответствующим осям системы координат X, Y, Z , связанной с судном.

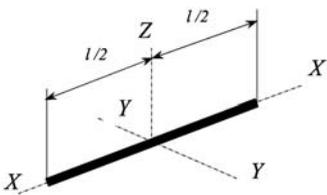
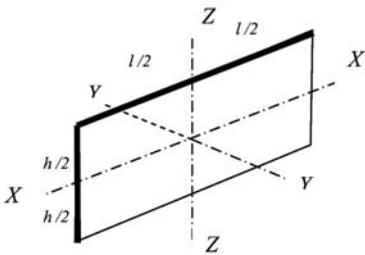
Если груз поставлен параллельно или перпендикулярно ДП судна и имеет симметричную или приблизительно симметричную форму относительно собственных осей (что, как правило, и имеет место), то эти оси будут близки к главным осям инерции груза, и можно считать, что

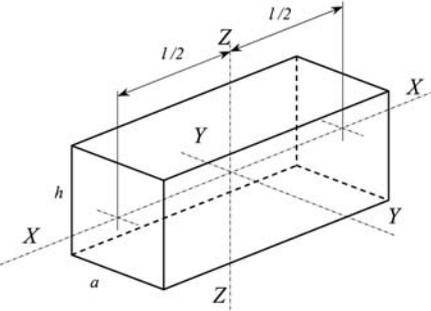
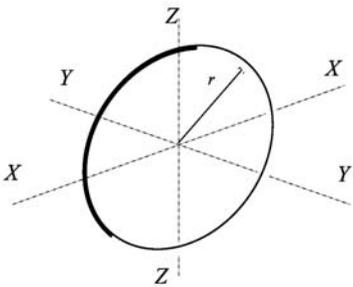
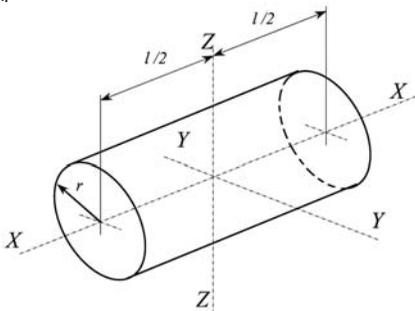
$$I_{xy} = I_{yz} = I_{xz} = 0. \quad (8)$$

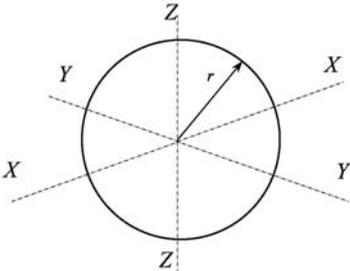
Моменты инерции груза массой $M = P/g$, где P – вес груза, т, можно определять, используя частные случаи (см. табл. 1), к которым можно без существенной потери точности свести практически любой груз.

Таблица 1

Собственные моменты инерции груза относительно собственного центра тяжести

Форма тела	Моменты инерции тела
1	2
<p>стержень</p> 	$I_x \approx 0$ $I_y = I_z = 1/12 M \cdot l^2$
<p>токая пластина</p> 	$I_x = 1/12 M \cdot h^2$ $I_y = 1/12 M (h^2 + l^2)$ $I_z = 1/12 M \cdot l^2$

1	2
<p>параллелепипед</p> 	$I_x = 1/12 M (a^2 + h^2)$ $I_y = 1/12 M (h^2 + l^2)$ $I_z = 1/12 M (a^2 + l^2)$
<p>ДИСК</p> 	$I_x = I_z = 1/4 M \cdot r^2$ $I_y = 1/2 M \cdot r^2$
<p>цилиндр</p> 	<p>сплошной цилиндр</p> $I_x = 1/2 M \cdot r^2$ $I_y = I_z = 1/12 M (3 \cdot r^2 + l^2)$ <p>цилиндрическая оболочка ($r \gg$ толщины)</p> $I_x = M \cdot r^2$ $I_y = I_z = 1/12 M (6 \cdot r^2 + l^2)$

1	2
<p>сфера</p> 	<p>сплошная сфера</p> $I_x = I_y = I_z = 2/5 M \cdot r^2$ <p>сферическая оболочка ($r \gg$ толщины)</p> $I_x = I_y = I_z = 2/3 M \cdot r^2$

2.3 Определение опрокидывающего момента, действующего на груз.

Суммарный опрокидывающий момент от действия инерционных сил на груз будет складываться из двух составляющих – момента от главного вектора инерционных сил на плече опрокидывания и главного момента инерционных сил (см. рис. 1):

$$M_{x\text{опр}} = F_x \cdot z_g + M_x; \tag{9}$$

$$M_{y\text{опр}} = F_y \cdot z_g + M_y;$$

где F_x и F_y – проекции главного вектора инерционных сил, которые определяются по известным методикам, приведенным, например, в [4], [5], [6];

M_x и M_y – проекции главного момента инерционных сил, которые определяются в соответствии с п. 2.2;

z_g – плечо рычага опрокидывания, вертикальное расстояние между центром тяжести груза и опорной плоскостью (осью опрокидывания).

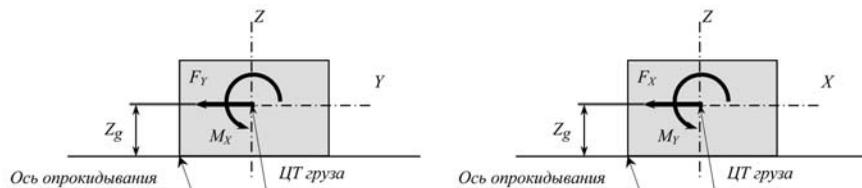


Рис.1
Схема расчета опрокидывающего момента

2.4 Оценка влияния главного момента инерционных сил на величину опрокидывающего момента.

Можно показать на следующем примере значимость учета или неучета главного момента инерционных сил перевозимого груза в общем балансе инерционных сил. Рассмотрим схему расчета опрокидывающего момента для груза, имеющего определяющие размерения и равномерную в смысле масс протяженность в Z-ом направлении, т. е. рассмотрим вертикальную однородную колонну (см. рис. 2), для которой:

$$I_x = 1/12 M \cdot l^2; \quad (10)$$

$$z_g = l/2, \quad (11)$$

где l – высота колонны;

z_g – расстояние от плоскости опоры груза до его центра тяжести.

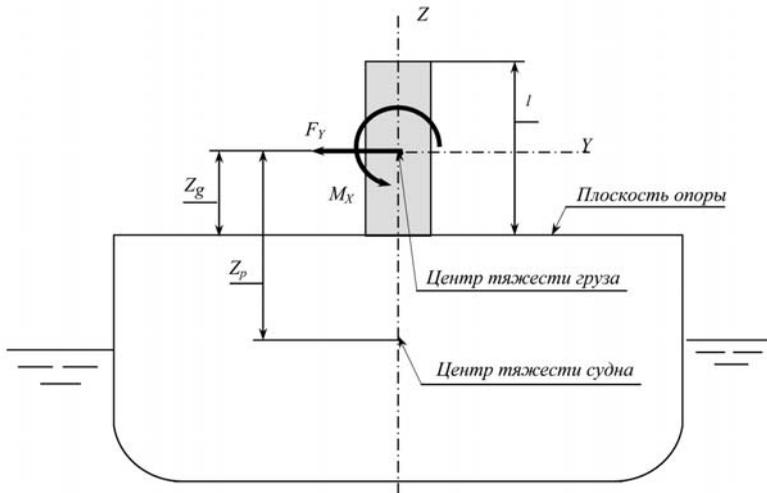


Рис. 2

Схема расчета опрокидывающего момента для вертикальной колонны

Для конкретизации будем полагать, что речь идет только о бортовой качке, т. е. ζ и ψ принимаем равными нулю. Тогда,

$$F_y = M \cdot \ddot{\theta} \cdot z_p, \quad (12)$$

где z_p – расстояние от центра вращения до центра тяжести груза;

$$M_x = I_x \cdot \ddot{\theta} = 1/12 M \cdot l^2 \cdot \ddot{\theta}. \quad (13)$$

Опрокидывающий момент относительно опор, расположенных на палубе, запишется следующим образом:

$$M_{x_{опр}} = F_y \cdot z_g + M_x \quad (14)$$

или

$$M_{x_{опр}} = M \cdot \ddot{\theta} \cdot z_p \cdot z_g + 1/12 M \cdot l^2 \cdot \ddot{\theta}. \quad (15)$$

Представляет несомненный интерес оценить влияние второй составляющей в формуле (15), отвечающей главному моменту инерционных сил M_x груза относительно собственного центра тяжести, которое определим естественным отношением:

$$\beta = \frac{M \cdot \ddot{\theta} \cdot l^2 / 12}{M \cdot \ddot{\theta} \cdot z_p \cdot z_g + M \cdot \ddot{\theta} \cdot l^2 / 12} \quad (16)$$

или

$$\beta = \frac{1}{1 + 12 \cdot (z_p \cdot z_g / l^2)} = \frac{1}{1 + 3 \cdot (z_p / z_g)}. \quad (17)$$

Из формулы (17) видно, что инженерная возможность пренебречь величиной главного момента инерционных сил (точность $\leq 5\%$) наступает при отношении $z_p / z_g \geq 6,4$ (для квадратного в поперечном сечении груза при отношении $z_p / z_g \geq 12,6$). В остальных случаях требуется учет главного момента инерционных сил в общем балансе инерционных сил.

Анализируя полученный результат также и для других форм тела, видно, что при расчете опрокидывающего момента от инерционных усилий для крупногабаритных грузов неучет главного момента практически всегда приводит к ошибке в опасную сторону с погрешностью выше инженерной.

3 Предложение по усовершенствованию концепции разделов Правил, связанных с транспортировкой нестандартных грузов

Что касается изменения структуры Правил Регистра в части транспортировок, оно, как нам представляется, должно заключаться в сосредоточении всех базовых положений в одной части, а именно в части XVI «Морские операции» Правил классификации, постройки и оборудования плавучих буровых установок и морских стационарных платформ, которой надлежит существенно трансформироваться. В принципе, в указанную часть необходимо переместить все специфические и специальные вопросы, связанные с обеспечением транспортировки. Эти вопросы должны касаться транспортировок всех видов классифицируемых объектов и их элементов, а также транспортных средств, с помощью которых производится транспортировка, включая специальные устройства для перевозки крупногабаритных грузов.

Примерное содержание данной части в модифицированном исполнении применительно к прочности и надежности могло бы выглядеть следующим образом.

1 Основные принципы, критерии и требования к разработке и проведению морских операций.

1.1 Область распространения.

1.2 Определения и пояснения.

1.3 Основные принципы планирования морских операций.

1.4 Категории морских операций в зависимости от их продолжительности и погодных условий.

1.5 Вопросы прочности и надежности конструкций и креплений при транспортировке.

1.5.1 Задание внешних условий. Прогноз погоды.

1.5.2 Внешние нагрузки при транспортировке.

1.5.2.1 Ветровые нагрузки.

1.5.2.2 Инерционные нагрузки при качке.

1.5.2.3 Статические нагрузки.

1.5.3 Предельные состояния. Критерии прочности.

1.5.4 Нормативные показатели.

1.5.5 Требования к конструкциям, обеспечивающим безопасность морской операции.

1.6 Стратегия перегона. Проект перегона.

4 Заключение

Из изложенного выше можно сделать вывод о необходимости внесения изменений в разделы правил, касающиеся определения инерционных усилий, действующих на груз или элементы конструкции корпуса судна в условиях качки. А именно, необходимо учитывать в общем балансе сил не только главный вектор инерционных усилий, но и главный момент, возникающий в результате приведения всех инерционных сил к равнодействующей в одной точке. В п. 2.2 и 2.3 настоящей статьи приведена упрощенная методика расчета главного момента, которая позволяет с достаточной точностью определить его влияние на общий баланс сил.

На примере показано, что при замене распределенной инерционной нагрузки на сосредоточенную неучет главного момента в расчете опрокидывающего момента от инерционных усилий для крупногабаритных грузов практически всегда приводит к ошибке в опасную сторону с погрешностью выше инженерной.

Также представляется необходимым усовершенствовать концепцию раздела Правил Регистра, посвященного обеспечению прочности и надежности перевозимых на дальние расстояния ПБУ/МСП и их элементов, а также любых других нестандартизированных крупногабаритных и тяжеловесных грузов.

Список литературы

1. Крылов А. Н. Собрание трудов. – Том IX. Часть 2. – М.: Изд. АН СССР, 1949.
2. Литонов О. Е. Технический отчет «Усовершенствование концепции раздела Правил Регистра, посвященного обеспечению прочности и надежности перевозимых на дальние расстояния ПБУ/МСП и их элементов», 2007.
3. Папин А. Г. №89.261-054.91 Методика расчета сил, действующих на груз, находящийся на судне, в условиях качки. – Северодвинск: ФГУП «ПО «Севмаш», 1989.
4. Правила классификации, постройки и оборудования плавучих буровых установок и морских стационарных платформ. – СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2006.
5. Руководство по разработке «Наставлений по креплению грузов» – СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2004.
6. Общие и специальные правила перевозки грузов, 4М. Том 2. Правила безопасности морской перевозки генеральных грузов. РД 31.11.21.24-96 Правила безопасности морской перевозки крупногабаритных и тяжеловесных грузов (КТГ). Приложение 1. Методика расчета сил, действующих на КТГ на борту судна и элементов крепления грузов. – СПб.: ЦНИИМФ, 1996.

Ю.М. Войнаровский

ПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ ДИАГРАММЫ ДЛЯ ОЦЕНКИ УСЛОВИЙ НЕСМЕЩАЕМОСТИ И РАСЧЕТА КРЕПЛЕНИЯ ГРУЗОВ ПРИ БОРТОВОЙ КАЧКЕ СУДНА

Введение

В настоящее время вопросы обеспечения несмещаемости грузов и способов их крепления при морских перевозках требуют в каждом случае отдельного подхода, учитывая теоретическую сложность проблемы, постоянное расширение номенклатуры грузов и разновидностей их упаковки, а также внедрение новых способов укладки и крепления, в меньшей степени связанных с безопасностью из-за коммерческих соображений.

Планирование размещения грузов на судне часто требует быстрой оперативной оценки условий их несмещаемости и расчетов крепления, если это необходимо. В качестве основных характеристик, дающих представление о статической устойчивости груза при наклонении поддерживающей его опорной плоскости, обычно принимаются угол трения φ или угол опрокидывания, в зависимости от того, что меньше.

Практикой и расчетами установлено, что из всех составляющих перемещения судна на волнении бортовая качка наиболее опасна в отношении смещения груза, вследствие больших угловых амплитуд и инерционных перегрузок, особенно в случае положения судна лагом к резонансному волнению, что возможно при выполнении маневрирования, а также в результате потери хода или управляемости.

Динамическое наклонение судна с одновременным вертикальным перемещением на волновом профиле изменяет величину и направление силы тяжести груза по отношению к его опорной плоскости, вследствие действия сил инерции и давления ветра (на палубный груз). В результате груз оказывается значительно менее устойчивым, чем при статическом наклонении судна на тот же угол.

Определенное сочетание величины φ и динамических характеристик бортовой качки может создать ситуацию, когда незакрепленный груз будет находиться в предельно устойчивом по началу смещения

состоянии только за счет силы трения, компенсирующей силу сдвига без опоры груза на ограждающие конструкции или наружные крепления. Такой подход в обеспечении несмещаемости используется, например, при перевозке бревен, свободно уложенных в штабели на люковых крышках поперек судна, что практикуется в настоящее время для смешанных (река – море) районов плавания.

Расчетные допущения

Как известно, наибольшие наклоны при резонансной бортовой качке на регулярном волнении судно получает на вершине или подошве волны, т. е. в момент его максимального вертикального перемещения на волновом профиле с амплитудой r_w , приближенно равной полувысоте волны h_w .

При выполнении схематизированных расчетов [1], [2] допускается, что в условиях резонанса амплитуда бортовой качки θ и профиль регулярного волнения изменяются по синусоидальному закону с одинаковой круговой частотой

$$\sigma = 2\pi / T,$$

где T – период собственных колебаний судна, с.

Простой анализ соотношений, полученных в [2], показывает, что наибольшая вероятность смещения груза, расположенного выше ЦТ судна, имеет место на вершине волны (рис. 1 – фазовый угол $\psi = \sigma t = \pi$) в момент получения судном динамического наклона $+\theta_d$. При этом наименее устойчив палубный груз, расположенный на поднятом борту (+y, +z в левой системе координат) – рис. 1.

Условие несмещаемости груза

Используя и преобразуя выражения для проекций сил, полученные в [2], можно определить поперечную F_y и нормальную F_z составляющие (относительно ДП и ОП) суммарной силы F , действующей на незакрепленный груз, находящийся на опорной плоскости трения (линия s-s на рис. 1):

$$F_y = -mg(p - sz) + F_v, \quad (1)$$

$$F_z = -mg(q + sy), \quad (2)$$

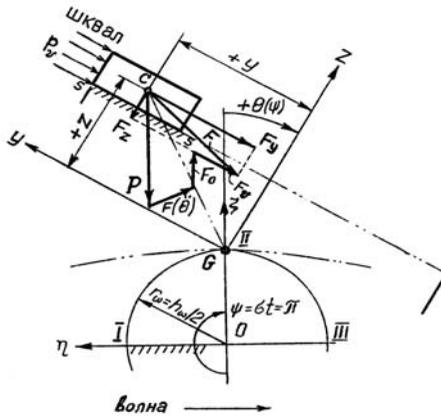


Рис. 1

Расчетное положение судна с палубным грузом на вершине волны в левой системе координат:

η - ζ – неподвижная система координат;

y - z – подвижная система координат, связанная с судном в ЦТ (G) – ось z в ДП

где $mg = P$ – вес грузовой единицы;

F_v – сила ветрового давления от шквала на палубный груз;

$p = \sin \theta (1 - \bar{a})$;

$q = \cos \theta (1 - \bar{a})$;

$s = -(\sigma^2 \theta_{\text{рад}} / g) = -(2\pi)^2 / 57,3^\circ g \cdot (\theta_{\text{град}} / T^2) \cong -0,07 \cdot \theta_{\text{град}} / T^2$, [1/м],

$\bar{a} = \sigma^2 r_w / g = (2\pi / T)^2 \cdot r_w / g = (2\pi^2 / g) \cdot h_w / T^2 \cong 2 h_w / T^2$ – инерционные коэффициенты, в которых множители 0,07 и 2 имеют размерность ($c^2/м$);

$g = 9,81$ – ускорение силы тяжести, $м/с^2$;

θ – расчетная амплитуда бортовой качки, град.;

y, z – координаты ЦТ(C) грузовой единицы относительно ЦТ(G) судна, м.

Для упрощения можно принять в (1) $F_v = 0$, увеличивая в дальнейшем расчетную величину θ на $1-2^\circ$ пропорционально нормативному давлению ветра для установленного района плавания.

Несмещаемость груза с заданным φ обеспечивается при условии $F_y \leq F_z \operatorname{tg} \varphi$, которое после подстановки (1) и (2) приводится к соотношению:

$$\operatorname{tg} \varphi \geq F_y / F_z = \frac{\sin \theta_s (1 - \bar{a}) + 0,07 \theta_s / T^2 \cdot z}{\cos \theta_s (1 - \bar{a}) - 0,07 \theta_s / T^2 \cdot y}, \quad (3)$$

где φ – угол трения (или угол статической устойчивости) груза, определяемый опытным путем;

θ_s – амплитуда бортовой качки судна, град., соответствующая предельно устойчивому динамическому состоянию груза, удерживаемого только силой трения.

Числитель (F_y) и знаменатель (F_z) в (3) структурно и в численном выражении сходны с формулами, используемыми в [1], [4] и [5] для оценки сил, действующих на палубные контейнеры. Преобразуя далее (3) относительно приведенной координаты $z_0 = z + y \operatorname{tg} \varphi$, получаем допустимое возвышение $z_{\text{доп}}$ ЦТ груза, отнесенное к ДП:

$$z_{\text{доп}} = z + y \operatorname{tg} \varphi \leq \frac{(\operatorname{tg} \varphi - \operatorname{tg} \theta_s) \cos \theta_s}{0,07 \cdot \theta_s} \cdot (T^2 - 2h_w). \quad (4)$$

Диаграмма для определения θ_s

Выражение (4) можно представить графически в форме параметрической диаграммы (рис. 2), построенной в осях φ , $K_s = (\operatorname{tg} \varphi - \operatorname{tg} \theta_s) \cdot \cos \theta_s / 0,07 \cdot \theta_s$ [$\text{м}/\text{с}^2$] и $(T^2 - 2h_w)$. На поле диаграммы нанесены линии постоянных значений θ_s и z_0 , связанных с φ , T и h_w . Зная φ и z_0 , можно установить или уточнить перед погрузкой допустимые координаты y или z ЦТ груза, перевозимого без крепления (рис. 1).

Если диаграмма используется для сыпучего навалочного груза, следует принимать $y = 0$, т. е. оценивать устойчивость поверхности груза с возвышением $z = z_0$ в ДП, при выполнении штивки в просвете люка [3]. Важно отметить, что предлагаемая диаграмма универсальна по входным характеристикам, т. е. область ее применения не ограничивается районом плавания судна или видом груза.

Для входа в диаграмму период T для грузовых судов, при отсутствии других данных, можно вычислять по эмпирической формуле, рекомендуемой [5], [6]:

$$T = 0,8 (B / \sqrt{h}), \quad (5)$$

где B – ширина судна, м;

h – исправленная метацентрическая высота (МЦВ), м.

Расчетная высота волны h_w устанавливается по Правилам [7], в соответствии с районом плавания судна. Для открытых районов моря высоту волны можно оценивать, зная T и, соответственно, длину ре-

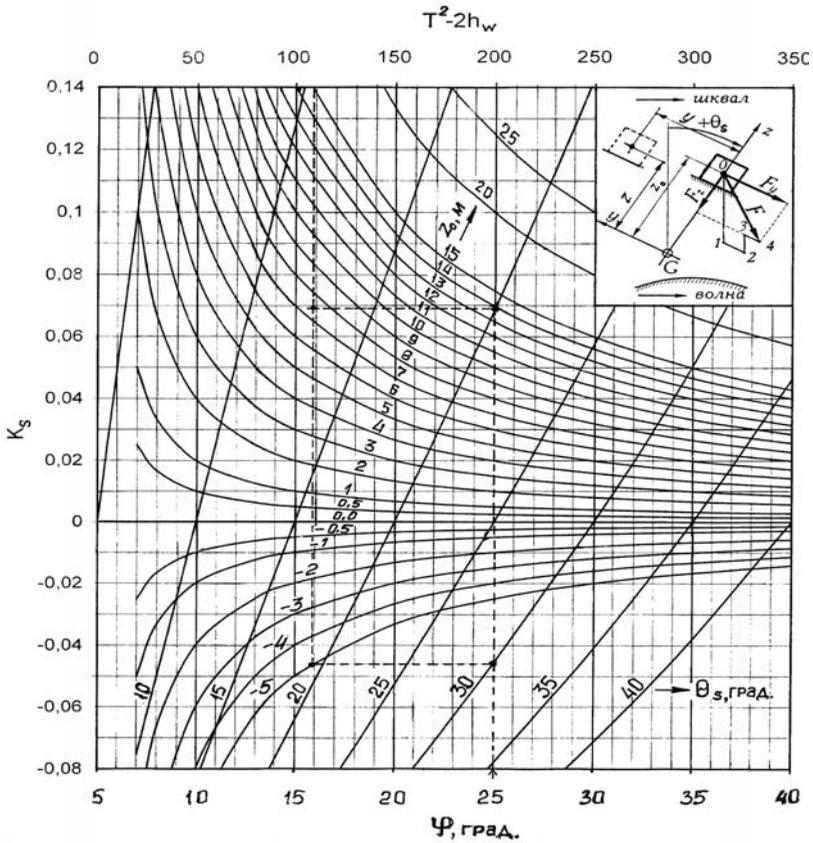


Рис. 2

Универсальная параметрическая диаграмма для оценки условий несмещаемости грузов при бортовой качке судна:

- 0 – центр тяжести (ЦТ) грузовой единицы; G – ЦТ судна с грузом;
- y, z – оси координат, связанные с судном; y, z – координаты ЦТ груза относительно G, м; 0-1 – сила веса P_i ; 1-2 – инерционная сила от углового ускорения;
- 2-3 – инерционная сила от вертикального ускорения; 3-4 – сила давления ветра (для палубного груза); 0-4 – результирующая сила F ; F_x, F_y, F_z – составляющие силы F ;
- $z_0 = z + y \operatorname{tg} \varphi$; – опорная поверхность груза

зонансной волны $\lambda_{\text{рез}} = gT^2/2\pi$, по известной статистической формуле [8], где $h_w = 0,17 \lambda_{\text{рез}}^{0,75} \cong 0,237 T^{1,5}$. Связь указанных характеристик гра-

фически представлена на рис. 3. В дополнение, учитывая (5), получаем ограничение $\lambda_{\text{рез}} \cong B^2/h$.

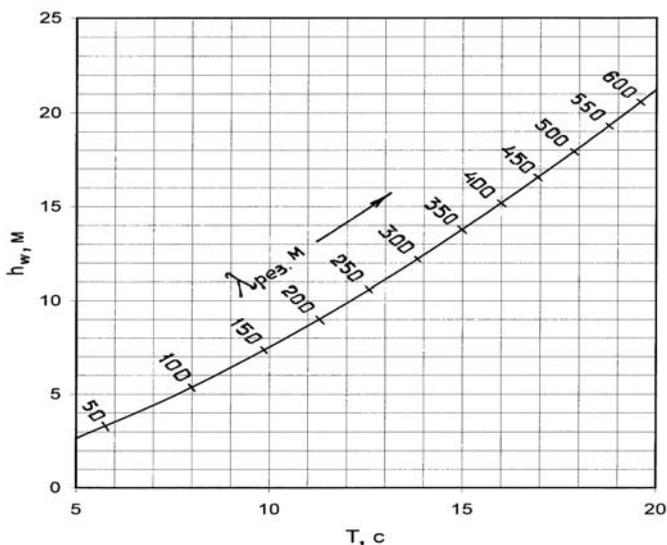


Рис. 3

Статистическая связь характеристик регулярного волнения в открытых районах моря

На примере построения, выполненного на рис. 2 для $h_w = 6,0$ м, $T = 11$ с, $z_0 = 7,5$ м, $\varphi = 25^\circ$, $\theta_s = 20^\circ$, показана взаимосвязь перечисленных величин для предельно устойчивого состояния груза, удерживаемого силой трения. При этом точки пересечения линий ($T^2 - 2h_w$), z_0 и φ , θ_s расположены на одной горизонтали, определяющей величину K_s . Видно, что снижение z_0 без изменения остальных характеристик соответствует увеличению θ_s , т. е. груз в этом положении становится динамически более устойчивым.

Расчет сдвигающей силы

В случае превышения θ_d по отношению к θ_s , снятому с диаграммы, т. е. при $\theta_s / \theta_d < 1$ (критерий несмещаемости груза в Правилах [7]), необходимо определить возникающую поперечную силу сдвига Q_{ds} и

оценить способы ее компенсации: опора груза на борта, промежуточные распорные устройства, специальные ограждающие конструкции, установка найтовов и т. д.

Силу сдвига, параллельную опорной плоскости и приложенную в ЦТ рассматриваемой грузовой единицы, можно представить следующим образом:

$$Q_{ds} = P[\bar{F}_y(\theta_d) - \bar{F}_z(\theta_d) \operatorname{tg} \varphi], \quad (6)$$

где $\operatorname{tg} \varphi = \bar{F}_y(\theta_s) / \bar{F}_z(\theta_s)$ согласно (3).

Используя (3) применительно к θ_d и θ_s , после подстановки в (6) и последующего преобразования при $z + y \operatorname{tg} \varphi = z_0$, приходим к формуле для сдвигающей силы Q_{ds} :

$$Q_{ds} = P[(\operatorname{tg} \theta_d - \operatorname{tg} \theta_s) + \frac{0,07 \cdot z_0}{(T^2 - 2h_w)} \cdot \left(\frac{\theta_d}{\cos \theta_d} - \frac{\theta_s}{\cos \theta_s} \right)] \cdot \cos \theta_d (1 - \bar{a}). \quad (7)$$

Применяя в (7) простую аппроксимацию $(\theta / \cos \theta) \cong 60 \operatorname{tg} \theta$, достаточно точную в практическом диапазоне $\theta = 20 - 35^\circ$, получаем окончательное выражение для Q_{ds} в безразмерном виде:

$$\bar{Q}_{ds} = Q_{ds} / P \cong \frac{(\operatorname{tg} \theta_d - \operatorname{tg} \theta_s)}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \theta_d}} \cdot \left(1 + \frac{4,2 \cdot z_0 - 2 \cdot h_w}{T^2} \right) = k_{ds} \cdot X, \quad (8)$$

где k_{ds} (левый множитель) – коэффициент устойчивости груза;

X (правый множитель) – параметрический коэффициент, в котором множители 4,2 и 2 имеют размерность $[c^2/m]$.

После нахождения θ_s по диаграмме рис. 2 и определения θ_d из расчета остойчивости, вычисляется сила Q_{ds} согласно (8).

На основе принятой выше тригонометрической аппроксимации, из (3) можно также получить приближенную формулу для непосредственного вычисления допустимой амплитуды бортовой качки θ_s , соответствующей предельно устойчивому состоянию груза, удерживаемого от смещения только силой трения:

$$\theta_s \cong \arctg \left[\frac{\operatorname{tg} \varphi}{1 + 4,2 \cdot (z + y \operatorname{tg} \varphi) / (T^2 - 2h_w)} \right], \quad (9)$$

где согласно (4) $z + y \operatorname{tg} \varphi = z_0$.

Как и должно быть, при $T \rightarrow \infty$ (статическое наклонение) или в случае $y = 0, z = 0$ (ЦТ груза в ЦТ судна, т. е. в центре вращения при $z_0 = 0$), $\theta_s \rightarrow \varphi$.

Формула (9) для определения θ_s представлена графиком на рис. 4, который является более простой версией диаграммы на рис. 2.

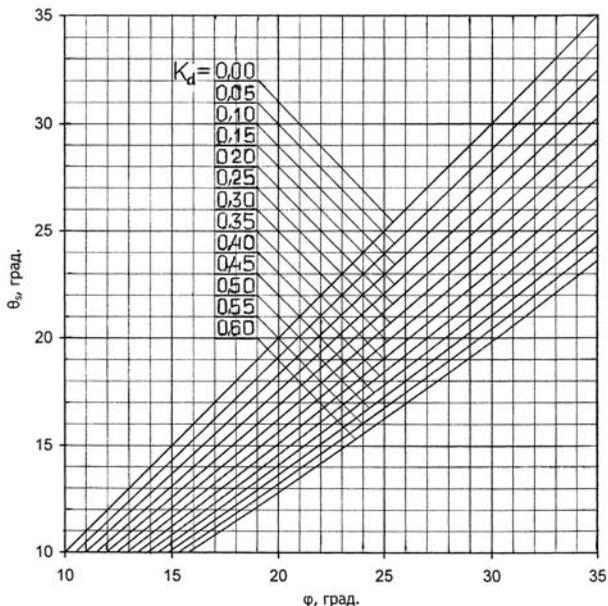


Рис. 4

Зависимость θ_s от φ и безразмерного динамического параметра
 $K_d = 4,2 \cdot (z + y \operatorname{tg} \varphi) / (T^2 - 2h_w)$

Процедура расчета Q_{ds} упрощается, если формулу (8), по аналогии с (4), представить в форме параметрической диаграммы, изображенной на рис. 5.

В качестве численного примера использованы входные данные с основной диаграммы рис. 2 ($z_0 = 7,5$ м) для условно заданного $\theta_d = 30^\circ$. Соответственно имеем $X = 1 + (4,2 \cdot 7,5 - 2 \cdot 6) / 11^2 = 1,16$ и $\bar{Q}_{ds} = 0,214$.

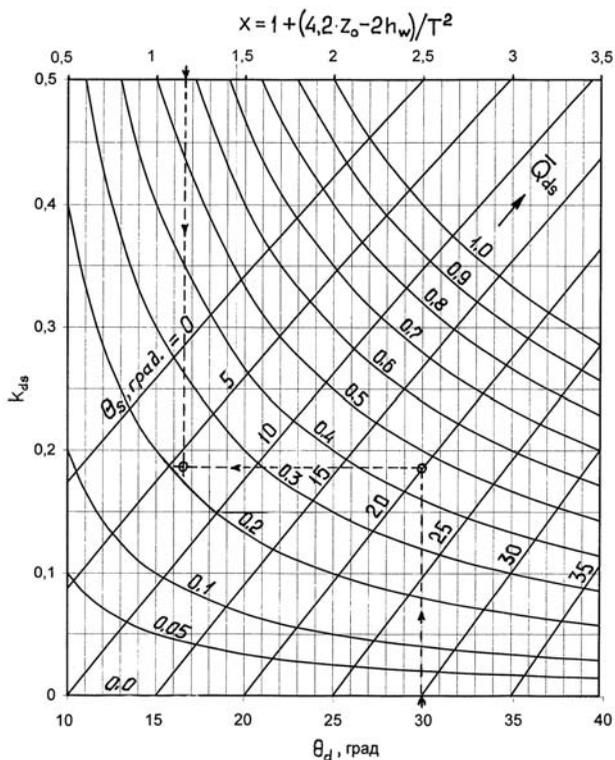


Рис. 5

Диаграмма для определения безразмерной силы сдвига \bar{Q}_{ds} при $\theta_d > \theta_s$.
 Пример: $\theta_s = 20^\circ$; $\theta_d = 30^\circ$; $X = 1,16$; $\bar{Q}_{ds} = 0,214$

Пары значений X , \bar{Q}_{ds} и θ_d , θ_s , расположены на одной горизонтали, дающей значение k_{ds} . Как показано выше на рис. 2, снижение z_0 сопровождается одновременным увеличением θ_s . При $z_0 = -5,0$ м имеем $\theta_s = 30^\circ$, т. е. в случае $\theta_d = 30^\circ$ $\bar{Q}_{ds} = 0$ согласно (8) и крепление груза с учетом действия инерционных сил не требуется. Однако, если судно окажется в аварийной ситуации на тихой воде со статическим аварийным креном, равным, например, θ_d , когда нарушается баланс действующих при качке сил в сторону статики, верхний предел увеличения θ_s следует ограничить углом φ , т. е. для $z_0 \leq 0$ принимать в (8) $\theta_s = \varphi$ (рис. 6).

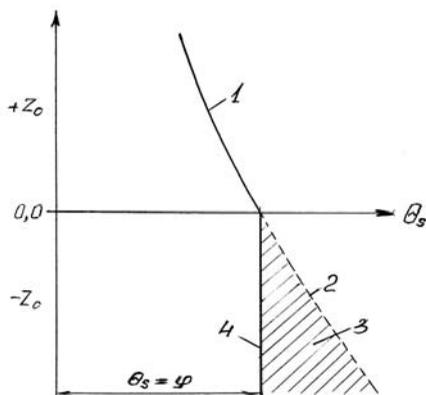


Рис. 6

Ограничение $\theta_s = \varphi$ при $z_0 \leq 0$:

- 1 – линия θ_s для $z_0 \geq 0$ с учетом динамики качки; 2 – линия θ_s для $z_0 \leq 0$ (см. рис. 2) с учетом динамики качки; 3 – область влияния инерционных сил на θ_s при $z_0 \leq 0$; 4 – ограничение $\theta_s = \varphi$ для $z \leq 0$ в случае статического (аварийного) крена

Варианты крепления груза

Схемы создания сил, противодействующих силе сдвига Q_{ds} , показаны на рис. 7. Для вариантов 2 и 3 достаточно ручного натяжения найтовок, создаваемого, в основном, для выбирания слабины.

Применительно к варианту 3 на рис. 8 приведены кривые коэффициента $\mu = f \sin \alpha + \cos \alpha$ для пар трения различных материалов, где $f = \operatorname{tg} \varphi$ – коэффициент трения груза, α – угол наклона поперечного найтова к опорной плоскости. Минимальное усилие натяжения T_{\min} обеспечивается при $\alpha_{\text{опт}} = \varphi$.

Последний вариант 4, ввиду взаимной нейтрализации горизонтальных составляющих сил натяжения T , связан с чрезмерно большими усилиями в найтовах и увеличением нагрузки на опорные конструкции и палубные обухи от вертикальных составляющих натяжения, создающих необходимую силу трения для удержания груза. В этом случае расчетное усилие в найтове можно обеспечить только специальными средствами механизации (лебедками, домкратами и т. д.).

Важно указать, что крепление по вариантам 3 и 4 теоретически справедливо только для грузовой единицы в виде жесткого моноблока, полностью передающего вертикальные составляющие силы на-

тяжения на опорную плоскость. В этих вариантах возможен перенос точек крепления с линий, проходящих через ЦТ груза, вверх, как показано на рис. 7, в удобные наружные точки груза, что иногда необходимо для предотвращения его опрокидывания.

На практике используется отвод найтовов в нос и в корму по диагоналям от точек крепления – с целью образования проекций сил

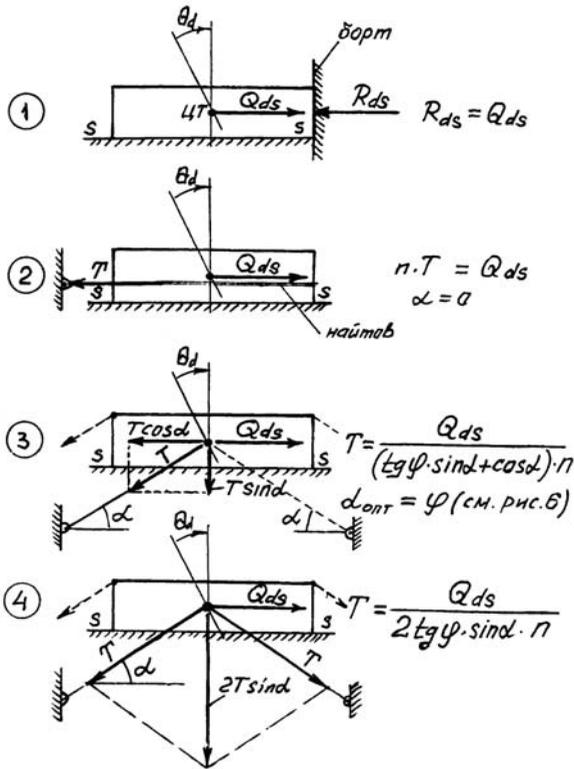
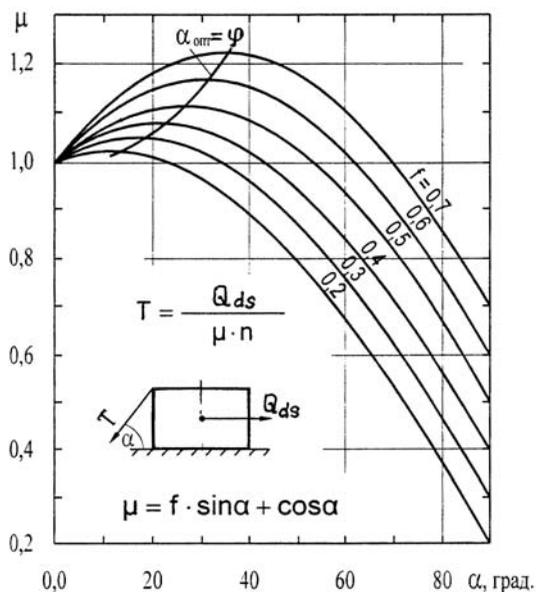


Рис. 7

Схемы противодействия усилию сдвига Q_{ds} при $\theta_d > \theta_s$:

- 1 – опора на борта (ограждающие конструкции);
 - 2 – крепление найтовом к борту;
 - 3 – крепление наклонными найтовыми при натяжении с одного борта;
 - 4 – крепление наклонными найтовыми при одинаковом натяжении с обоих бортов;
- n – число найтовов с одного борта; $s-s$ – опорная плоскость трения.

-----> – возможный перенос найтова из ЦТ груза



Пара трения	Коэффициент трения f
сталь по стали	0,21
сталь по дереву	0,50
дерево по дереву	0,55
сталь по резине	0,60
дерево по резине	0,70

$$\alpha_{отт} (\text{при } T_{min}) = \arctg f = \varphi$$

Рис. 8
 Зависимость коэффициента удержания μ (рис. 7 – вариант 3) от угла наклона найтова α и коэффициента трения $f = \tg \varphi$:
 T – усилие в поперечном найтове; n – число найтовов

натяжения, препятствующих продольному сдвигу груза. Расчетные кривые поправочных коэффициентов K_{β} к поперечному усилию натяжения T , в зависимости от углов установки найтова α и β , приведены на рис. 9.

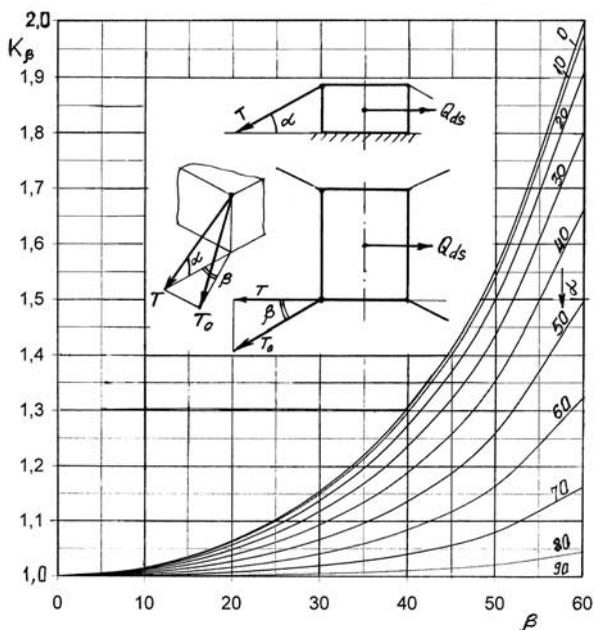


Рис. 9

График для определения поправки K_β :

α, β – углы установки найтова, град.;

$K_\beta = \sqrt{(\cos \alpha / \cos \beta)^2 + \sin^2 \alpha}$ – поправочный коэффициент;

T – расчетное натяжение найтова в поперечной плоскости;

$T_0 = K_\beta \cdot T$ – усилие в диагональном найтове с отводом

Выводы

1. Использование схематизированного процесса резонансной бортовой качки на синусоидальном волнении дает достаточно наглядное представление о поведении судна с расположенным на нем грузом и приводит к результатам, удовлетворительно согласующимся с полученными на практике.

2. В наименее устойчивом состоянии находится палубный груз на поднятом борту при динамическом наклонении судна на вершине резонансной волны.

3. Представленные параметрические диаграммы и методика определения сдвиговых сил могут использоваться для оперативной оцен-

ки условий несмещаемости грузов, а также для расчета прочности и количества необходимых средств их крепления.

Список литературы

1. King-Tao Liu, R. Keith Michel. Design of On-Deck Container Securing Systems. Marine Technology, Vol. 14, 1977.
2. Войнаровский Ю.М. Определение условий несмещаемости навалочного груза с учетом фазовой связи угловых колебаний судна с орбитальным движением // Тр. ЦНИИМФ. Вып. 272. – Л.: Транспорт, 1982.
3. Войнаровский Ю.М. Расчет предельно устойчивой поверхности откоса сыпучего груза при бортовой качке судна на регулярном волнении // Тр. ЦНИИМФ. Вып. 282. – Л.: Транспорт, 1983.
4. Lloyd's Register of shipping. Chapter 14. Freight Container Securing Arrangements. Section 8 – Determination of forces (8.2 Resulting forces – 8.2.2).
5. American Bureau of Shipping. Guide for Certification of Container Securing Systems. 1988. Section 4 – Design Consideration and Principles, 4.3.3 – Loading Cases.
6. Абузьяров З.К. Морское волнение и его прогнозирование. – Гидрометеиздат, 1981.
7. Правила безопасности морской перевозки грузов. – СПб.: ЗАО ЦНИИМФ, 2003.
8. Благовещенский С.Н., Холодидлин А.Н. Справочник по статике и динамике корабля. Ч. 2 – Динамика корабля. – Л.: Судостроение, 1975.

УДК 629.12

П.Б. Гуминский, А.Б. Нестеров

К ВОПРОСУ РЕГЛАМЕНТАЦИИ ВЫБОРА СТАЛИ ДЛЯ КОРПУСНЫХ КОНСТРУКЦИЙ АРКТИЧЕСКИХ ГАЗОВОЗОВ

Введение

Развитие газодобывающей отрасли требует увеличения объемов транспортировки газа, что, в свою очередь, приводит к необходимости создания транспортных систем для доставки добытого природного газа от места добычи до потребителя. Большие расстояния и природные особенности отдельных шельфовых районов во многих случаях не позволяют обеспечить транспортировку газа по трубопроводам, в связи с чем необходимо применение специализированных судов-газовозов. При этом следует принять во внимание, что в основном газовозами осуществляется перевозка газа в сжиженном состоянии при сверхнизких температурах.

В настоящее время в России ведется разработка газовых месторождений на шельфе и побережье арктических морей, что требует создания судов, способных обеспечивать транспортировку сжиженного газа в арктических условиях. Крупнотоннажные газовозы являются одними из наиболее высокотехнологичных судов, что обусловлено необходимостью исключить возможность крупномасштабной техногенной аварии с тяжелыми последствиями в случае утраты герметичности грузовых емкостей и попадания газа в атмосферу.

Вместе с тем проектирование газовоза для Арктики сталкивается с дополнительными проблемами, связанными с низкими темпера-

турами транспортируемого груза, нехарактерными для судов других типов. Поэтому становится актуальной выработка дополнительных требований к хладостойкости корпусов арктических крупнотоннажных газовозов, позволяющих в процессе проектирования правильно выбрать конструкционные материалы.

1 Существующая регламентация выбора сталей для корпусных конструкций

Существующая регламентация выбора конструкционного материала для корпусных конструкций приводится в гл. 1.2 части II «Корпус» действующих Правил РС [1], регламентирующей выбор материалов с точки зрения обеспечения хладостойкости. Эти требования разрабатывались без учета специфики транспортировки сжиженного газа в арктических условиях и поэтому нуждаются в корректировке.

Анализ существующих требований Правил РС [1] показывает что, они не учитывают в достаточной мере специфики арктических газовозов, предназначенных для перевозки больших объемов сжиженного природного газа (СПГ) при сверхнизких температурах.

Правила классификации и постройки газовозов РС [2] также, к сожалению, не содержат необходимой регламентации. Они являются адаптацией кода ИМО [3] и регламентируют выбор материала только для конструкций корпуса, воспринимающих пониженную температуру груза.

В нормативной документации иностранных классификационных обществ требования, которые могли бы быть применены к арктическим газовозам СПГ, также отсутствуют [4, 5]. Таким образом, необходима выработка дополнительных требований, позволяющих производить проектирование и выбор материала корпусных конструкций по предложенным в них зависимостям.

2 Основные типы емкостей для перевозки сжиженного газа

Необходимо принять во внимание, что на газовозах могут быть использованы различные грузовые емкости. В настоящее время для перевозок сжиженного природного газа применяются газовые емкости трех типов.

Вкладные емкости типа MOSS (рис. 1) представляют собой алюминиевые шары с внутренней теплоизоляцией, устанавливаемые на специальных кольцевых фундаментах в корпусе судна. Их достоин-



Рис. 1
Вкладные сферические емкости типа MOSS

ством является отсутствие прямого контакта емкости с внутренним дном и внутренним бортом, а недостатком – неполная утилизация объема.

Вкладные емкости типа SPB производства фирмы IHI (рис. 2) представляют собой прочную конструкцию с внутренним набором и наружной изоляцией, соответствующую по форме внутреннему пространству судового отсека. Их достоинством также является отсутствие прямого контакта с внутренним дном и внутренним бортом (имеется зазор постоянной величины), а недостатком – высокая стоимость.

Мембранные емкости производства фирмы GTT (рис. 3) представляют собой мембраны с изоляцией, опирающиеся на внутренний

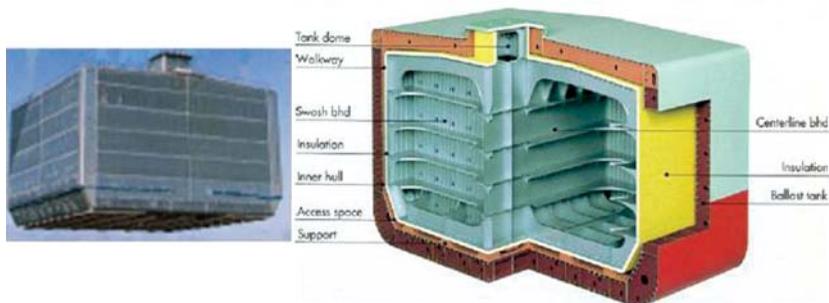


Рис. 2
Вкладные емкости типа SPB производства фирмы IHI

борт, внутреннее дно и соприкасающиеся с палубой. Их достоинством является полная утилизация объема и невысокая стоимость. К недостаткам таких емкостей принято относить наличие прямого контакта с корпусом. Впрочем, фирма GTT утверждает, что непроницаемость их мембраны не нарушается даже при значительной деформации корпуса в случае посадки судна на мель (рис. 4).

3 Предлагаемая регламентация расчетных температур

Компании-производители газовых емкостей утверждают, что применяемые средства изоляции обеспечивают полную теплоизоляцию корпусных конструкций.

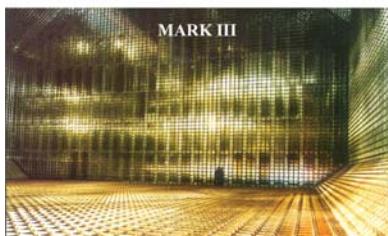
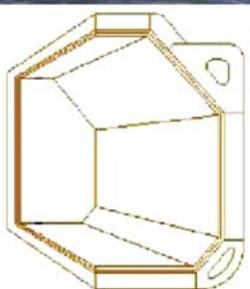


Рис. 3
Мембранные емкости типов Mk III, No96 производства фирмы GTT

Однако достоверных статистических данных, свидетельствующих об абсолютной эффективности теплоизоляции и невозможности понижения температуры корпусных конструкций при перевозке сжиженного газа, нет.

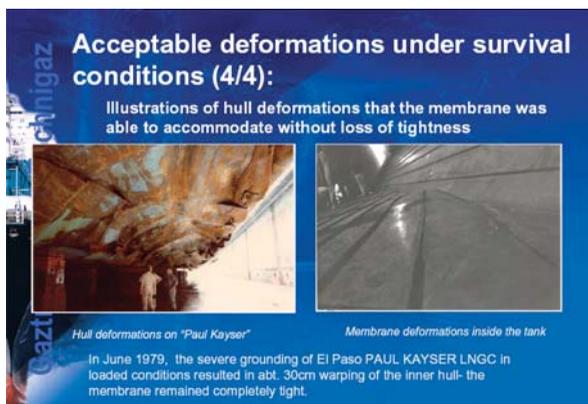


Рис. 4
Сохранение непроницаемости мембран
при больших пластических деформациях корпуса по данным фирмы GTT

Необходимо также учесть, что все три рассмотренных выше типа грузовых емкостей имеют так называемый «вторичный барьер», то есть дополнительный слой металла и изоляции, предназначенный для обеспечения дополнительной гарантии отсутствия просачивания сжиженного газа. Поэтому, если считать утверждения фирм-производителей об абсолютной эффективности изоляции относящимися к нормальной эксплуатации (оба барьера работают), то в возможной аварийной ситуации, соответствующей разрушению первичного барьера, (работает только вторичный барьер) можно полагать, что эффективность изоляции уже не абсолютна.

Учитывая сложные условия эксплуатации арктических судов, потенциальную опасность разрушения корпусных конструкций при недостаточной хладостойкости, а также учитывая отсутствие опыта эксплуатации газозовов в арктических морях, представляется разумным задать понижающую температурную поправку ΔT .

Величина ΔT принята в соответствии с экспертными оценками специалистов ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, так как в настоящий момент времени отсутствуют экспериментальные данные и статистические данные по опыту эксплуатации арктических газозовов. В дальнейшем могут быть проведены дополнительные исследовательские и экспериментальные работы для более глубокого изучения возможного уровня

понижения температуры элементов корпусных конструкций арктических газозовов в различных ситуациях. Принятая величина параметра ΔT обеспечивает консервативный подход и различается в зависимости от типа грузовых емкостей.

3.1 Понижающая температурная поправка для судов с различными типами грузовых емкостей.

Для газозовов с грузовыми емкостями типа MOSS и SPB величина ΔT принимается равной -5°C , такие грузовые емкости не соприкасаются непосредственно с корпусными конструкциями.

Для газозовов с мембранными вкладными емкостями производства фирмы GTT (типы Mk III, No96, CS 1) величина ΔT принимается равной -10°C , в связи с тем, что они контактируют непосредственно с элементами корпусных конструкций.

3.2 Определение величины расчетной температуры t_p в зависимости от расположения конструкций по высоте борта.

Выбор материала для корпусных конструкций осуществляется в соответствии с приведенными в 1.2.3 части II «Корпус» Правил РС [1] графиками согласно указанным ниже расчетным температурам t_p .

3.2.1 Расчетная температура для конструкций, расположенных выше района переменных ватерлиний.

В качестве расчетной величины температуры окружающей среды для конструкций, расположенных выше района переменных ватерлиний, используется параметр T_A , определяемый в соответствии с требованиями 1.2.3 части II «Корпус» Правил РС [1]. Такой подход представляется наиболее правильным, так как междубортное пространство на газозовах обычно является необогреваемым, а с внутренней стороны располагаются грузовые емкости со сжиженным природным газом, имеющим сверхнизкую температуру. Таким образом, при длительном нахождении в арктических морях температура в междубортном пространстве может понижаться до температуры окружающей среды, с учетом понижающей поправки. При регламентации необходимо учесть, что для ряда газозовов характерна конструкция с двойной верхней палубой (см. рис. 5). Тогда можно предложить следующие зависимости для определения t_p .

Для обшивки и набора внутреннего борта и внутренней палубы

$$t_p = T_A + \Delta T.$$

Для конструкций, находящихся в междубортном (междупалубном) пространстве

$$t_p = T_A + 0,75 \cdot \Delta T.$$

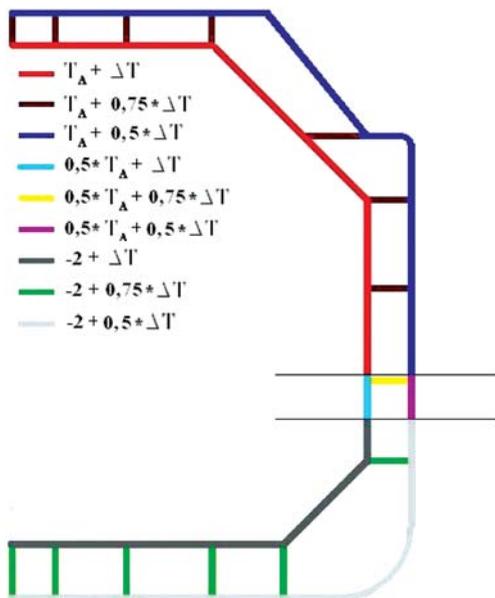


Рис. 5
Использование предложенных рекомендаций по выбору величины расчетной температуры для элементов конструкции корпуса газовоза с мембранными емкостями

Для обшивки и набора наружного борта и палубы

$$t_p = T_A + 0,5 \cdot \Delta T.$$

3.2.2 Расчетная температура для конструкций, расположенных в районе переменных ватерлиний.

Учитывая вышесказанное, расчетную величину температуры в районе переменных ватерлиний предлагается принять равной $0,5 \cdot T_A$ (это близко к среднему арифметическому расчетных величин температуры в районах выше и ниже рассматриваемого). Такое нормативное решение учитывает теплообмен по стали между различными районами корпуса и, в целом, соответствует регламентации действующих Правил РС. Тогда можно предложить следующие зависимости для определения t_p .

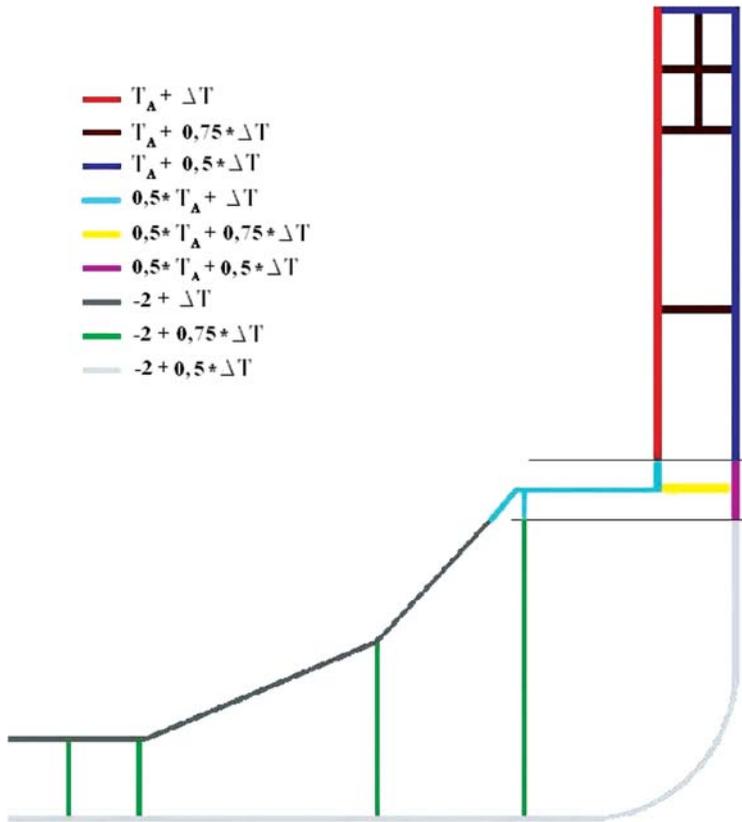


Рис. 6

Использование предложенных рекомендаций по выбору величины расчетной температуры для элементов конструкции корпуса газоведа со сферическими вкладными емкостями типа MOSS

Для обшивки и набора внутреннего борта

$$t_p = 0,5 \cdot T_A + \Delta T.$$

Для конструкций, находящихся в междубортном пространстве

$$t_p = 0,5 \cdot T_A + 0,75 \cdot \Delta T.$$

Для обшивки и набора наружного борта

$$t_p = 0,5 \cdot T_A + 0,5 \cdot \Delta T.$$

3.2.3 Расчетная температура для конструкций, расположенных ниже района переменных ватерлиний.

Для конструкций, расположенных ниже района переменных ватерлиний, температура среды принимается равной -2 °С, что соответствует минимальным зафиксированным значениям температуры воды в арктических морях.

Для обшивки и набора внутреннего борта и второго дна

$$t_p = -2 + \Delta T.$$

Для конструкций, находящихся в междубортном пространстве

$$t_p = -2 + 0,75 \cdot \Delta T.$$

Для обшивки и набора наружного борта и днища

$$t_p = -2 + 0,5 \cdot \Delta T.$$

3.2.4 Расчетная температура для конструкций междуотсечных переборок.

В качестве расчетной величины температуры окружающей среды для конструкций междуотсечных переборок используется параметр T_A , поскольку влияние теплообмена с конструкциями ниже ватерлинии незначительно в силу большой ширины и высоты борта, характерных для современных газозводов. Повышение температуры до $0,5 T_A$ предусматривается только для концевых переборок грузовой зоны при наличии обогрева отсека, соседнего с грузовой зоной, и отсутствии изоляции на переборке.

Так как конструкции переборок между грузовыми трюмами могут охлаждаться с обеих сторон, понижающая поправка для них должна быть удвоена. Тогда можно предложить следующие зависимости для определения t_p .

Для обшивки и набора переборок между грузовыми трюмами

$$t_p = T_A + 2 \cdot \Delta T.$$

Для обшивки и набора концевых переборок грузовой зоны

$$t_p = T_A + \Delta T.$$

Для обшивки и набора концевых переборок грузовой зоны при наличии обогрева отсека, соседнего с грузовой зоной, и отсутствии изоляции на переборке

$$t_p = 0,5 \cdot T_A + \Delta T.$$

Для наглядности предложенные выше рекомендации по выбору величины расчетной температуры для элементов конструкции корпуса арктических газовозов показаны на рис. 5 (газовоз с мембранными вкладными емкостями) и на рис. 6 (газовоз со сферическими вкладными емкостями типа MOSS).

Заключение

В рамках работы были предложены экспертные оценки важных параметров и достигнуты следующие научно-технические результаты:

установлена зависимость понижающей температурной поправки от типа грузовых емкостей;

определено изменение воздействия температуры окружающей среды по высоте борта;

разработаны расчетные зависимости для определения температуры, воздействующей на корпусные конструкции арктических газовозов.

Список литературы

1. Правила классификации и постройки морских судов. – СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2010.
2. Правила классификации и постройки газовозов. – СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2004.
3. Международный кодекс постройки и оборудования судов, перевозящих сжиженные газы наливом. – СПб.: ЗАО «ЦНИИМФ», 1999.
4. Американское бюро судоходства. Руководство для судов, эксплуатирующихся в условиях низких температур (сентябрь 2006). – CD-Rum, ABS, 2007.
5. Germanischer Lloyd. GL Rules and Programs 9.0, Edition 2007. – CD-Rum, GL, 2007.

К.Н. Шхинек, С.В. Балагура, А.С. Большев, С.А. Фролов

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РОВНОГО ЛЬДА И ТОРОСОВ С ЗАЯКОРЕННЫМИ ПЛАВУЧИМИ СООРУЖЕНИЯМИ ТИПА FPU И ПЛАТФОРМАМИ ТИПА SPAR

Введение

Обустройство месторождений углеводородов на российском континентальном шельфе связано с созданием плавучих объектов, длительное время работающих в условиях открытого моря. При освоении глубоководных месторождений наиболее перспективными представляются морские платформы типа SPAR и плавучие сооружения типа FPU (Floating Production Unit), удерживаемые в заданной точке акватории с помощью якорных систем.

Воздействие торосистых льдов на заякоренные платформы или сооружения судового типа, как правило, изучается при проектировании этих объектов. Заякоренные сооружения, в отличие от стационарных, обладают существенной податливостью, и поэтому силовое воздействие на них со стороны торосов зависит от реакции сооружений. Тем не менее, нередко априорная оценка ледовых нагрузок выполняется с учетом только глубины внедрения сооружения в торос без учета динамических аспектов этого взаимодействия.

Целью настоящей работы является рассмотрение особенностей динамики взаимодействия ледовых образований (ровный лед и торосы) с заякоренными плавучими сооружениями. В качестве таких плавучих сооружений рассмотрены FPU судового типа и морские платформы типа SPAR.

Статические (квазистатические) нагрузки на неподвижные сооружения изучались в течение многих лет, и методы их определения более или менее известны. Основная особенность плавучих сооружений – их большая податливость. Поэтому нагрузки в этом случае являются результатом взаимодействия льда с движущимся объектом, и должны рассматриваться в динамике. Другой особенностью плавучих заяко-

ренных сооружений является то, что для проектирования их безопасности требуется знание не только самих нагрузок, но и реакций якорных систем удержания. Ряд лабораторных экспериментов и теоретических решений показывает, что динамика взаимодействия, по сравнению со статическим подходом, может привести в одних случаях к возрастанию нагрузок или усилий в связях, тогда как в других – к их снижению.

В настоящей работе предлагается метод исследования, который основывается на параметрическом анализе явления: на основании многочисленных расчетов по разработанной специальной программе для широкого набора ледовых условий, конструкций, параметров сооружений, характеристик якорных связей предлагается определять ледовые нагрузки и усилия в связях. По результатам расчетов предлагается выявлять зависимости, связывающие ледовые условия, характеристики сооружения, параметры систем заякорения с одной стороны, и нагрузки, реакцию якорной системы – с другой.

Постановка задачи и метод моделирования

Математическое моделирование взаимодействия ледовых образований с плавучим заякоренным объектом базируется на ряде ниже изложенных ограничений и допущений.

1. Изучается изменение во времени нагрузок от ровного льда и торосов.

2. Нагрузка от тороса рассматривается как сумма (в одни и те же моменты времени) нагрузок от консолидированного слоя и килья тороса, определяемых независимо.

3. Нагрузка от консолидированного слоя тороса вычисляется по той же методике, что и нагрузка от ровного льда.

4. Нагрузка от килья тороса определяется в квазистатическом приближении: киль движется с заданной скоростью, а мгновенное значение нагрузки определяется пропорционально площади контакта «киль–сооружение» в рассматриваемый момент времени. Если сооружение имеет сложную форму, то оно разбивается на элементы, и в каждый момент времени определяется нагрузка на элемент в зависимости от его формы и подошедшей к нему части тороса.

Таким образом, в программе рассматриваются как квазистатические, так и динамические эффекты. Основные динамические эффекты связаны с воздействием ровного льда и консолидированного слоя тороса. Задача взаимодействия ровного льда решается при следующих предпосылках.

Сооружение

1. Сооружение в районе ватерлинии имеет форму усеченного конуса с вершиной, направленной вниз (downward cone). Оно симметрично относительно вертикальной плоскости, проходящей через вершину конуса, и обладает тремя степенями свободы в этой плоскости.

2. Поскольку решается двумерная задача в вертикальной плоскости, возникает проблема перевода трехмерной поверхности конуса в двумерную. Это достигается делением фронтальной поверхности конуса на 9 секторов: центрального, шириной, равной радиусу сооружения R , и восьми боковых, шириной $R/8$. Реальная поверхность каждого из них заменяется плоскостью, нормальной к направлению движения льда и наклоненной соответствующим образом к вертикали.

3. Влияние окружающей среды на движение сооружения учитывается введением в уравнения движения коэффициентов присоединенных масс и сопротивления воды по каждой из степеней свободы.

4. Якорная система состоит из комбинации тросов, цепей и плавучестей. Возможен учет динамики связей. Влияние окружающей воды при этом может учитываться введением коэффициентов присоединенных масс и сопротивления этих элементов связи.

Ледовое образование (ровный и наслоенный лед)

1. Ледовое образование обладает тремя степенями свободы в вертикальной плоскости. Оно состоит из однородного, изотропного льда, имеет неограниченную протяженность и энергию.

2. Лед обладает определенной гибкостью и может сжиматься в продольном направлении и гнуться до достижения предельного состояния (разрушения).

3. Лед рассматривается как упруго-хрупкая среда. В качестве предельного состояния принимается прочность при совместном действии сжатия и изгиба, однако достижение этого предела прочности не означает потерю несущей способности льда.

4. Лед в пределах каждого сектора поверхности сооружения рассматривается согласно балочной теории. При этом учитывается поправка на предельно допустимый момент для балки по сравнению с пластинкой, полученной в экспериментах В.В.Лаврова (1969).

Процесс взаимодействия с ровным льдом

Процесс взаимодействия при расчетах разбивается на ряд последовательных этапов (рис. 1 а).

Первый этап: к неподвижному сооружению подходит лед, скользит по поверхности сооружения и смещает последнее, вызывая натяжение связей. Процесс длится до тех пор, пока напряженное состояние во льду не достигнет критического значения. Для выяснения этого на каждом шаге по времени рассчитывается поле напряжений в поперечных сечениях льда на различных расстояниях от сооружения и сравнивается с предельным состоянием. Достижение предельного состояния означает образование трещины во льду на определенном расстоянии от сооружения и резкое снижение толкающей силы. Этот момент означает начало второго этапа.

Второй этап: вследствие уменьшения толкающей силы, сооружение, под действием якорных связей, движется навстречу льду. Отколовшийся на первом этапе блок льда находится в контакте с ледяным полем и сооружением. Он продолжает скользить по поверхности сооружения и, в зависимости от условий, может дополнительно разрушиться от изгиба/сжатия, либо в основном от сжатия. Процессы деления блока на меньшие, или локального разрушения, продолжают до тех пор, пока ближайший к сооружению

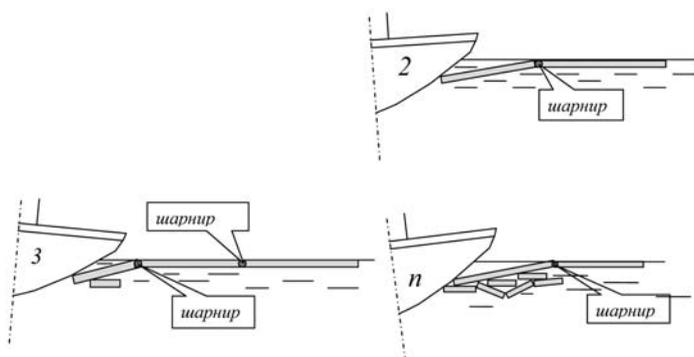


Рис. 1 а

Последовательные этапы взаимодействия судна с ровным льдом

блок не достигнет предельной длины (3 – 5 толщин льда, согласно наблюдениям в натуральных условиях) или не ляжет на поверхность сооружения. Далее этот блок учитывается как плавучесть, расположенная под бортом сооружения и напозающим льдом. При расчете воздействия блоков на сооружение и подходящий к сооружению лед, предполагается, что сила плавучести блоков в воде распределена по треугольнику. Вершина треугольника находится у сооружения, а противоположный угол составляет 25 – 30°. Процесс накопления обломков продолжается до тех пор, пока они не достигнут нижнего конца конической части сооружения или глубины, на которой диаметр конуса уменьшается в два раза. Это положение считается стационарным.

Третий, пятый и т. д. участки аналогичны первому – сооружение взаимодействует с неразрушенным льдом, который толкает сооружение; а участки четвертый, шестой и т. д. – сооружение взаимодействует с блоками. Разрушенные блоки собираются под поверхностью сооружения.

Процесс взаимодействия с торосистым льдом

1. Нагрузки от консолидированной части тороса и его кия рассматриваются как независимые (рис. 1 б).

2. Нагрузки от консолидированного слоя рассчитываются так же, как от ровного льда.

3. Взаимодействие кия тороса с плавучим объектом моделируется во временной области с учетом изменяющейся площади контакта по уравнениям Долгополова.

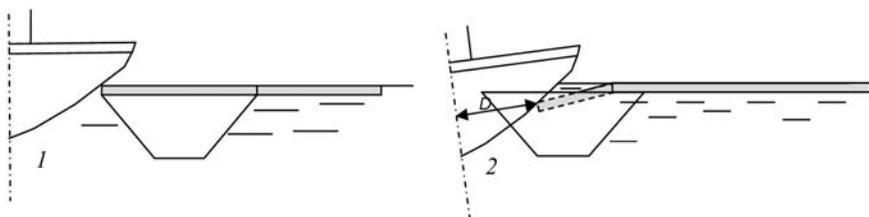


Рис. 1 б
Этапы взаимодействия судна с торосистым льдом

Метод решения

Решение состоит в одновременном интегрировании дифференциальных уравнений движения сооружения и льда при соблюдении условий на границе контакта «блок льда–сооружение» и «блок льда–ледяное поле». На каждом шаге по времени определяется положение зоны контакта «лед–сооружение».

Расчетные величины

На каждом шаге по времени определяются:
перемещение, скорость и ускорение сооружения по трем координатам;

положение области контакта «лед–сооружение»;

давление в зоне контакта и нагрузка на сооружение, как интеграл от давления по смоченной поверхности;

усилие в якорных связях.

Уравнения движения плавучего заякоренного объекта (1), записанные в неподвижной системе координат (ось X совпадает с направлением движения льдов, а ось Z направлена вертикально вверх) позволяют описать его движение в трех степенях свободы:

$$\begin{cases} (M + \lambda_{11}) \ddot{\xi}_{0y} + b_{11} \dot{\xi}_{0y} + B(\ddot{\xi}_{0y} - V_i) = F_{curx} + F_{windx} + F_{anchx} + F_{ix} \\ (M + \lambda_{33}) \ddot{\zeta}_{0y} + b_{33} \dot{\zeta}_{0y} = -Mg + F_{gzy} + F_{anchz} + F_{iz} \\ (J + \lambda_{55}) \ddot{\theta}_y + b_{55} \dot{\theta}_y = M_{cury} + M_{windy} + M_{gy} + M_{anchy} + M_{iy} \end{cases} \quad (1)$$

где M, J – масса и момент инерции плавучего объекта;

$\xi_{0y}, \zeta_{0y}, \theta_y$ – горизонтальное, вертикальное перемещение объекта и его дифферент;

F_{cur}, M_{cur} – силы и момент от течения;

F_{wind}, M_{wind} – силы и момент от ветра;

F_{anch}, M_{anch} – силы и момент от якорной системы удержания;

F_g, M_g – гидростатические силы и момент;

F_p, M_p – силы и моменты от ледовых образований;

λ_{ij}, D_{ij} – присоединенные массы и гидродинамическое сопротивление;

B – скоростное сопротивление при внедрении сооружения в ледовое образование.

Решение задачи осуществлялось на платформе программного комплекса «Anchored Structures». При этом присоединенные массы и гидродинамические сопротивления сооружения, все категории внешних сил, реакции системы удержания вычислялись в указанном программном комплексе. Силы и моменты от ледовых образований

вычислялись на основании решения уравнений их движения, выполнявшихся совместно с (1).

На основании моделирования во временной области изучалось поведение различных плавучих объектов под действием ровных и торосистых льдов, обладающих различными физико-механическими характеристиками и движущихся с разными скоростями.

На рис. 2, 3, в качестве примера, приводятся геометрические модели корпусов FPU и SPAR, а также общий вид систем их удержания.

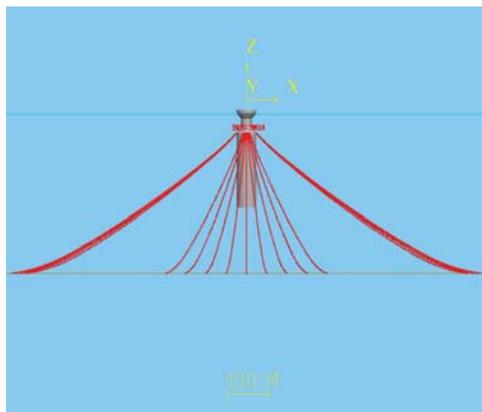


Рис. 2
Общий вид сбоку SPAR

На рис. 4 представлено графическое отображение поведения платформы типа SPAR (построенное в процессе решения уравнений (1) в программном комплексе «Anchored Structures») при взаимодействии с ровным льдом в момент наибольшего дифферента платформы.

Некоторые результаты

В процессе математического моделирования было исследовано поведение вариантов SPAR и FPU, с различными характеристиками систем удержания под действием ровных льдов и торосов. К рассмотрению принималось несколько характерных типоразмеров торосов с заданными физико-механическими свойствами, движущимися со скоростями от

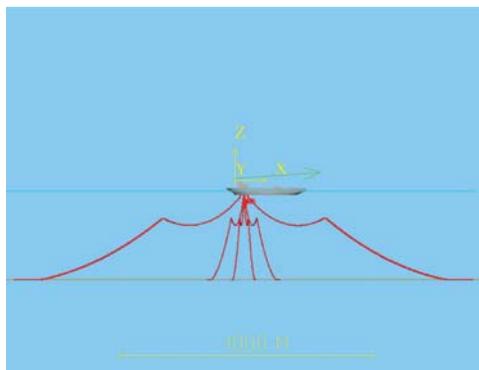


Рис. 3
Общий вид FPU

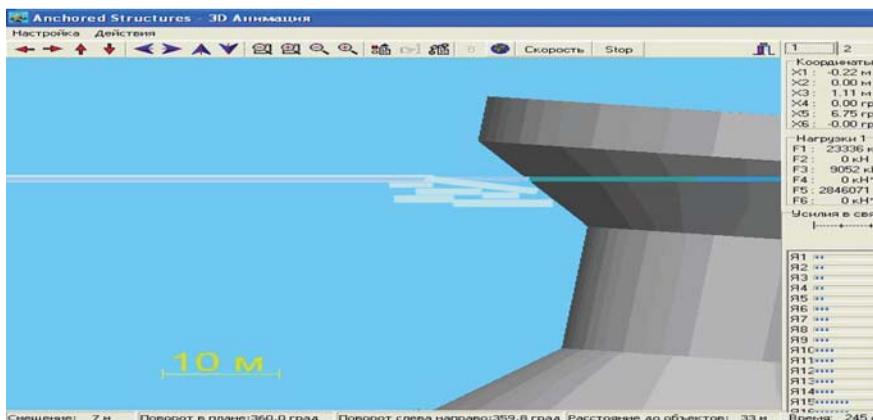


Рис. 4
Взаимодействие SPAR с ровным льдом

0,05 м/с до 1,5 м/с. Кроме того, было промоделировано взаимодействие плавучих объектов с ровным льдом различной толщины с известными свойствами при движении его в том же диапазоне скоростей.

При взаимодействии SPAR и FPU с ровными льдами нагрузка на корпус представлялась в виде треугольных импульсов (рис. 5), свя-

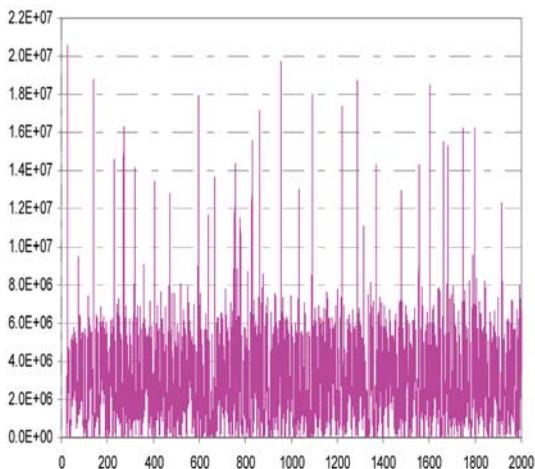


Рис. 5

Временная диаграмма контактной ледовой нагрузки на неподвижную SPAR

занных с процессами излома льдин в результате контактного взаимодействия с объектом. Однако, ввиду высокочастотности внешнего воздействия относительно собственной частоты сооружения, последнее слабо реагировало на подобную нагрузку, выделяя из спектра нагружения лишь воздействия, близкие к собственным частотам (рис. 6).

Иная картина возникала при воздействии на плавучий объект торосистых льдов (рис. 7). Здесь при воздействии ровных льдов (ледовая нагрузка обозначена зеленым цветом) наблюдались продольно-горизонтальные колебательные движения судна с собственной частотой (перемещения обозначены черным цветом). При взаимодействии с килем тороса ледовая нагрузка увеличивалась, сооружение смещалось вслед за движением киля, а нагрузка в системе удержания существенно возрастала (натяжение в связи обозначено красным цветом). Максимум нагрузки в системе удержания соответствовал изменению направления движения FPU. Этот очевидный динамический эффект был обусловлен близостью собственной частоты плавучего заякоренного объекта к частоте внешнего воздействия.

Обнаруженные динамические эффекты определяют необходимость тщательного изучения поведения подобных объектов с учетом его массовых, гидродинамических характеристик, параметров систем

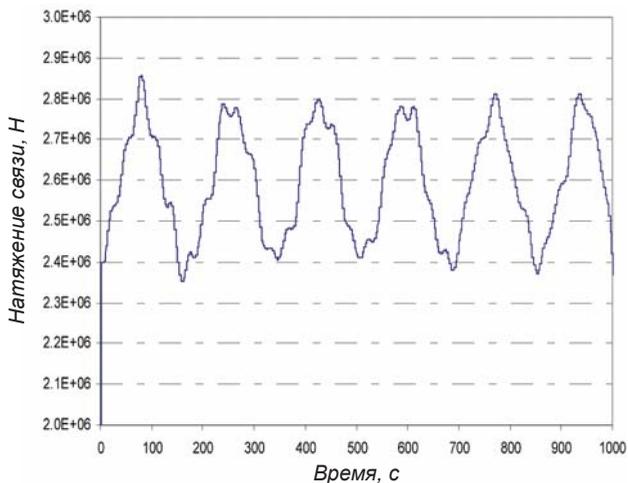


Рис. 6
Временная зависимость натяжения связи для SPAR



Рис. 7
Временные зависимости, полученные путем совместного динамического анализа якорных связей и FPU

удержания, геометрических и физико-механических характеристик окружающих льдов.

Для интегральной оценки динамических эффектов авторами предлагается использовать коэффициенты динамичности, позволяющие оценить нагрузки на сооружение и усилие в якорных связях в динами-

ке при известной квазистатической нагрузке на неподвижное сооружение. В качестве этих коэффициентов были предложены величины:

$$K_{d1} = F_{\max,V} / F_{\max,0,05} - \text{коэффициент динамичности по нагрузке};$$

$$K_{d2} = P_{\text{moor},V} / P_{\max,0,05} - \text{коэффициент динамичности по усилию в связях},$$

где $F_{\max,0,05}$, $F_{\max,V}$ – нагрузка при скорости 0,05 м/с на неподвижное сооружение и нагрузка на податливое сооружение при скорости движения льдов V соответственно;

$P_{\text{moor},V}$ – реакция в связях при скорости движения льдов V .

На основании подобных представлений для исследуемых плавучих объектов были подобраны параметры системы удержания, минимизирующие динамические эффекты, и получены зависимости, представленные на рис. 8 – 15.

Анализ зависимостей показывает, что динамические эффекты в связях под действием ровного льда незначительны. Основные динамические эффекты при действии ровного льда связаны с изменением значений внешней нагрузки, которые отражает коэффициент динамичности K_{d1} . Динамические эффекты в связях системы удержания в

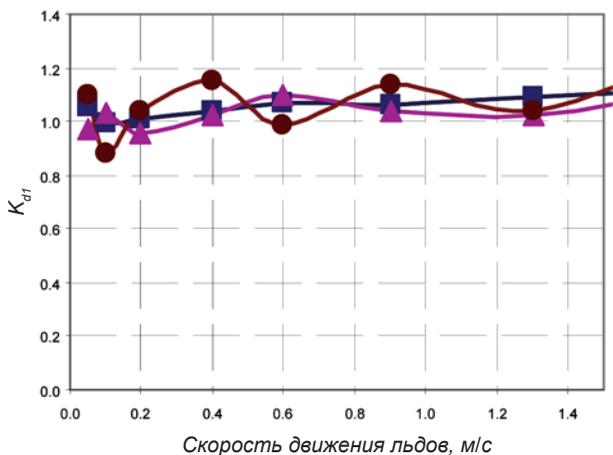


Рис. 8
Зависимость K_{d1} от скорости движения торосов для FPU при различных параметрах торосов

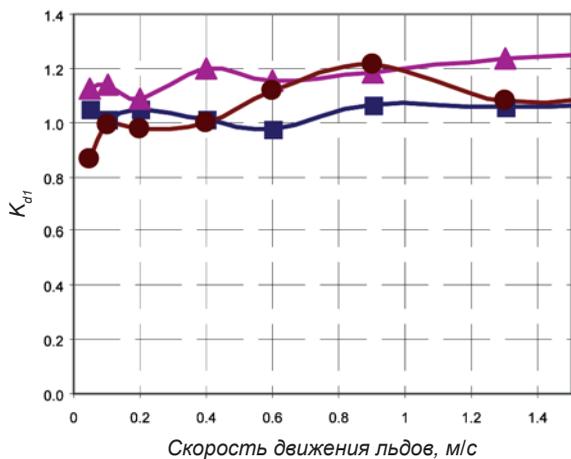


Рис. 9
Зависимость K_{d1} от скорости движения торосов для SPAR при различных параметрах торосов

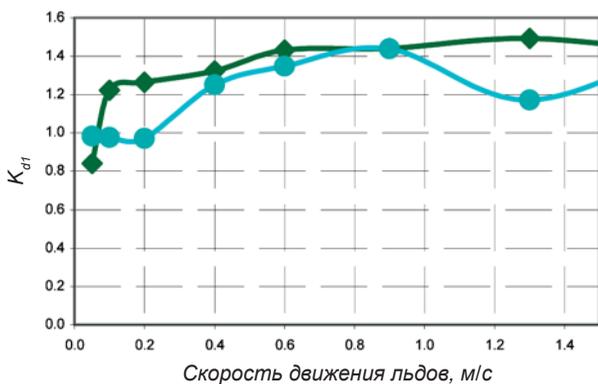


Рис. 10
Зависимость K_{d1} от скорости движения ровного льда для FPU при различных параметрах льдов

наибольшей степени проявляются при воздействии торосов (коэффициент динамичности K_{d2}).

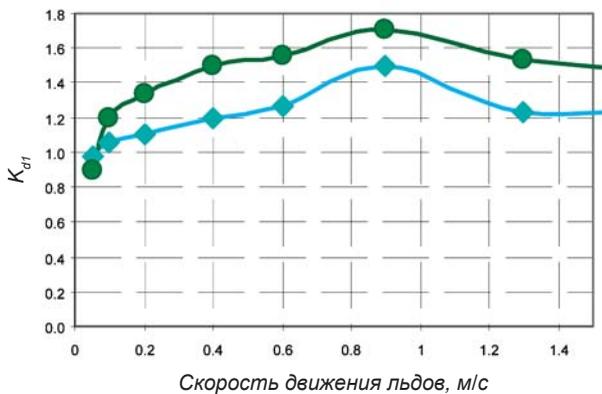


Рис. 11
Зависимость K_{d1} от скорости движения ровного льда для SPAR при различных параметрах льдов

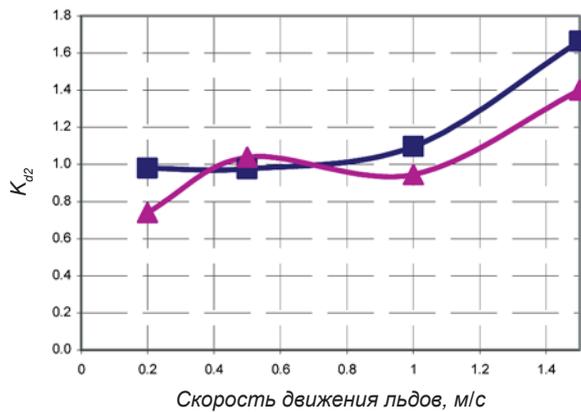


Рис. 12
Зависимость K_{d2} от скорости движения торосов для FPU при различных параметрах торосов

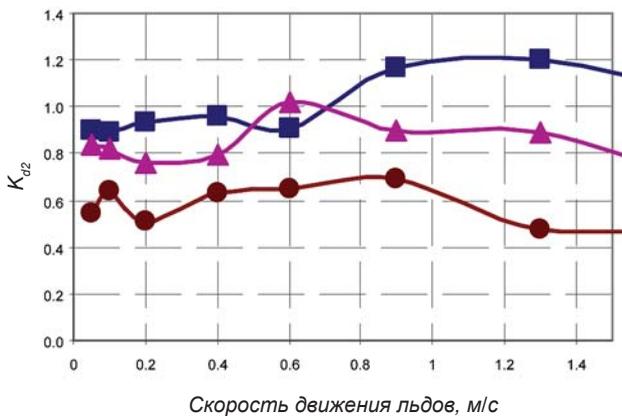


Рис. 13
Зависимость K_{02} от скорости движения торосов для SPAR при различных параметрах торосов

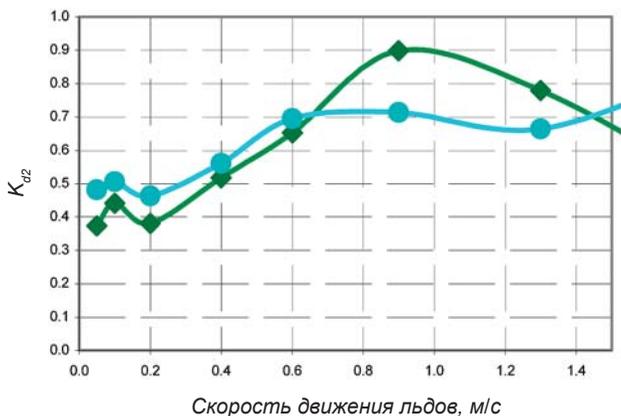


Рис. 14
Зависимость K_{02} от скорости движения ровного льда для FPU при различных параметрах льдов

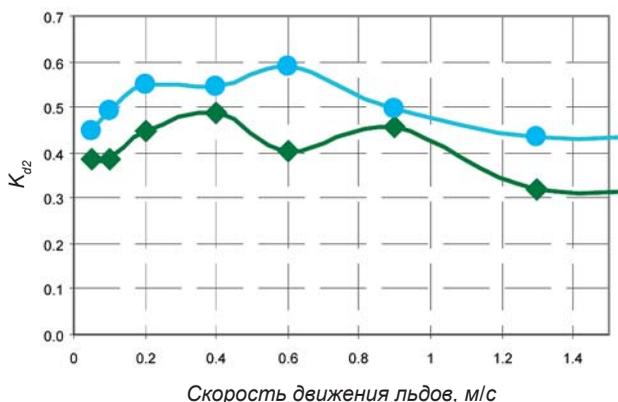


Рис. 15
Зависимость K_{d2} от скорости движения ровного льда для SPAR при различных параметрах льдов

Выводы

На основании проведенных исследований в рамках рассмотренных пределов вариации данных по характеристикам сооружений, якорных связей и ледовых условий можно сделать следующие выводы.

1. Наибольшие усилия в якорных связях вызываются воздействием торосов даже в случаях, когда глобальная нагрузка на сооружение от ровного льда и торосов одинакова. Это вызвано тем, что колебания нагрузки, вызванной ровным льдом, имеют период, значительно меньший периода собственных колебаний сооружений.

2. Комбинация параметров ледяных образований и периода собственных колебаний сооружения на якорных связях приводят к тому, что при определенных скоростях движения льда в связях возникают максимальные реакции. Общая тенденция поведения сооружения и систем удержания состоит в увеличении динамичности при времени контактного взаимодействия, кратного периоду собственных колебаний заякоренного плавучего объекта.

3. Показано, что процесс взаимодействия при скорости 0,05 м/с может рассматриваться как квазистатический. Это позволило, на основании проведенных опытов, разработать методику определения динамических усилий в связях по нагрузкам на сооружение, определенным на основании методов, используемых в квазистатике.

4. Получены приближенные значения коэффициентов динамичности для наиболее удачных из рассмотренных систем удержания. Подобные коэффициенты могут быть использованы на начальной стадии проектирования. Вместе с тем показано, что проблема выбора оптимальной конструкции системы удержания является чрезвычайно актуальной и должна рассматриваться особо при детальном проектировании с учетом всего перечня возможных ледовых воздействий.

Список литературы

1. Большев А.С., Малютин А.А., Фролов С.А., Чернецов В.А., Шхинек К.Н. Математическое моделирование воздействия ровного льда на плавучие заякоренные сооружения для Штокмановского месторождения // Сборник трудов конференции «Освоение арктического шельфа России». – 2005. С. 118–122.

2. Большев А.С., Михаленко Е.Б., Фролов С.А. Математическое моделирование поведения морских плавучих сооружений // Труды СПбГПУ, №502. – СПб.: СПбГПУ, 2007. – С. 252–274.

Е.М. Анполонов, К.Е. Сазонов, И.М. Белов

РАЗРАБОТКА ФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ И МЕТОДА РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ НИЗКОЧАСТОТНОЙ ВИБРАЦИИ КОРПУСА КРУПНОТОННАЖНЫХ СУДОВ ОТ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЛЬДА

Опыт эксплуатации ледоколов и судов ледового плавания показывает, что при движении в ледовых условиях их ходовая вибрация существенно возрастает. Это возрастание обуславливается изменением состава и величин возмущающих переменных сил по сравнению с условиями движения на чистой воде. При отсутствии льда основными источниками возбуждения вибрации являются работа главных механизмов, а также периодические гидродинамические силы, возникающие в системе «корпус судна – гребной винт». При движении во льдах в дополнение к указанным источникам вибрации возникают другие, обусловленные физическими процессами взаимодействия корпуса судна и его движителей со льдом.

На рис. 1 приведено сопоставление уровней вибрации при движении судна в ледовых условиях и на чистой воде.

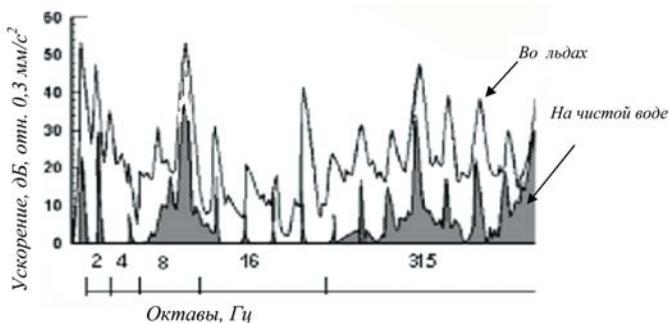


Рис. 1
Сравнение уровней вибрации корпуса ледокола при плавании по чистой воде и во льдах

Натурные наблюдения показывают, что при движении судна в средних по тяжести ледовых условиях (скорость движения судна снижается на 30 – 40 % от номинальной при потреблении полной мощности) интенсивную вибрацию по всей длине судна вызывают усилия, связанные процессами разрушения ледяного покрова и притапливания корпусом образовавшихся при этом отдельных кусков льда. При этом наибольшая вибрация возникает на низших тонах свободных колебаний. В ледовых условиях, кроме этого, существенно возрастают возмущающие силы на лопастной и кратных ей частотах. В основном эти силы обусловлены непосредственным взаимодействием гребных винтов со льдом. Это взаимодействие происходит в режиме фрезерования льда, при котором лопасти винта последовательно взаимодействуют с одной и той же льдиной.

Метод оценки ледовой вибрации, вызываемой периодическими силами, которые возникают при фрезеровании гребным винтом приотпленных обломков льда, описан в работе [1]. Целью настоящей работы является разработка метода оценки уровней ледовой вибрации корпуса на частотах низших тонов свободных колебаний, возникающей при движении крупнотоннажных судов в сплошных ровных льдах. В последнее время актуальность этой задачи возросла в связи с необходимостью создания морских транспортных систем для вывоза природного газа из районов добычи, расположенных на Крайнем Севере. Низкочастотная вибрация в районе расположения грузовых емкостей может стать одной из причин появления усталостных повреждений опорных конструкций и изоляции [2]. Анализ показывает, что для обеспечения экономической эффективности перевозок газа в ледовых условиях, в составе транспортной системы необходимо использовать крупнотоннажные суда, способные как к самостоятельному плаванию во льдах, так и к движению в составе каравана по ледяному каналу, проложенному ледоколом. Из этого следует, что при разработке метода оценки ходовой низкочастотной вибрации перспективных крупнотоннажных судов необходимо рассматривать два основных сценария движения: движение в сплошном ровном поле льда и движение по каналу за ледоколом, причем при ширине канала меньше ширины корпуса крупнотоннажного судна.

Важнейшей задачей при разработке метода оценки характеристик низкочастотной вибрации корпуса судна, движущегося в сплошных ровных льдах, является создание математической модели для описания периодических усилий, связанных с разрушением и притапливание льда. Казалось бы, решение этой задачи не должно вызывать

каких-либо трудностей, т. к. изучением ледового сопротивления в этих условиях специалисты занимаются уже более века, со времен появления первых ледоколов. Тем не менее, это не так. В подавляющем большинстве исследований для расчета ледового сопротивления используются так называемые автономные математические модели, т. е. модели, в которых ледовые силы явно не зависят от времени [3]. В таких моделях обычно используется зависимость ледовых сил от скорости (например, см. [4]). Фактически это означает, что к ледовым силам применена процедура усреднения по некоторому характерному промежутку времени τ :

$$\bar{F}_l(v) = 1/\tau \cdot \int_0^\tau F_l(v, t) dt, \quad (1)$$

где F_l – ледовая сила;
 v – скорость движения судна;
 t – время.

Также почти все разработанные к настоящему времени методы расчета ледового сопротивления судна используют предположение о непрерывности контакта носовой оконечности со льдом. Другими словами в этих методах реальное взаимодействие корпуса со льдом, осуществляемое в определенных зонах контакта, «распределяется» по всей длине носовой оконечности.

Для расчета вибрации применение усредненных и «распределенных» по длине носовой оконечности значений ледовых сил $\bar{F}_l(v)$ не приемлемо. Для выполнения таких расчетов необходимо использовать результаты, получаемые при использовании неавтономных моделей для описания ледового сопротивления судна. Неавтономные модели ледового сопротивления развиваются относительно недавно. Их отличительной чертой является использование дифференциальных уравнений для описания процессов разрушения, поворота и притапливания льда корпусом судна. Кроме того, эти методы используют математическое описание картины разрушения ледяного поля, которая используется для определения точек контакта корпуса со льдом. Один из первых подобных методов описан в работе [5].

Непосредственное применение неавтономных математических моделей, базирующихся на решении дифференциальных уравнений движения, в расчетах вибрации не удобно. Поэтому для дальнейших расчетов был использован приближенный метод [3, 6], в котором введены аппроксимирующие результаты массовых расчетов по методу [5] математические соотношения, позволяющие аналитически описать

характер изменения во времени ледовой силы, действующей в каждой точке контакта корпуса со льдом. Нормальную силу, действующую со стороны льда на корпус ледокола, можно с достаточной точностью аппроксимировать зависимостью, представленной на рис. 2. Правомерность применения такой аппроксимации подтверждается натурными данными, полученными немецкими специалистами при проведении натуральных испытаний судна, в корпус которого был вмонтирован измерительный элемент, позволяющий определять действующую на него ледовую нагрузку. Эти данные приведены в работе [7].

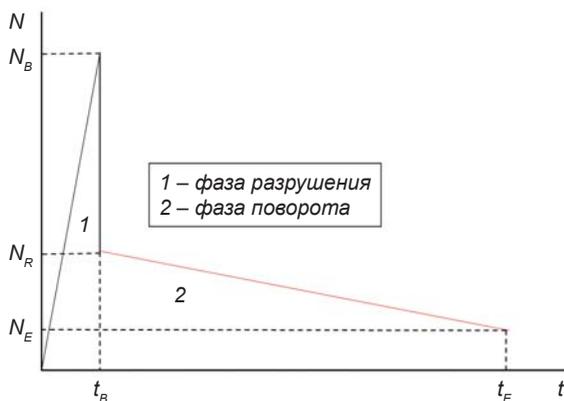


Рис. 2

Аппроксимация зависимости от времени нормальной к борту усилия, действующего в точке контакта со льдом:

N_B – максимальное значение нормальной силы при разрушении льда;
 t_B – момент времени, в который произошло разрушение льда;
 N_R – величина нормальной в момент начала поворота сектора;
 N_E – величина нормальной усилия в момент окончания поворота сектора;
 t_E – момент времени, в который заканчивается взаимодействие в данной точке контакта.

Нормальное к корпусу ледовое усилие, действующее в заданной точке контакта, может быть рассчитано следующим образом:

Число точек контакта корпуса со льдом определяется в соответствии с приводимым ниже математическим описанием картины разрушения льда. В этой модели соотношение между длиной l_c и шириной

сектора b_c льда не остается постоянным, а зависит от формы корпуса судна. Оно задается эмпирическим выражением и зависит от угла наклона ватерлинии к диаметральной плоскости в рассматриваемой точке контакта:

$$l_c / b_c = \operatorname{ctg} \alpha. \quad (2)$$

Зависимость ширины сектора и от числа Фруда и толщины льда на основании данных Э. Энквиста задается следующим выражением:

$$b_c = [1,462 / (Fn_h + 0,3)^{1,213} + 1] \sqrt[4]{h^3}, \quad (3)$$

где $Fn_h = v_z / \sqrt{gh}$ – число Фруда, вычисленное по толщине льда;
 v_z – скорость вертикального перемещения кромки льда $v_z = v_s \operatorname{tg} \varphi$, здесь
 v_s – скорость ледокола, φ – угол наклона батокса.

Все остальные параметры обломанного сектора льда можно вычислить, исходя из геометрических соображений.

Координаты точек контакта выступов ледового поля с корпусом определяются по теоретическому чертежу последовательно по мере вычисления параметров секторов предшествующего ряда по следующему алгоритму.

Пусть $y = f(x)$ есть уравнение действующей ватерлинии. При движении ледокола в сплошных льдах форштевень и прилегающие к нему районы борта не разрушают лед изгибом, а прорезают его. При этом образуется зона прорезания, ширина которой на один борт примерно равна h_j . Поэтому координата первой точки контакта может быть задана формулой

$$x = f^{-1}(y), \quad \text{где } y = h_j. \quad (4)$$

Для этой точки контакта рассчитываются геометрические параметры секторов по приведенным выше формулам. Координата следующей точки контакта определяется из выражения (4), в котором $y = h_j + b_{p1}$ – ширина первого ряда секторов. Расчет заканчивается при выполнении условия:

$$h_j + \sum_{i=1}^n b_{pi} \geq B/2, \quad (5)$$

где n – число рядов секторов;
 B – ширина судна.

Схематично картины разрушения ледяного покрова корпусом судна показаны на рис. 3.

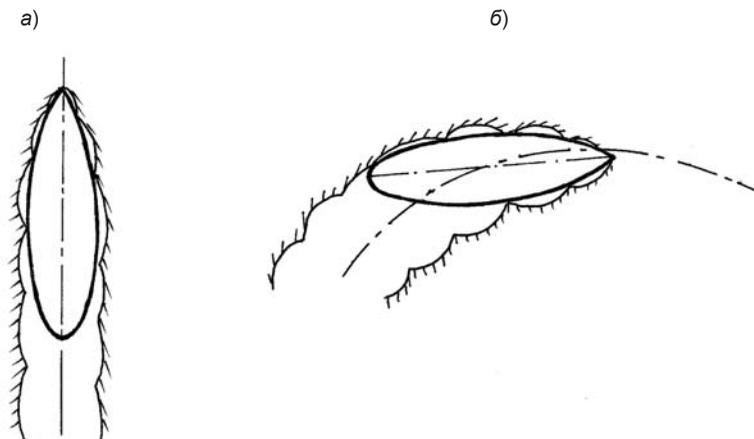


Рис. 3
Схемы разрушения корпусом судна сплошного ледяного покрова при прямолинейном (а) и криволинейном (б) движении

При движении судна по каналу, проложенному ледоколом, число точек контакта корпуса со льдом и их координаты определяются по тому же алгоритму. Отличие заключается в том, что формулу (4) необходимо записывать в следующем виде:

$$x = f^{-1}(y), \quad \text{где } y = B_c / 2, \quad (6)$$

где B_c – ширина канала за ледоколом.

Наблюдения за процессом движения судов в сплошных ровных льдах, выполненные как в натуральных, так и в модельных условиях показывают, что ледяной покров не разрушается корпусом одновременно на всю его ширину. Образование и поворот каждого ряда секторов происходит не одновременно, а с некоторым сдвигом по времени. Формула для расчета величины сдвига по времени между образованием двух соседних рядов секторов может быть записана следующим образом [8]:

$$T_{i+1} = \frac{f^{-1}(h) - f^{-1}(h + \sum_{p=1}^{n-1} b_{pi})}{v_s}; \quad (7)$$

где T_{i+1} – сдвиг фаз между началом выламывания i сектора и началом выламывания $i + 1$ сектора, начиная со второго;

$f^{-1}(h)$ – уравнение ватерлинии;

$f^{-1}(h + \sum_{p=1}^{n-1} b_{pi})$ – координаты выламываемых секторов.

Таким образом, зависимость нормальной ледовой силы N_i от времени, действующей в i точке контакта корпуса со льдом, может быть представлена следующей формулой:

$$N_i = f(t + T_i). \quad (8)$$

Суммирование усилий по всем точкам контакта с учетом сдвига фаз позволяет описать нестационарное воздействие льда на корпус судна, обусловленное неодновременностью разрушения и различной длительностью протекания физических процессов в каждой точке контакта.

Изложенная выше физическая модель взаимодействия корпуса со льдом позволяет легко учесть эффект «крупнотоннажности» перспективных судов активного ледового плавания. У таких судов, благодаря увеличению их ширины, существенно возрастает число точек контакта корпуса со льдом по сравнению с традиционными судами ледового плавания.

Изложенная выше методология была использована при определении возмущающих сил для расчетов низкочастотной вибрации корпуса перспективного крупнотоннажного судна класса **Arc4**. В качестве возмущающих сил рассматривались динамические реакции ледовой среды, возникающие при ломке изгибом льда корпусом судна. Такой характер разрушения льда возможен только при ограниченных углах наклона шпангоутов и ватерлиний носовой оконечности, характерных для ледокольной формы носа. Временные функции импульсов вертикальных составляющих сил взаимодействия носовой оконечности со льдом, вычисленные при низких значениях пределов прочности льда $\sigma_c = 1,5$ МПа, $\sigma_f = 0,4$ МПа, представлены на рис. 4 – 5.

Учитывая, что собственная частота вертикальных колебаний корпуса крупнотоннажного судна, в зависимости от загрузки, колеблется в пределах $0,7 \div 0,8$ Гц, можно заключить, что при принятых расчет-

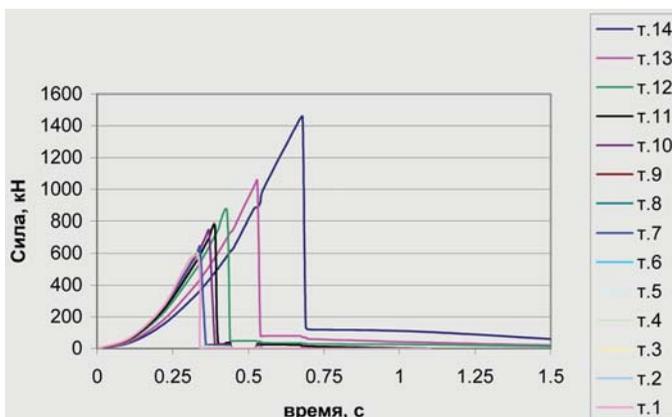


Рис. 4
Временная функция вертикальной силы, самостоятельное плавание

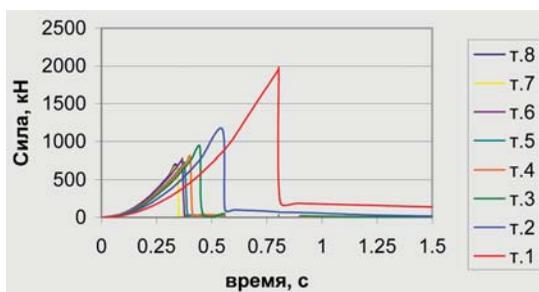


Рис. 5
Временная функция вертикальной силы, плавание в канале за ледоколом

ных сценариях длительность импульсов ледовых нагрузок составляет 0,5 – 1,0 периода собственных колебаний. Из имеющегося опыта наблюдений известно, что взаимодействие носовой оконечности со льдом обычно характеризуется последовательностью импульсов со случайным периодом возникновения, составляющим несколько секунд. Для рассматриваемого судна это будет составлять 4 – 5 периодов собственных колебаний. Ниже рассматривается реакция корпуса на временном

интервале 5 с на действие единичного импульса, в предположении, что в последующие периоды времени процесс будет повторяться.

Временные функции ускорения в трех точках корпуса, соответствующих пучностям формы 1-го тона (нос, мидель, транец), а также наверху надстройки, полученные в результате расчета на действие возмущающих сил, вызванных взаимодействием носовой оконечности со льдом, приведены на рис. 6 – 7.



Рис. 6
Временные функции ускорений корпуса при самостоятельном плавании

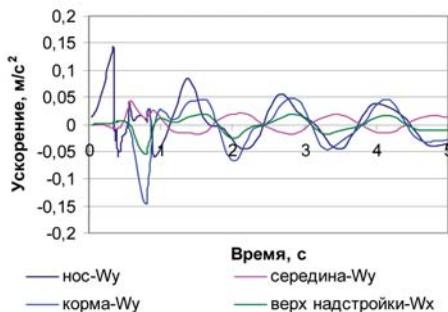


Рис. 7
Временные функции ускорений корпуса при плавании в канале за ледоколом

Из результатов расчета можно заключить, что уровни виброускорений корпуса, вызванные силами взаимодействия носовой оконечности корпуса со льдом, характеристики прочности которого приняты близкими к нижней границе, достигают соответственно 0,15 – 0,28 м/с². Частота 1 тона вертикальных собственных колебаний рассматриваемого судна, равная 0,7 ÷ 0,8 Гц, лежит ниже регламентируемого нормами РС диапазона частот (1 – 80 Гц). В связи с этим вопрос о допустимости рассматриваемой вибрации целесообразно рассмотреть с позиций стандартов ИСО. Для оценки общей вибрации корпуса можно использовать стандарт ИСО 6954-84. В соответствии с этим стандартом можно считать допустимой величину ускорения 0,285 м/с². С учетом выполненных оценок полученные в расчете уровни вибрации можно признать соответствующими стандарту ИСО на пределе допустимости. Следует подчеркнуть, что величины нагрузок, обусловленных взаимодействием носовой оконечности со льдом и, соответственно, вызванная ими вибрация напрямую зависят от прочности льда, формы носовой оконечности и режима движения. При увеличении прочностных характеристик ледовой среды уровни низкочастотной вибрации могут оказаться повышенными даже для судов категории **Arc4**. Для судов более высоких классов также следует ожидать увеличения вибрации.

Выводы

В работе предложена физическая модель взаимодействия корпуса крупнотоннажного судна со льдом при плавании в сплошном льду и в ледяном канале за ледоколом. На основании разработанной физической модели предложен метод расчета низкочастотной ходовой вибрации корпуса судна при движении его в ледовых условиях. Разработанный метод применен к анализу ходовой вибрации перспективного крупнотоннажного судна ледового плавания класса **Arc4**. Полученные результаты свидетельствуют о возможности широкого применения разработанной методики.

Список литературы

1. Карулин Е.Б., Карулина М.М., Беляшов В.А., Белов И.М. Оценка периодических нагрузок, действующих на гребной винт при взаимодействии со льдом // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – Вып. 31. – СПб., 2008. – С. 93 – 106.

2. Апполонов Е.М., Нестеров А.Б., Белов И.М. Научные аспекты проектирования корпусов крупнотоннажных арктических газовозов // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. – Вып. 39 (323). – 2008. – С. 29 – 44.

3. Сазонов К.Е. Ледовая управляемость судов. – СПб.: ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. 2006. – 252 с.

4. Ионов Б.П., Грамузов Е.М. Ледовая ходкость судов. – СПб.: Судостроение. – 2001. – 512 с.

5. Алексеев Ю.Н., Сазонов К.Е. Метод расчета сопротивления льда движению судов // Вопросы судостроения: сер. Проектирование судов. – Вып. 41. – 1984. – С. 28 – 36.

6. Сазонов К.Е. Упрощенный метод расчета ледового сопротивления судна, движущегося в сплошных льдах // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. – Вып. 8 (292). – 1998. – С. 68 – 71.

7. Valanto P. Numerical prediction of ice loads and resistance of ships advancing in level ice // Proc. of 6th Int. Conf. on Ships and Marine Structures in Cold Regions, ICET-ECH'2000, St. Petersburg, 2000, p. 215 – 230.

8. Дорохова Е.А., Сазонов К.Е. Исследование влияния асинхронности процессов разрушения и поворота льда на ледовое сопротивление // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. – Вып. 34 (318). – 2007. – С. 43 – 51.

УДК 627.747.33.034:621.791.053.08

А.В. Ильин, В.П. Леонов, В.Ю. Филин

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРА ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ *CTOD* ДЛЯ МЕТАЛЛА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ СУДОКОРПУСНЫХ СТАЛЕЙ ПРИ НИЗКИХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Введение

Требования к уровню деформационного критерия трещиностойкости – критическому раскрытию вершины трещины *CTOD* – содержатся в ряде нормативных документов, регламентирующих применение материала для сварных конструкций ответственного назначения. Для морских конструкций шельфа регламентация уровня критического *CTOD* (δ_{cr}) металла сварного соединения присутствует в стандартах CSA [1], BS [2], Правилах классификационных обществ [3, 4]. Наиболее развитая система нормирования этого параметра содержится в Правилах Российского морского регистра судоходства (РС) [5]. Последняя редакция этих Правил в разделе «Корпус» регламентирует случаи, когда испытания на *CTOD* оказываются необходимыми для определения возможности применения материала в данной толщине. Приблизительно нормы по *CTOD*, содержащиеся в [5], могут быть представлены формулой [6]

$$\delta_{cr} \geq \eta \sigma_Y S/E, \quad (1)$$

где σ_Y – предел текучести;
 E – модуль упругости;
 S – толщина элемента конструкции.

Значение коэффициента η для металла сварных соединений наиболее нагруженных элементов конструкций приблизительно равно 1,3...1,4.

Согласно стандарту [7] на подводные трубопроводы, для металла сварных соединений продольного (заводского) и монтажного сварных швов должно быть получено: $\delta_{cr} \geq 0,20$ мм. По нормам API регламентируется два уровня δ_{cr} , и невыполнение более высоких требований уровня 1 означает необходимость введения более жестких критериев допустимости дефектов в сварном шве.

Температура испытаний на $CTOD T_{II}$ во всех нормативных документах определяется как минимальная (расчетная) температура эксплуатации конструкции T_p . Всегда также присутствует требование, чтобы испытания проводились на образцах с толщиной, максимально приближенной к S .

Практически во всех зарубежных стандартах и спецификациях указывается, что методика проведения испытаний должна соответствовать стандарту BS 7448, р. 2 [8]. В большинстве случаев принимается, что количество испытанных образцов, отвечающих условиям корректности этого стандарта, должно быть не менее $3x$; а заданное значение δ_{cr} сопоставляется с минимальным значением, полученным при испытаниях.

Однако, наряду с этими общими требованиями к процедуре испытаний и оценке их результатов, имеются различные варианты их проведения, каждый из которых вполне допустим стандартом. На рис. 1 представлены различные предусматриваемые [8] варианты расположения надреза в сварном соединении: схемы рис. 1 а могут использоваться для испытаний металла ЗТВ, схемы рис. 1 б – металла шва. При расположении надреза, обеспечивающем распространение трещины вдоль направления сварки в вариантах I, II, IV рис. 1 а и I, IV рис. 1 б используется образец нетто-сечением $S \times 2S$ (размер $2S$ соответствует ширине W изгибного образца или расстоянию от линии действия нагрузки до тыльной поверхности образца на внецентренное растяжение W). Для вариантов III, V рис. 1 а и II, III рис. 1 б стандарт допускает испытания изгибных образцов квадратного сечения $S \times S$. Каждый из вариантов испытаний, по сути, имеет свое физическое содержание; например, при испытаниях металла шва по вариантам I, II рис. 1 б, различающихся направлением распространения разрушения, на фронте трещины присутствует металл различных валиков сварного шва, а при испытаниях по вариантам II, III рис. 1 б фактически испытывается материал одного валика. Варианты испытаний металла ЗТВ резко различаются возможным процентным содержанием локальных охрупченных структур на фронте исходной трещины.

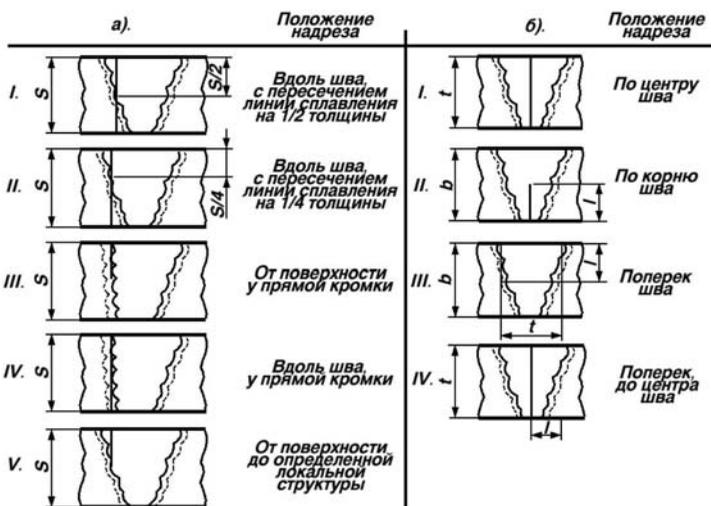


Рис. 1

Варианты расположения и ориентации надреза при испытаниях металла 3ТВ (а) и металла шва (б)

Выбор ориентации надреза или, по терминологии стандарта [8] «целевой зоны» (target zone), обычно оставляется на усмотрение заказчика испытаний или надзорного органа.

В тех случаях, когда целевая структура представляет собой тонкую прослойку, как например, крупнозернистая составляющая металла 3ТВ у линии сплавления, возникает дополнительная проблема определения критерия корректности результата испытаний по фактическому попаданию в нее фронта исходной усталостной трещины. Различные нормативные документы предлагают различные критерии (от 10 до 30 %), но часто также оставляют решение этого вопроса на усмотрение заказчика. Вопросы выбора типа образца, целевой структуры, необходимого ее содержания тесно связаны с постановкой задачи самих испытаний: следует ли при выборе методики исходить из необходимости моделировать при испытаниях ситуацию, позволяющую получить предельно низкие для данной температуры оценки, или же достаточно получать некие усредненные результаты?

Эти проблемы могут остаться незамеченными, если при температуре $T_{и}$ весь металл сварного соединения находится в полно-

стью вязком состоянии. Последнее вполне достижимо при величине $T_p = -10\text{ }^\circ\text{C}$, обычно назначаемой для морских конструкций незамерзающих водных бассейнов [2, 3]. По-видимому, накопленный за рубежом опыт подобных испытаний в основном ограничен этой ситуацией. Однако практика проведения испытаний на *CTOD* при расчетных температурах арктических и дальневосточных морей шельфа России ($T_{и} < -30\text{ }^\circ\text{C}$) приводит к достижению температур вязко-хрупкого перехода отдельных структурных составляющих сварного соединения даже для наиболее хладостойких сталей и сварочных материалов. Следствием этого является как большое рассеяние получаемых данных по *CTOD*, пример которого приведен на рис. 2, так и чувствительность результата испытаний к выбору методики их проведения.

В связи с изложенным выше оказывается особенно актуальным уточнение методики испытаний на *CTOD* металла для конструкций шельфа Арктики. В первую очередь необходимо рассмотрение следующих вопросов:

1. каким образом следует оценивать итог испытаний при большом разбросе получаемых данных;

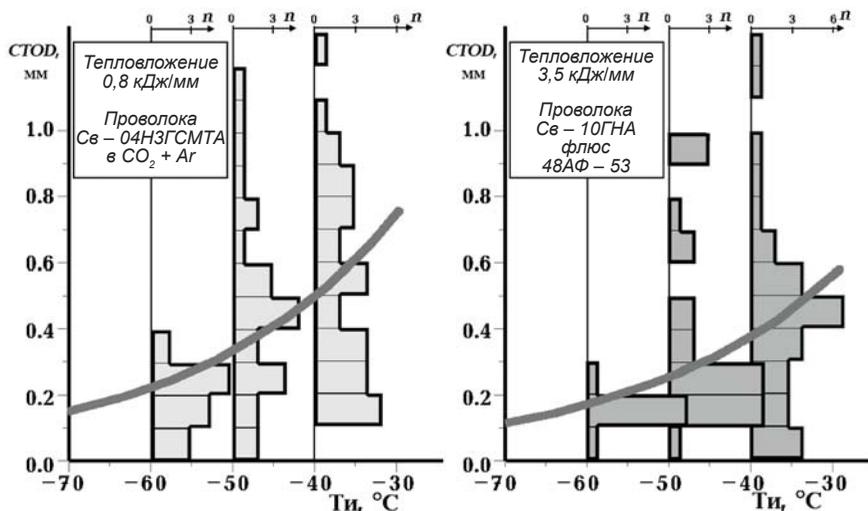


Рис. 2
Гистограммы результатов определения *CTOD* для металла сварного шва (n – количество испытанных образцов)

2. как выбрать критерий корректности испытания по фактическому % попадания в целевую структуру;

3. как различаются результаты испытаний металла сварного соединения в зависимости от выбора целевой структуры сварного соединения и типа образца.

Ниже представлены основные результаты исследований в данных направлениях и предложения по корректировке методик испытаний с учетом их конкретного назначения.

1 Анализ вероятности разрушения образцов из структурно-однородного и структурно-неоднородного материала

Наличие большого разброса данных по *CTOD* металла сварных соединений хладостойких низколегированных сталей в области температур $-30\text{ }^{\circ}\text{C} \dots -60\text{ }^{\circ}\text{C}$ заставляет прибегнуть к статистическим методам анализа результатов испытаний. Предварительно необходимо отметить, что для этого температурного диапазона могут быть характерны три типа разрушения (рис. 3):

наиболее низкотемпературный (III) – когда наблюдается срыв диаграммы деформирования образца, т. е. нестабильное разрушение с полностью кристаллическим характером излома (по стандарту [8] такое событие обозначается индексом «С»);

среднетемпературный (II) – когда нестабильному хрупкому разрушению предшествует стабильный рост трещины по вязкому механизму (событие «U» по [8]);

высокотемпературный (I) – когда до достижения максимума нагрузки хрупкие разрушения не наблюдаются.

В последнем случае, согласно [8], в качестве критического события рассматривается достижение максимума нагрузки (событие «M»). Величина δ_{cr} обозначается, соответственно, δ_c , δ_u , δ_m , в зависимости от типа разрушения.

Известные литературные данные по анализу функций вероятности разрушения образцов при испытаниях на трещиностойкость относятся к разрушениям типа «С» структурно-однородного металла и описывают результаты определения параметра трещиностойкости K_{1c} или его эквивалента, определяемого по экспериментально найденному критическому значению *J*-интеграла (K_{Jc}). Для этого принято трехпараметрическое распределение Вейбулла [9]

$$F = 1 - \exp\left\{-\left[\frac{K_{1c} - K_{\min}}{K_0 - K_{\min}}\right]^b\right\}, \quad (2)$$

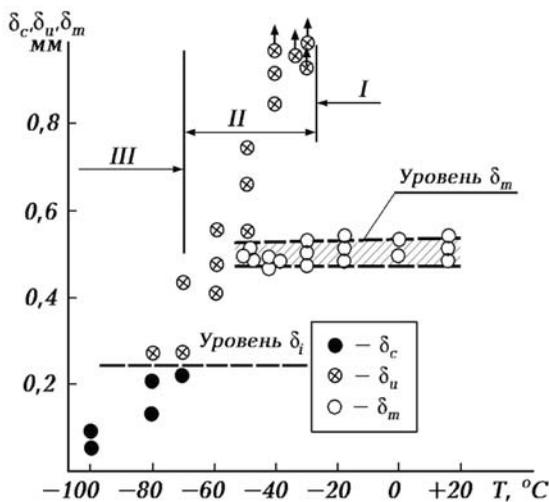


Рис. 3
Температурные диапазоны (I, II, III) различных типов разрушения, сталь E36 после термического улучшения

где F – интегральная вероятность разрушения образца;
 b, K_0 – параметр формы и масштаба распределения;
 K_{\min} – минимальное значение K_{1c} , принимаемое равным трещиностойкости «нижнего шельфа», $K_{\min} = 20 \text{ МПа} \sqrt{\text{М}}$.

Данная формула теоретически обосновывается предположением о связи вероятности разрушения с объемом «зоны процесса» в вершине трещины, пропорциональным K_{1c}^4 , тогда $b = 4$ [10]. Переходя к параметру $CTOD$ и учитывая, что $\delta_{cr} \sim K_{1c}^2$, а интересующие уровни δ_{cr} значительно превышают уровень «нижнего шельфа» (для судокорпусных сталей указанной величине K_{\min} соответствует δ_{cr} не более 0,002 мм), из (2) получим

$$F = 1 - \exp[-(\delta_{cr} / \delta_0)]^2, \quad (3)$$

где δ_0 – параметр масштаба.

Для структурно-неоднородного металла сварных соединений аналогичные данные отсутствуют. Более того, неясна применимость фор-

мулы (3) для ситуаций, когда могут одновременно регистрироваться разрушения типов «С», «U» и «M».

Для исследования распределений вероятности разрушения судокорпусных гомогенных и гетерогенных материалов в области вязкохрупкого перехода при различных типах разрушения были проведены испытания образцов из стали E36W (использовались образцы на внецентренное растяжение, СТ) толщиной 30 мм. Также были обработаны результаты сертификационных испытаний металла сварных соединений этой стали (образцы SENB толщиной 40...50 мм). Характеристики материалов приведены в работе [11]. Для основного металла испытано по 12 образцов: при температуре 0 °С, когда все разрушения соответствовали типу «M»; при -60 °С, когда 50 % образцов разрушились по типу «U», а остальные по типу «С»; при -100 °С, когда все разрушения соответствовали типу «С». На первом этапе анализа обработка полученных данных проводилась в предположении о том, что интегральная функция вероятности имеет вид функции Вейбулла с неизвестными коэффициентами b, δ_0

$$F = 1 - \exp[-(\delta_{cr}/\delta_0)^b]. \quad (5)$$

Для определения этих коэффициентов был применен метод наибольшего правдоподобия [12]. В данном случае он осуществляется поиском максимума функции $\ln L$, L определяется как

$$L = (bN/\delta_0^N) \exp[-\sum_{i=1}^N (\delta_{cr,i}^b/\delta_0^b)] \prod_{i=1}^N [(\delta_{cr,i}/\delta_0)^{b-1}], \quad (6)$$

где $(\delta_{cr,i})$ – результат i -ого замера трещиностойкости;
 N – число испытаний.

При двух неизвестных параметрах распределения этот максимум соответствует одновременному выполнению условий: $\partial \ln L / \partial b = 0$, $\partial \ln L / \partial \delta_0 = 0$, и искомые значения b, δ_0 являются корнями системы двух уравнений:

$$(N/b) + \sum_{i=1}^N \ln(\delta_0) - (N/b) \ln \left[\sum_{i=1}^N (\delta_{cr,i}^b / N) \right] = 0, \quad \delta_0 = \left[\sum_{i=1}^N (\delta_{cr,i}^b / N) \right]^{1/b}. \quad (7)$$

Результаты расчета параметров b, δ_0 по этому алгоритму представлены в табл. 1 вместе со значениями $CTOD$, соответствующими математическому ожиданию $\delta_{cr 50\%}$ и 5 % вероятности разрушения ($\delta_{cr 5\%}$). Получены значения b , существенно превышающие 2,0 и возрастающие с увеличением среднего уровня трещиностойкости.

Параметры распределения трещиностойкости.
Основной металл, сталь E36W, 30 мм.

Температура, °С	b	δ_0 , мм	δ_{cr50} %, мм	δ_{cr5} %, мм
0	6,20	1,64	1,62	1,016
-60	3,14	0,56	0,54	0,217
-100	2,29	0,112	0,108	0,031

Поскольку физический смысл данного результата сомнителен, можно предположить, что он связан с немотивированным предположением о равенстве нулю минимальной трещиностойкости δ_{\min} при любых температурах испытаний. Поэтому был применен второй вариант анализа: поиск значений δ_0 , δ_{\min} для трехпараметрического распределения Вейбулла с фиксированным значением параметра формы $b = 2,0$:

$$F = 1 - \exp \left\{ - \left[\frac{\delta - \delta_{\min}}{\delta_0 - \delta_{\min}} \right]^2 \right\}. \quad (8)$$

Для этого экспериментальные данные представлялись в системе координат « $\delta_{cr} - [-\ln(1 - F_{\delta i})]^{0,5}$ », где $F_{\delta i}$ – накопленная интегральная вероятность разрушения для величины $CTOD$ ($\delta_{cr i}$), зарегистрированной в i -ом из N испытаний (при проведении нумерации испытаний в порядке возрастания результата). Значения $F_{\delta i}$ определены по формуле

$$F_{\delta i} = (i - 0,3) / (N + 0,4). \quad (9)$$

Получено, что для основного металла эти зависимости, действительно, могут считаться линейными в указанных координатах (линии 1, 2, 3 на рис. 4), то есть $b \approx 2$. Значения δ_{\min} при такой обработке, определенные из условия $F_{\delta} = 0$, равны: 0,011 мм при -100 °С; 0,081 мм при -60 °С; 0,855 мм при 0 °С.

На рис. 4 представлены также результаты аналогичной обработки массива данных по $CTOD$, полученных при испытаниях металла крупнозернистой составляющей ЗТВ шва с К-образной разделкой (кривая 4), а также металла сварного шва и металла сварного соединения при разметке надреза по типу II (рис. 1 а). В последнем случае на фронте трещины одновременно присутствуют различные структурные составляющие металла различной трещиностойкости. Во всех случаях, за исключением данных по трещиностойкости металла ЗТВ, предположение о том, что $b = 2$, выглядит приемлемым.

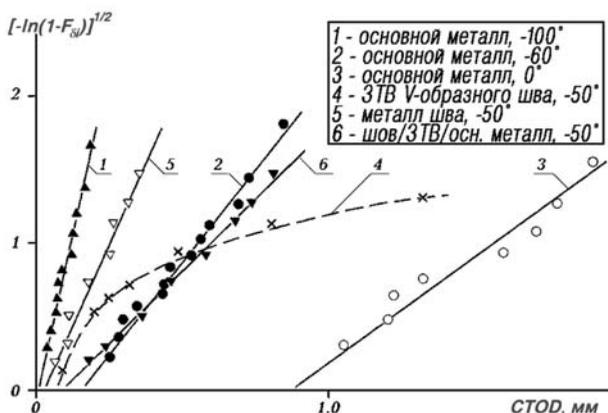


Рис. 4

Обработка массивов данных по $CTOD$ в предположении: $b = 2,0$

Можно предположить, что выявленная аномалия связана не со структурной неоднородностью материала (которая присутствует как в металле шва, так и в образцах с трещиной, пересекающей все структурные зоны), а со специфической особенностью проведения испытаний на свариваемость, когда плоскость трещины приблизительно совпадает с плоскостью расположения тонкой охрупченной прослойки. В этом случае площадь сечения «зоны процесса» пропорциональна δ , а не δ^2 (как для структурно-однородного материала) и значение параметра b должно быть близко к 1 (рис. 5).

Этот вывод подтверждается результатами обработки данных по $CTOD$ металла ЗТВ, полученных при температуре -40 °С, по формулам (5) – (7); рис. 6. Для наиболее критичной структуры у линии сплавления (ЛС) величина b действительно близка к 1, особенно при сварке с высокой погонной энергией (3,5 кДж/мм), приводящей к наибольшему росту зерна. Для удаленного от линии сплавления металла ЗТВ величина b приближается к 2.

Полученные результаты позволяют также заключить, что испытания всего трех образцов при низких температурах не могут дать достоверной информации о фактической трещиностойкости материала. Такой объем данных может быть достаточным, если все образцы разрушились по типу «М» и есть уверенность в том, что значение δ_{\min} близко к требуемому значению $CTOD$. Но в области вязко-хрупкого

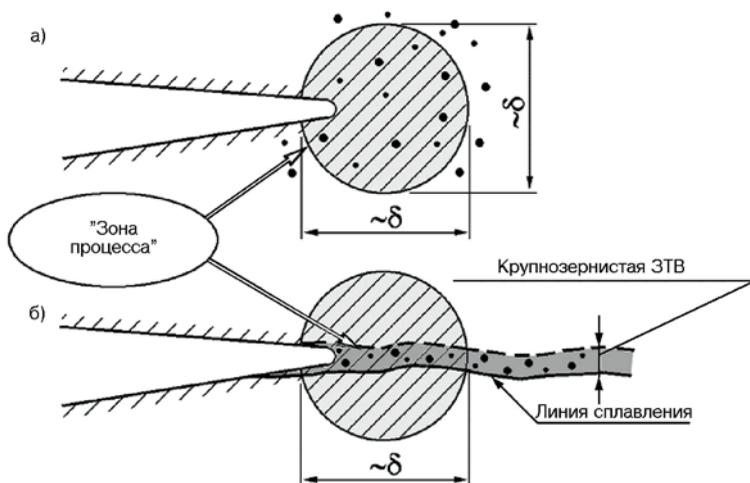


Рис. 5

Различие связи раскрытия трещины с площадью сечения зоны процесса в структурно-однородном материале (а) и при наличии тонкой хрупкой прослойки (б)

перехода необходим статистически представительный объем информации (как минимум, 7 образцов, как это требует стандарт [9]) и последующая статистическая обработка результатов для получения па-

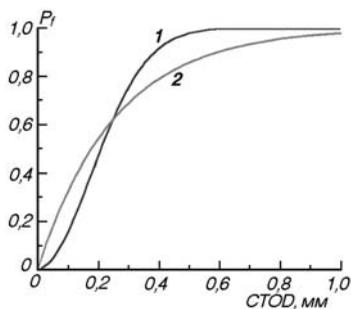


Рис. 6

Пример аппроксимации накопленной интегральной вероятности разрушения зависимостью (5) при $b=2$ (кривая 1) и $b=1$ (кривая 2)

раметров распределений вероятности разрушения и оценок по ним доверительной вероятности разрушения.

2 Влияние содержания охрупченной структурной составляющей на фронте трещины на результат испытаний

Практика испытаний по программам РС показывает, что при определении трещиностойкости крупнозернистой составляющей ЗТВ у линии сплавления достижение более 30 % этой «целевой структуры» на фронте трещины осуществимо только на отдельных образцах. В среднем ее содержание, как правило, не превышает 17 %. В то же время в литературе имеются данные, свидетельствующие о достаточности 10 % крупнозернистой составляющей ЗТВ для получения консервативного результата – показано, что дальнейшее возрастание ее содержания не приводит к снижению *CTOD* [13]. Стремление разместить фронт трещины как можно ближе к линии сплавления влечет за собой увеличение доли литой структуры металла шва в зоне разрушения, а эта структура часто оказывается еще более критической. Аналогичная задача определения представительности результата испытаний по содержанию наиболее хрупкой составляющей возникает и при испытаниях металла шва, когда такой структурой может быть неперекристаллизованная дендритная составляющая или зона корневого прохода.

Для исследования влияния содержания охрупченной структуры на фронте трещины на результат определения *CTOD* был выполнен анализ массива данных, содержащего около 200 результатов испытаний сварных соединений стали E36-E40Z, полученных при $-40...-50$ °C. Массив был разбит на выборки с суммарным содержанием крупнозернистой структурной составляющей z/S (z – общая протяженность этой структуры) от 0 до 5 %, от 5 до 10 % и т. д. В каждой выборке содержалось не менее 10 образцов. Содержание отдельных структур определено металлографическим анализом в соответствии со стандартом [8]. Произведено два варианта разбиения на выборки:

по суммарному содержанию крупнозернистой составляющей ЗТВ и металла шва; и

только по содержанию крупнозернистой составляющей при исключении из рассмотрения образцов с участками металла шва на фронте трещины.

На рис. 7 точками представлены результаты определения среднего *CTOD* для каждой из выборок.

Для обоих видов обработки показана тенденция к резкому снижению регистрируемой трещиностойкости при возрастании доли критической составляющей до 10...20 %, однако далее характер зависимостей различен. Для выборок «ЗТВ + шов» результаты продолжают снижаться, что подтверждается данными для 100 % металла шва. Для выборок, в которых из рассмотрения исключены образцы с наличием металла шва на фронте трещины, подобного вывода сделать нельзя из-за отсутствия образцов с содержанием крупнозернистой составляющей более 30 %. Можно лишь отметить, что средние значения $CTOD$ при $z/S > 0,15$ не уменьшаются.

Для теоретического прогнозирования данных зависимостей может быть использован известный подход, основанный на концепции «слабого звена», когда разрушение рассматривается как реализация случайного события. При упрощенном представлении материала как состоящего из хрупкой и вязкой составляющих интегральная вероятность разрушения P определяется формулой

$$P = P_A + P_B - P_A P_B, \quad (10)$$

где P_A – вероятность разрушения хрупкой составляющей протяженностью z ;
 P_B – вероятность разрушения вязкой составляющей протяженностью $(S - z)$;
 S – длина фронта трещины (толщина образца).

Из формулы (10) и представления функций P_A, P_B распределением Вейбулла (3) следует:

$$\delta_{0z} = (S \delta_{01} \delta_{02}) / [\delta_{02} z + \delta_{01} (S - z)] \quad \text{при } b = 1, \quad (11)$$

$$\delta_{0z} = (\delta_{01} \delta_{02} \sqrt{t}) / [\sqrt{\delta_{02}^2 z + \delta_{01}^2 (t - z)}] \quad \text{при } b = 2, \quad (12)$$

где $\delta_{01}, \delta_{02}, \delta_{0z}$ – параметры масштаба распределений $CTOD$ для хрупкой и вязкой составляющих по отдельности и интегральный параметр масштаба для структурно-разнородного материала, соответственно (при $b = 1$ они равны средним значениям, а при $b = 2$ – близки к ним).

Обе формулы предсказывают монотонное снижение δ_{0z} при возрастании z/S , и вывод о достаточности $z/S > 0,15$ из них не следует.

Сопоставление прогноза по формуле (11) (кривая на рис. 7) с экспериментальными результатами затруднено неоднозначностью их интерпретации в связи с наличием двух критических структур и

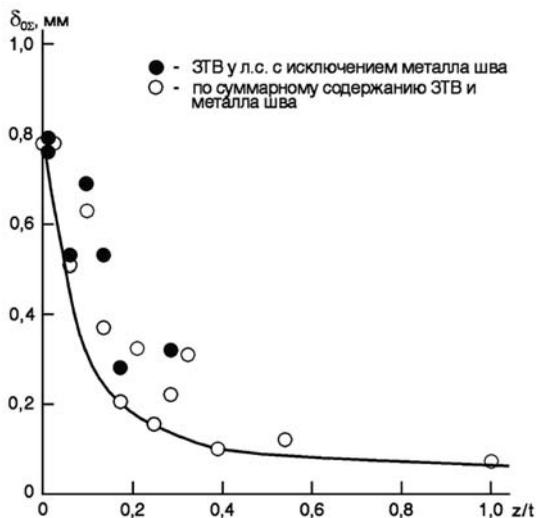


Рис. 7

Зависимость среднего *CTOD* от содержания крупнозернистой составляющей ЗТВ на фронте трещины

невозможностью получения 100 % попадания в крупнозернистую составляющую ЗТВ, не попадая в металл шва. В связи с этим были проведены испытания специальных образцов с регулируемым содержанием охрупченной составляющей на фронте трещины. Толщина образцов составляла 45 мм. Сварку проб выполняли покрытыми электродами УОНИИ 13/45 в два этапа: сначала заполняли углубление разделки в одной из кромок, затем собирали пробу. Вид полученного сварного соединения показан на рис. 8. В качестве основного материала использовалась сталь марки E36W, выбранная температура проведения испытаний $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ соответствовала полностью вязкому состоянию основного металла и достаточно хрупкому состоянию металла шва (зарегистрированы корректные значения $K_{Ic} = 57...65\text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$, что соответствует $\delta_{cr} = 0,017\text{ мм}$). Металл крупнозернистой составляющей ЗТВ при этой температуре имел среднее значение *CTOD* = 0,33 мм. Полученные экспериментальные данные приводятся на рис. 8. Как и для крупнозернистой составляющей ЗТВ, зарегистрирована весьма слабая их зависимость от z/S при $z/S > 0,1...0,2$.

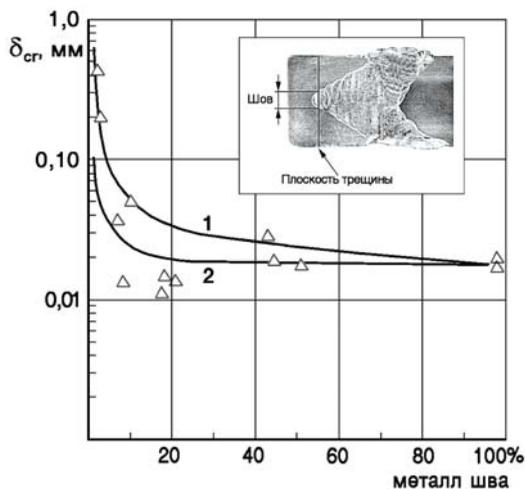


Рис. 8

Зависимость $CTOD$ от содержания хрупкой структуры на фронте трещины, специальные образцы. Кривая 1 – расчетная оценка по формуле (12), кривая 2 – прогноз по отношению G/G_z

В данном случае для теоретических оценок в полной мере может быть применена формула (12), при этом может быть принято: $\delta_{01} \ll \delta_{02}$, и тогда зависимость $CTOD$ от z/S должна иметь вид: $\delta_{cr} = \delta_{01} / \sqrt{z/S}$. И в этом случае теоретическая зависимость (кривая 1 на рис. 8) не предсказывает столь сильного влияния доли хрупкой структуры при малых значениях z/S и столь слабого при больших значениях.

На рис. 9 приведены результаты испытаний на $CTOD$ металла монтажных сварных швов магистрального трубопровода из стали категории X70, выполненного ручной многопроходной сваркой материалами фирмы Lincoln Electric при -10°C ; толщина образцов 15 мм. Полученные значения $CTOD$ сопоставляются с содержанием неперекристаллизованной дендритной структуры на фронте трещины, установленным металлографическим анализом по методике [8]. При большом разбросе данных также наблюдается тенденция к независимости результата испытаний от z/S при $z/S > 0,15$. В других сериях испытаний металла шва достаточно достоверно подтверждается факт отсутствия связи получаемого результата с содержанием дендритной структуры в диапазоне от 30 до 80 %.

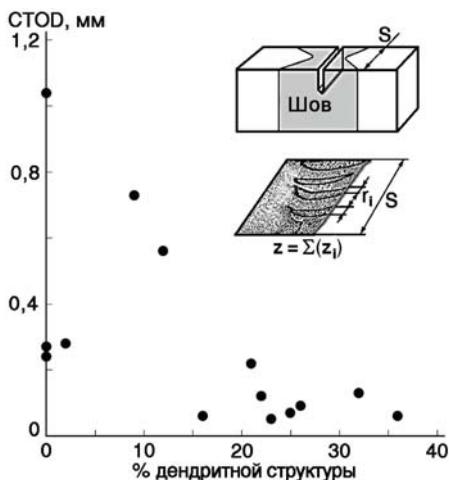


Рис. 9

Связь значений $CTOD$ с содержанием дендритной структуры металла шва на фронте трещины

В качестве альтернативной модели, объясняющей наблюдаемый характер влияния содержания хрупкой структуры на результат испытаний, может быть предложено следствие из энергетического подхода, примененного авторами ранее при анализе влияния конфигурации и размеров образца на измеряемую трещиностойкость [14]. Численными расчетами МКЭ была получена связь интенсивности высвобождаемой при продвижении трещины упругой энергии G , входящей в условие неустойчивого хрупкого разрушения, с относительной протяженностью участка хрупкой составляющей, на котором предполагается старт трещины. Величина $G = G_z$ в данном случае определялась решением МКЭ с использованием объемных элементов как отношение изменения потенциальной энергии тела к площади предполагаемого подраста трещины. Получено, что отношение значений G , найденных для двумерной задачи, когда предполагается продвижение трещины на всем ее фронте, к величине G_z является функцией от z/S , существенно отличающейся от 1 лишь при $z/S < 0,15$. Введение численно определенной функции $G/G_z = f(z/S)$ в предложенное условие хрупкого разрушения [14] позволило получить зависимость, близкую к наблюдаемой для модельного эксперимента (кривая 2 на рис. 8).

Окончательное заключение о достоверности предсказаний по той или иной модели требует дальнейших исследований. Основное различие следствий их применения состоит в том, что с позиций гипотезы слабого звена фактором, определяющим трещиностойкость, является суммарное количество хрупкой составляющей вне зависимости от характера ее распределения по фронту трещины. В то же время с позиций энергетического подхода трещиностойкость связана с протяженностью сплошного участка слабой структуры, но не с суммарной ее длиной.

3 Влияние выбора целевой структуры сварного соединения и ориентации направления распространения трещины на результаты испытаний

В соответствии с Программами Регистра и требованиями ряда стандартов [2, 3] при аттестации листового проката «на свариваемость» для определения трещиностойкости металла ЗТВ применяются образцы типа IV (рис. 1 а) сечением $S \times 2S$ с прямой кромкой шва и разметкой надреза по двум целевым структурам: крупнозернистой составляющей ЗТВ у ЛС и зоной неполной перекристаллизации на границе сплавления «ЗТВ – основной металл» (дальняя зона – ДЗ). Выполненный к настоящему времени большой объем испытаний современных судокорпусных сталей марок E36, F36, E40, F40 повышенной свариваемости (W) позволяет подвести некоторые итоги этих испытаний.

При испытаниях основного металла требуемые в соответствии с (1) значения $CTOD$, как правило, выполняются до температур $-60...-80$ °С. Для металла ЗТВ можно утверждать, что требования Правил [5] при $T_{и} < -(30...40)$ °С выполняются лишь с определенной вероятностью, большей или меньшей, в зависимости не только от качества сталей, но и в гораздо большей степени – от технологических параметров сварочного процесса. В табл. 2 представлены параметры распределения вероятности разрушения образцов с ориентацией трещины по указанным двум целевым структурам при температуре испытаний -40 °С, вырезанных из сталей различного способа производства и сваренных при двух крайних значениях погонной энергии: минимальной (0,8 кДж/мм), и максимальной (3,5 кДж/мм). Приведены также значения $CTOD$, соответствующие 10 % вероятности разрушения, рассчитанной по найденным параметрам распределений.

Таблица 2

**Параметры распределения *CTOD* металла ЗТВ стали марки Е36W,
толщина образцов 30–40 мм, температура испытаний –40 °С.**

Способ производства проката	Целевая структура	Погонная энергия сварки, кДж/мм	Параметры распределения		<i>CTOD</i> , 10 % вероятность разрушения, мм
			<i>b</i>	δ_{co} , мм	
Нормализация	ЛС	0,8	1,44	0,420	0,10
		3,5	1,07	0,376	0,04
	ДЗ	0,8	1,59	0,534	0,16
		3,5	1,84	0,677	0,22
ТМО	ЛС	0,8	2,03	0,512	0,10
		3,5	1,15	0,388	0,06
	ДЗ	0,8	1,14	0,621	0,11
		3,5	1,18	0,750	0,13
Закалка + отпуск	ЛС	0,8	1,36	0,413	0,10
		3,5	0,96	0,413	0,04
	ДЗ	0,8	2,03	0,922	0,11
		3,5	1,80	0,660	0,13

Получено, что основным фактором, влияющим на трещиностойкость ЗТВ, является величина тепловложения при сварке, а наиболее критичным по возможности реализации хрупких разрушений – металл у линии сплавления. Это, в первую очередь, связано с наличием крупнозернистой структуры: регистрируется 6 – 7 балл зерна с фрагментами видманштеттовой структуры. Результаты металлографических исследований не свидетельствуют о каких-либо различиях размеров зерна непосредственно у линии сплавления при высоком (3,5 кДж/мм) и низком (менее 1 кДж/мм) тепловложении. По-видимому, пониженная трещиностойкость в первом случае связана лишь с возрастанием ширины крупнозернистого слоя. По результатам испытаний стали марки Е36W зона неполной перекристаллизации не выделяется пониженной трещиностойкостью.

Способ термообработки основного металла существенно не отражается на результатах испытаний металла ЗТВ.

Необходимо также отметить тот факт, что при погонной энергии сварки 3,5 кДж/мм требования по *CTOD* Правил [5], представляемые формулой (1), для металла ЗТВ у линии сплавления при –40 °С не выполняются с вероятностью, существенно превышающей 10 %.

Следствием этого является необходимость проведения проверочных оценок прочности по критерию предотвращения хрупких разрушений в подобных ситуациях [15], а также желательность ограничивать величину тепловложения при сварке конструкций хладостойкого исполнения.

Эффективность ограничения погонной энергии сварки подтверждается результатами испытаний, показывающими, что зависимость *CTOD* от этой величины не является монотонной, рис. 10. Для поиска оптимального режима сварки необходимы дальнейшие исследования, поскольку наличие максимума зависимости свидетельствует о воздействии, по крайней мере, двух факторов: толщины зоны охрупченной прослойки и доли содержания участков ЗТВ с неоднократным термическим воздействием при последовательном наложении сварочных проходов.

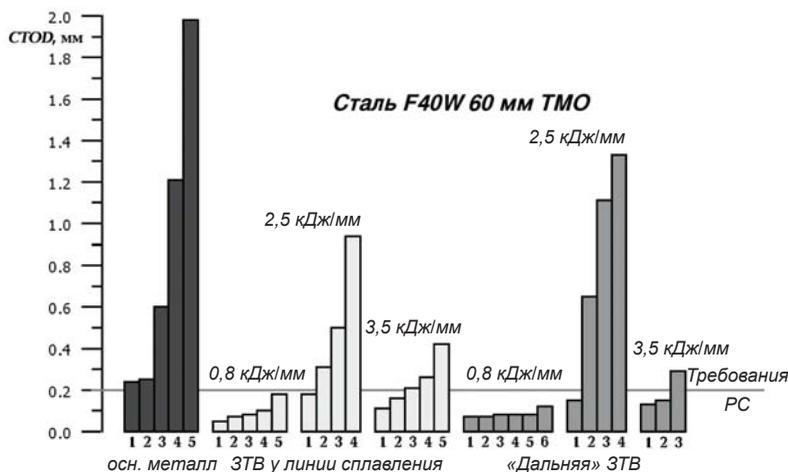


Рис. 10
Влияние погонной энергии сварки на результаты определения *CTOD* металла ЗТВ

Достижение требуемого по формуле (1) уровня *CTOD* при выборе в качестве целевой структуры металла сварного шва при температурах ниже $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ является не менее сложной технологической задачей, чем для металла ЗТВ. На рис. 11 представлены обобщен-

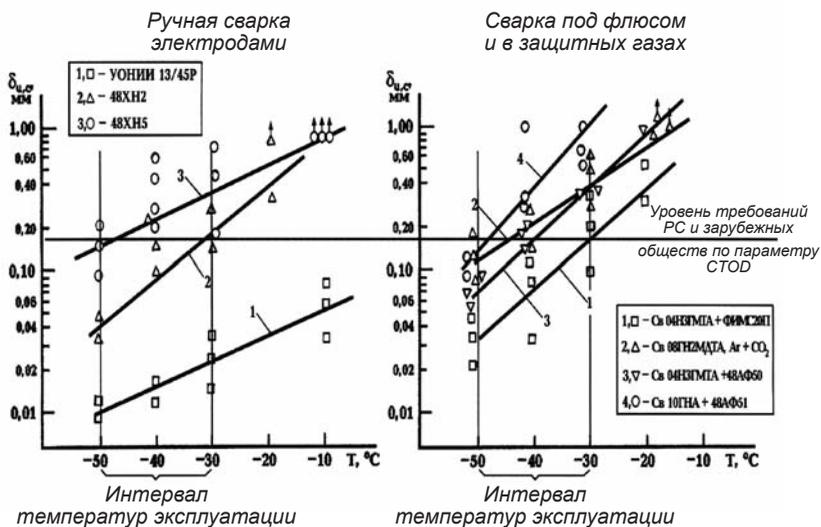


Рис. 11
Трещиностойкость металла шва, выполненного сварочными материалами для морских сооружений

ные результаты испытаний образцов $S \times 2S$ с разметкой надреза по типу I (рис. 1 б) толщиной сварного соединения 35...40 мм, выполненных ручной, полуавтоматической в защитных газах и автоматической сваркой под флюсом. Для достижения высоких показателей трещиностойкости при этих температурах необходимо применение никельсодержащих материалов, при полуавтоматической сварке – использования газовой защиты смесью $CO_2 + Ar$, при автоматической сварке – агломерированных флюсов высокой основности, позволяющих вводить модификаторы в сварочную ванну.

Как показывают данные рис. 9, здесь также необходимо снижение погонной энергии сварки q для снижения содержания дендритной структуры: поскольку площадь сечения шва в отдельном проходе пропорциональна q , а площадь ЗТВ этого прохода пропорциональна \sqrt{q} , то отношение площади перекристаллизованной структуры к площади шва $\sim 1/\sqrt{q}$, то есть увеличивается со снижением q .

Рассмотренные выше результаты относятся к типам образцов, наименее благоприятным по ориентации надреза и содержанию критической структуры. Исходя из полученных соображений по влиянию

доли хрупкой составляющей на фронте трещины, образцы типа I и II (рис. 1 а), часто рассматриваемые как характеризующие трещиностойкость металла у линии сплавления, явно должны показывать более высокие значения $CTOD$. То же заранее можно утверждать и относительно сопоставления результатов испытаний образцов типа I и типов III, IV (рис. 1 б), в которых трещина распространяется перпендикулярно направлению кристаллизации металла шва. По-видимому, из-за этого в технической литературе отсутствуют упоминания об использовании образцов этих типов. Но часто для определения трещиностойкости металла ЗТВ и металла шва используются образцы с надрезом от поверхности: тип IV (рис. 1 а) и тип II (рис. 1 б), соответственно. Аргументацией для выбора образцов таких типов является утверждение, что именно они наиболее приближены к реальной ситуации распространения трещины от протяженного дефекта в сварной конструкции.

Переходя к сопоставлению результатов испытаний образцов с распространением трещины вдоль и поперек шва, необходимо отметить, что эти образцы, прежде всего, различаются сечениями ($S \times 2S$ и $S \times S$, соответственно). Согласно результатам, полученным авторами для гомогенного металла, образцы сечением $S \times S$ систематически показывают более высокие значения трещиностойкости. В рамках предложенного в [14] энергетического условия нестабильного хрупкого разрушения этот факт является следствием различия упругой составляющей J -интеграла (J_{el}) для образцов обоих сечений, соответствующих одному и тому же значению J , или раскрытия трещины δ . Получено, что максимальные различия δ_{cr} между результатами испытаний образцов сечением $S \times 2S$ и $S \times S$ соответствуют температурному сдвигу ~ 15 °С.

При испытаниях образцов с надрезом по металлу шва различие ориентации надреза должно приводить к еще большим изменениям их результатов из-за неоднородности структуры нетермообработанного литого металла в направлениях вдоль и поперек направления сварки. Для оценки этих различий были выполнены испытания образцов прямоугольного ($S \times 2S$) и квадратного ($S \times S$) сечений; для отделения эффекта влияния геометрии от ориентационного фактора образцы квадратного сечения испытывались при двух ориентациях надреза. Заготовка под образцы из стали марки E36W толщиной 40 мм была сварена автоматической сваркой проволокой 10ГНА под флюсом 48АФ-51 с оптимальным тепловложением (2...2,5 кДж/мм). Разделка X-образная, надрез на образцах размечали по центру сварного шва. Сварные соединения, выполненные данным технологическим процес-

сом, сертифицированы РС на температурную категорию 5 ($-60\text{ }^{\circ}\text{C}$). Изготовлено по 6 стандартных образцов $S \times 2S$ (плоскость надреза перпендикулярна поверхности, направление разрушения вдоль шва, серия 1), $S \times S$ (плоскость надреза перпендикулярна поверхности, направление разрушения вдоль шва, серия 2) и $S \times S$ (надрез от поверхности, серия 3). Результаты испытаний при $T = -50\text{ }^{\circ}\text{C}$ представлены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты испытания металла сварного шва 10ГНА + 48АФ51

Серия, направление разрушения	Критическое событие	Стабильный подрост трещины, мм	$CTOD$, мм	J_{cr} , Н/мм	J_{gr} , Н/мм	Примечание
1, $S \times 2S$ Вдоль шва	С	0	0,12	81,7	69,3	
	С	0	0,05	40,8	39,2	
	С	0	0,05	41,9	40,4	
	С	0	0,02	20,2	20,1	корректное K_{Ic}
	С	0	0,06	53,4	50,5	
	С	0	0,12	82,2	69,8	
2, $S \times S$ Вдоль шва	С	0,15	0,19	130,9	62,7	
	С	0,10	0,15	104,6	58,0	
	С	0	0,05	42,9	38,3	
	С	0,10	0,15	102,3	58,0	
	С	0	0,03	31,4	29,2	
	С	0,09	0,09	71,0	49,5	
3, $S \times S$ Поперек шва	С	0,10	0,10	76,4	53,6	дендритная структура у вершины
	М	0,94	0,26	173,2	70,0	перекрист. структура
	М	1,00	0,18	143,9	75,5	перекрист. структура
	С	0,05	0,11	87,9	58,4	дендритная структура у вершины
	М	4,00	0,24	164,9	63,5	перекрист. структура
	U	0,58	0,25	182,3	70,1	перекрист. структура

Получено, что для металла шва в равной степени значимыми являются оба фактора – как изменение геометрии образца, так и изменение направления распространения трещины. Эффект влияния размеров сечения образца оказался аналогичным полученному для основного металла. Он выявляется при сопоставлении средних значений *CTOD* для образцов серий 1 и 2 (0,07 и 0,11 мм, соответственно). Ориентационный фактор выражается в том, что при многопроходной сварке образцы с направлением распространения разрушения вдоль шва имеют на фронте трещины как участки с дендритным строением, так и участки перекристаллизованной структуры. В то же время образцы с направлением распространения разрушения поперек шва могут иметь на фронте трещины как полностью дендритную структуру (как показано выше, результат испытаний практически одинаков и при 20 %, и при 100 % ее содержании), так и полностью перекристаллизованную структуру. Вследствие этого среднее значение *CTOD* в последнем случае оказывается выше (0,19 мм). Металлографические исследования показывали, что низкие результаты испытаний образцов серии 3 всегда были связаны с наличием на фронте трещины дендритных участков, высокие – перекристаллизованной зоны.

Результаты испытаний образцов с распространением трещины поперек шва могут оказаться и более низкими, если низкую трещиностойкость имеют корневые проходы шва, в которых при симметричной разделке полностью оказывается фронт трещины (при стандартном отношении длины трещины к высоте образца, близкой к 0,5). Причиной этого может быть недостаточная защита сварочной ванны или снижение содержания легирующих элементов вследствие большего перемешивания металла корневых проходов шва с основным металлом. В рамках работ по обследованию состояния металла сварных соединений верхних строений платформы «Hutton TLP» были проведены испытания сварных соединений толщиной 50 мм с двумя ориентациями надреза при $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Одновременно выполнялись испытания на ударный изгиб образцов KV, вырезанных от поверхности и из корневой зоны шва. При испытаниях соединений, выполненных предположительно автоматической сваркой проволокой диаметром 4 мм с погонной энергией около 2,5 кДж/мм, химический состав шва: Si – 0,32 %, Mn – 1,48 %, средние значения *CTOD* составляли 0,20 мм для образцов S × 2 S (распространение трещины вдоль шва) и 0,44 мм – для образцов S × S (распространение трещины поперек шва). В этом случае величина KV у поверхности и в корневой зоне была приблизительно одинакова (80 – 120 Дж). При

испытаниях соединений, выполненных полуавтоматической сваркой самозащитной алюмосодержащей порошковой проволокой с погонной энергией около 1,0 кДж/мм, химический состав шва: Ni – 0,57 %, Mn – 0,8 %, Al – 0,97 %, аналогичные испытания показали: средние значения *CTOD* равны 0,27 мм и 0,04 мм, соответственно. Низкие значения *CTOD* металла корневой зоны коррелируют с результатами определения KV: для металла шва корневой зоны KV = 14 – 30 Дж при – 40 °С, а при вырезке образцов вне корневой зоны KV = 90 – 150 Дж при той же температуре.

4 Уточнение методик испытаний и критериев оценки качества материала сварных соединений по параметру *CTOD*

Предельная сложность достижения безусловно высоких показателей трещиностойкости для металла нетермообрабатываемых сварных соединений низколегированных судокорпусных сталей при температурах ниже –40 °С и резко выраженная зависимость получаемого результата от методических особенностей испытаний заставляют внести ряд уточнений по их методике и критериям оценки результата. При этом представляется необходимым использовать различные варианты методики испытаний в зависимости от их цели.

В настоящее время испытания на *CTOD* проводятся по следующим назначениям:

испытания с целью оценки трещиностойкости металла ЗТВ при аттестационных испытаниях листового проката судосталей. Испытания проводятся для получения свидетельства о признании заводом-изготовителем проката;

испытания с целью квалификации сварочной процедуры (технологического процесса сварки), проводимые на судостроительном заводе (верфи) для подтверждения применимости данной технологии при строительстве конструкций морской техники;

испытания с целью определения параметров трещиностойкости, используемых в расчетах прочности по отношению к хрупкому разрушению. Практика проведения таких испытаний в настоящее время еще не сложилась. Однако необходимость выполнения проверочных оценок возможности хрупких разрушений для конструкций шельфа Арктики с предельно низкими расчетными температурами вытекает, в том числе, и из представленного экспериментального материала. Предложения по процедурам таких оценок представлены в работе авторов [15].

4.1 Испытания «на свариваемость» листового проката

Так как целью данных испытаний является оценка склонности стали к образованию охрупченных структур в ЗТВ, методика испытаний однозначно должна оговаривать лишь тот тип испытываемого образца, который позволяет достичь установленного выше критерия корректности по попаданию в целевую структуру (не менее 15 %). В соответствии с классификацией рис. 1 а к таким образцам можно отнести лишь образцы типа III или IV, вырезаемые из сварной пробы с прямой кромкой шва, но не образцы типа I или II. При этом в случае выбора образцов типа III для учета масштабного фактора температура испытаний должна быть снижена на 15 °С по отношению к T_p .

Для обоснованного заключения по результатам испытаний необходимо увеличить их объем; желательно получение не менее семи корректных результатов. Учитывая высокую трудоемкость изготовления образцов и проведения испытаний, представляется возможным достичь этого за счет сокращения количества серий образцов. Исходя из представленных выше данных, испытания можно ограничить одной целевой структурой (крупнозернистая составляющая ЗТВ) и использовать лишь максимальную погонную энергию из диапазона, установленного нормативной документацией на сварку рассматриваемой стали.

Учитывая статистический характер получаемой величины, целесообразно уточнить критерий выполнения требований по *CTOD*. В последней редакции Правил [5] регламентируется среднее значение при условии, что минимальное значение *CTOD* составляет не ниже 70 % указанного. Так как в реальности минимальное значение может быть сколь угодно малым и в первую очередь зависит от объема испытаний, такая формулировка объективно ведет лишь к стремлению снизить этот объем. Целесообразно либо исключить требование по минимальному значению, заменив их требованием к величине *CTOD*, соответствующей определенной доверительной вероятности (например, 30 %), либо ввести критерий, связанный с объемом испытаний: например, регламентировать минимальное значение по трем испытаниям, либо второе по величине по шести испытаниям, третье по девяти и т. д.

Так как металл сварного шва, как правило, оказывается не менее критической структурой по возможности хрупких разрушений, чем металл ЗТВ, необходимо дополнительное ограничение содержания металла шва при испытаниях ЗТВ (не более 5 %).

4.2 Квалификационные испытания сварочных процедур

В данном виде испытаний образцы изготавливаются из сварного соединения, полностью соответствующего по технологическим

параметрам рассматриваемой сварочной процедуре. При X- или V-образной разделке шва испытания образцов с разметкой по линии сплавления (тип I, II) обычно не приводят к более низким результатам, чем при разметке по центру шва, и могут не выполняться. Исключение составляют варианты технологий сварки с высокой погонной энергией (например, при выполнении заводского продольного шва труб) и формой шва с кромками, почти перпендикулярными поверхности. Необходимость выполнения испытаний с разметкой надреза по линии сплавления целесообразно устанавливать по предварительным испытаниям образцов на ударный изгиб с надрезом по центру шва и линии сплавления.

Полученный экспериментальный материал показывает, что результаты испытаний образцов с надрезом от поверхности (тип I, рис. 1 б) и с надрезом по сечению шва (тип II, рис. 1 б) могут быть существенно различными. В связи с этим представляется необходимым одновременно использовать оба типа образцов для аттестации металла шва.

Сделанные выше замечания по объему испытаний и корректировке критерия оценки их результатов распространяются и на этот вид испытаний.

4.3 Определение трещиностойкости для проверочных расчетов сопротивления хрупкому разрушению

Необходимость этих испытаний связана, в первую очередь, с ситуациями, когда требования Правил [5] по *CTOD* для металла сварного шва и (или) для металла ЗТВ не выполняются. Так как при расчетных оценках должны рассматриваться все возможные ситуации по типу и положению дефектов, включая и несплавления по границе «шов – основной металл», объем испытаний должен включать в себя как испытания металла ЗТВ на образцах, вырезанных из заготовок с прямой кромкой шва, так и испытания металла шва, выполненные в объеме квалификации сварочных процедур. Объем испытаний должен позволять проведение статистической обработки результатов для определения трещиностойкости, соответствующей заданной доверительной вероятности разрушения.

Выводы

1. Накопленный опыт проведения испытаний на *CTOD* металла сварных соединений судокорпусных хладостойких сталей показывает необходимость учитывать статистический характер получаемой ха-

рактеристики и существенную зависимость результата испытаний от методики их проведения.

2. Исследованы статистические характеристики распределения *CTOD* для металла сварных соединений, показана возможность их описания двухпараметрическим распределением Вейбулла с параметром формы, равным 2, для всех ориентаций распространения разрушения, и равным 1 при совпадении направления разрушения с локальной охрупченной прослойкой материала.

3. Определена связь результата испытаний на *CTOD* с содержанием критических структур на фронте трещины: крупнозернистой составляющей ЗТВ у линии сплавления и неперекристаллизованной дендритной структурной составляющей металла шва. Показана достаточность содержания 15 % критической структуры для получения достаточно консервативного результата.

4. Погонная энергия сварки является наиболее значимым фактором, определяющим результат испытаний на *CTOD* металла шва и металла ЗТВ. Отмечен немонотонный характер этой зависимости, что позволяет оптимизировать технологию сварки с целью обеспечения требуемой трещиностойкости при предельно низких климатических температурах.

5. Результаты исследований позволяют откорректировать методики испытаний на *CTOD* в зависимости от их назначения.

Список литературы

1. Canadian Standard Association. CAN/CSA-S473-92. Steel Structures. Part III of the Code for the Design, Construction and Installation of Fixed Offshore Structures
2. BS 7191. British Standard Specification for Weldable structural steels for fixed offshore structures. – BSI, 1989. – 43 p.
3. Det Norske Veritas. Rules for classification of Fixed Offshore Installations. Hovik, Norway, 1995
4. IACS W11. Material Selection Guideline for Mobile Offshore Drilling Units. 1991.
5. Правила классификации, постройки и оборудования плавучих буровых установок и морских стационарных платформ. – СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2008.
6. Горынин И. В., Ильин А. В., Леонов В. П., Малышевский В. А. Совершенствование требований к материалам для ЛСБУ на основе подходов механики разрушения // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – Вып. 23. – СПб., 2000. – С. – 93 – 113.
7. Det Norske Veritas. OS-F101 Submarine Pipeline Systems, January 2003
8. BS 7448. Fracture Mechanics Toughness Test. Part 2. Method for determination of critical *CTOD* and critical J values of welds in metallic materials, 1997.

9. ASTM E 1921. Standard Test Method for Determination of Reference Temperature, T_0 , for Ferritic Steels in the Transition Range, in Annual Book of ASTM Standards, 1999. – p. 1068 – 1084.

10. Wallin K. The Scatter in K_{Ic} Results. Engineering Fracture Mechanics, 19(6), 1984, pp. 1085 – 1093.

11. Башаев В.К. и др. Аттестационные испытания судокорпусной стали марок E36, E36Z производства ОАО «Северсталь» и ее сварных соединений // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – Вып. 27. – СПб., 2004. – С. – 118 – 133.

12. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика. М., ВШ, 2003. – 480 с.

13. Wallin K., Laukkanen A., Nevasmaa P. and Planman T. Recent Advances in Master Curve Technology // 11th International conference on fracture, Turin, 2005.

14. Ильин А.В., Мизецкий А.В., Филин В.Ю. К описанию масштабного эффекта при испытаниях на трещиностойкость на основе модифицированного подхода Гриффитса / Вопросы материаловедения, № 1(41), 2005.

15. Ильин А.В., Леонов В.П., Филин В.Ю. Разработка методики оценки сопротивления хрупкому разрушению сварных конструкций для шельфа Арктики // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – Вып. 31. – СПб., 2008. – С. – 147 – 175.

УДК 629.12.06-71

В.К. Шурняк

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТРЕБОВАНИЙ РС И МАКО К ОБЪЕМУ ЛЕДОВЫХ ЯЩИКОВ СУДОВ ЛЕДОВОГО ПЛАВАНИЯ

Для судов ледового плавания даже при временной потере хода значительно повышается вероятность ледовых повреждений. При работе систем забортной воды на судах ледового плавания помимо обычных для систем охлаждения отказов возникают дополнительные опасности: обмерзание приемных решеток, попадание большой массы битого льда и шуги в ледовые ящики (ЛЯ), проникновение в связи с этим значительного количества воздуха в систему и т. п. Опасность приема с забортной водой большого количества мелкобитого льда и шуги, попадание которых в фильтры системы охлаждения препятствует поступлению необходимого количества забортной воды и, как следствие, нарушает охлаждение рабочих сред (пресной воды, масла), приводит к перегреву двигателя, вынужденному снижению мощности, временной потере хода, повышению вероятности ледовых повреждений.

В августе 2006 года Международная ассоциация классификационных обществ (МАКО) приняла унифицированное требование UR I3 «Machinery Requirements for Polar Class Ships» (UR I3), в котором приводятся требования к механическим установкам судов полярных классов. Российский морской регистр судоходства (РС) внедрил требования UR I3 в часть XVII «Дополнительные знаки символа класса и словесные характеристики, определяющие конструктивные или эксплуатационные особенности судна» Правил классификации и постройки морских судов (Правила РС) [1]. При этом существующая классификация

РС ледоколов и судов ледового плавания, соответствующие требования и классификационная символика продолжают в настоящее время оставаться в Правилах РС и существуют параллельно с аналогичными символика и требованиями МАКО. Для гармонизации требований к устройству ЛЯ судов ледового плавания проведен специальный анализ, результаты которого приводятся в настоящей статье.

В Правилах РС содержатся требования к числу ЛЯ в зависимости от класса судна, требования к устройству рециркуляции и специальной воздушной трубы для удаления воздуха, горловины для возможности доступа в ЛЯ при любой осадке, устройству приемной решетки, проходное сечение которой должно быть не менее чем в 2,5 раза больше площади проходного сечения приемных труб. Основной упор в требованиях РС делается на меры по организации таяния льда, проникшего в ЛЯ. Для надежной работы вода рециркуляции должна поступать равномерно и интенсивно перемешиваться с поступающим в ЛЯ снегом и мелкобитым льдом. Для выполнения этого в Правилах РС предусмотрено требование о подводе труб рециркуляции в верхнюю и нижнюю части ЛЯ.

Требования МАКО и Правил РС в основном совпадают, что объясняется использованием Правил РС в качестве источника при разработке унифицированных требований МАКО. Принципиальных различий два.

1. УТ МАКО требуют, чтобы суммарная площадь проходного сечения приемной решетки была не менее чем в 5 раз больше площади проходного сечения приемных труб (в требованиях РС – в 2,5).

2. В отличие от Правил РС в УТ МАКО содержатся требования к минимальному объему ЛЯ: 1 м³ объема ЛЯ на каждые 750 кВт мощности обслуживаемых системой двигателей.

При проектировании российских судов с классом РС использовались требования РД5.1032-79 [2], где приводится таблица рекомендуемого объема ЛЯ, в зависимости от диаметра кингстонов и клинкетов. Трудность сравнения требований РД5.1032-79 и UR I3 к объему ЛЯ состоит в том, что РД5.1032-79 регламентирует объем ЛЯ в зависимости от размеров установленных на них кингстонов, а не от мощности энергетической установки. Поэтому непосредственное сравнение требований указанного РД5.1032-79 и UR I3 невозможно, и необходимо сначала определить зависимость требуемого в РД5.1032-79 объема ЛЯ от мощности энергетической установки.

Для сравнительной оценки требований РД5.1032-79 и UR I3, исходя из требований РС к максимальной допустимой скорости потока в трубопроводах, для энергетических установок различных типов были произведены соответствующие расчеты.

При этом сделаны следующие допущения.

1. Температура воды в системе охлаждения повышается на 15 °С. Это допущение сделано по данным проектов судов ледового плавания. Кроме этого учтены рекомендации, данные по этому вопросу в [6, 7].

2. Тепловыделение в систему охлаждения для судов с дизельной энергетической установкой принималось равным 60 % полезной мощности. Это допущение сделано после анализа теплового баланса некоторых судовых дизелей по данным [3, 4, 6] (результаты приведены в табл. 1). При этом учитывалось, что кроме системы охлаждения теплота от работающего дизельного двигателя отводилась с уходящими газами (35 – 42 % затраченной в цикле теплоты). Теплоотдача от нагретых поверхностей в машинном отделении не учитывалась.

Таблица 1

Результаты анализа теплового баланса некоторых судовых дизелей по данным [3, 4]

Фирма	Тип двигателя (обозначение по ГОСТ 10150)	Отношение теплоты, отводимой системой охлаждения к теплоте, преобразованной в полезную работу
1	2	3
«Зульцер» (и лицензиаты)	8ДКРН 90/155	0,59
	6ДКРН 76/155	0,66
	9ДКРН 76/155	0,64
	6ДКРН 90/190	0,58
	6ДКРН 58/170	0,53
	12ЧН 40/48	0,66
	8SD72	0,54
	RD90	0,62
MAN – «Б и В» (и лицензиаты)	8ДКРН 74/160	0,57
	8ДКРН 84/180	0,58
	6ДКРН 67/140	0,70
	6ДКРН 67/170	0,66
	6ДКРН 67/190	0,53
	5ДКРН 74/160	0,62
	14ЧН 52/55	0,67
	3ДКРН 78/140	0,53
	G6L28/38	0,55
	6ЧКН 30/45	0,49

Продолжение табл. 1

1	2	3
«Мицубиси»	ДКРН 58/108	0,69
	ДКРН 60/150	0,64
	90VET52/65	0,51
«Пилстик»	12ЧН 40/46	0,65
	Среднее	0,61

3. Тепловыделение в систему охлаждения для судов с паротурбинными энергетическими установками, работающими на органическом топливе, принималось равным 180 % полезной мощности. Это допущение сделано после анализа теплового баланса судовых паротурбинных установок по данным [5, 6] (результаты приведены в табл. 2). При этом учитывалось, что кроме полезной работы, помимо системы охлаждения теплота отводилась с уходящими газами котлов. Теплоотдача от нагретых поверхностей в машинном отделении не учитывалась.

Таблица 2

Результаты анализа теплового баланса некоторых судовых паротурбинных энергетических установок по данным [5, 6]

Судно, фирма, страна	КПД установки, %	КПД котла, %	Отношение теплоты, отводимой системой охлаждения к теплоте, преобразованной в полезную работу
АЕГ, ФРГ	34,2	93	1,79
«София», СССР	26,5	93	2,58
«Крым», СССР	34,5	95	1,80
MST-14, США	35,0	83	1,54
R-804, Япония	34,2	93	1,79
«Паметрада», Англия	34,5	93	1,77
Сталь-Лаваль, Швеция	34	92,5	1,80
Среднее			1,87

4. Тепловыделение в систему охлаждения для судов с атомными паротурбинными энергетическими установками, принималось равным 400 % полезной мощности. Это допущение сделано после анализа теплового баланса судовых энергетических установок с атомной паропроизводящей установкой (АППУ) по данным [6, 8, 9, 10] (результаты

приведены в табл. 3). При этом учитывается, что КПД паротурбинной энергетической установки с АППУ значительно ниже, чем паротурбинной энергетической установки на органическом топливе, а тепловыделение в воздух отсутствует. Теплоотдача от нагретых поверхностей в машинном отделении не учитывалась. В анализе учитывались только АППУ с водо-водяными реакторами.

Для наглядности сравнительной оценки необходимого количества воды для СЭУ различного типа построена диаграмма, представленная на рис. 1.

Таблица 3

**Результаты анализа теплового баланса
некоторых судовых атомных энергетических установок по данным [6, 8, 9, 10]**

Судно, страна	КПД установки, %	Отношение теплоты, отводимой системой охлаждения к теплоте, преобразованной в полезную работу
«Отто Ганн», ФРГ	19,4	4,15
«Арктика», СССР	18,0	4,56
«Саванна», США	21,9	3,57
«Муцу», Япония	20,4	3,90
«Севморпуть», СССР	21,8	3,59
«Таймыр», СССР	21,0	3,75
Среднее		3,92

Результаты расчета необходимого объема ЛЯ на основе требований РД5.1032-79 для энергетических установок различного типа приведены на рис. 2 и 3.

На основе степенной аппроксимации можно предложить формулу для определения минимального объема ЛЯ судов ледового плавания в зависимости от мощности главного двигателя, которая будет соответствовать требованиям РД5.1032-79.

Согласно полученной степенной аппроксимации объем каждого ЛЯ должен быть не менее объема определенного по формуле

$$V = jN^{0,8},$$

где N – общая мощность главных и вспомогательных двигателей, обслуживаемых системой охлаждения, МВт;

V – объем ЛЯ, м³;

j – коэффициент, принимаемый равным:

0,9 – для ЛЯ судов с дизельной энергетической установкой;

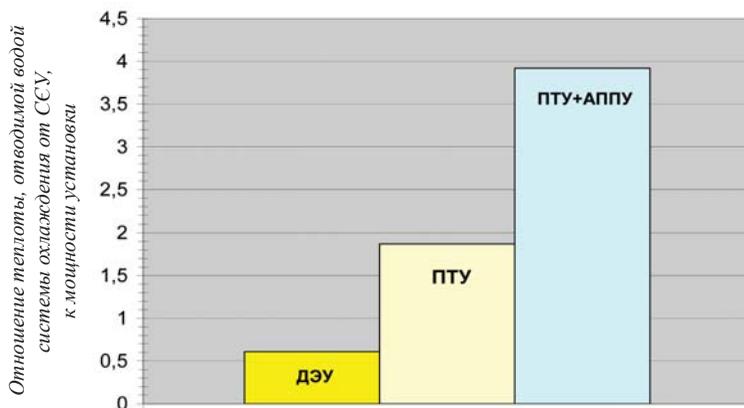


Рис. 1
Сравнение необходимого количества воды системы охлаждения для СЭУ различного типа

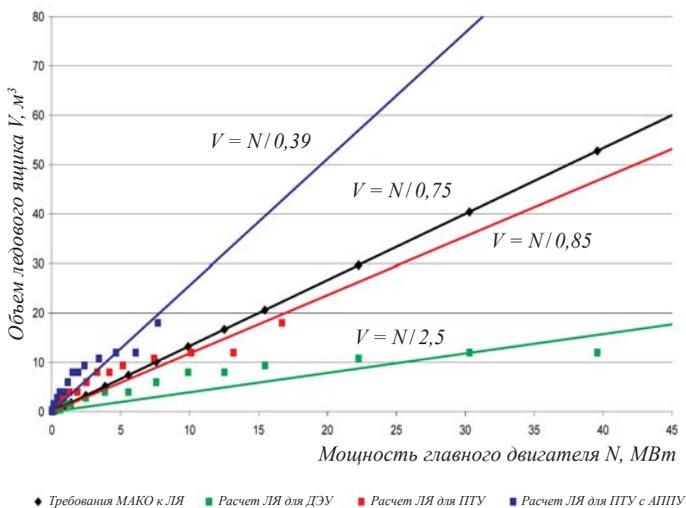


Рис. 2
Сравнение требований РД5.1032-79 и UR I3 к объему ЛЯ судов ледового плавания (линейная аппроксимация с величиной достоверности $R^2 = 0,83$)

2,2 – для ЛЯ судов с паротурбинной энергетической установкой на органическом топливе;
 4,3 – для ЛЯ судов с паротурбинной энергетической установкой и АППУ на основе водо-водяных реакторов.

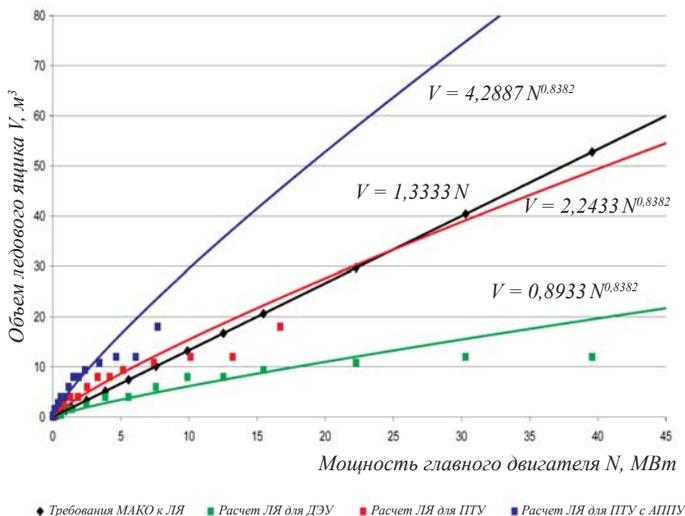


Рис. 3

Сравнение требований РД5.1032-79 и UR 13 к объему ЛЯ судов ледового плавания (степенная аппроксимация с величиной достоверности $R^2 = 0,96$)

На рис. 3 показана аппроксимация на основе степенной функции с величиной достоверности аппроксимации $R^2 = 0,96$.

На основе линейной аппроксимации для определения минимального объема ЛЯ для судов ледового плавания в зависимости от мощности главного двигателя можно предложить следующие требования, которые также будут соответствовать рекомендациям РД5.1032-79 с несколько меньшей величиной достоверности, чем показано на рис. 3.

Согласно полученной линейной аппроксимации объем каждого ЛЯ должен быть не менее объема, определенного из расчета 1 м^3 объема ЛЯ на каждые $2,5 \text{ МВт}$ мощности дизельной энергетической установки (ДЭУ), 850 кВт мощности паротурбинной установки (ПТУ) на органи-

ческом топливе и 390 кВт мощности паротурбинной установки с атомной паропроизводящей установкой (ПТУ+АППУ).

На рис. 2 приводится аппроксимация на основе линейной функции, величина достоверности аппроксимации $R^2 = 0,83$.

Для сравнительной оценки требований UR I3 и РД5.1032-79 (с учетом предлагаемых аппроксимаций) в табл. 4 приводятся данные по объему ЛЯ судов различных классов с ледовыми усилениями. Из таблицы видно, что объемы ЛЯ на всех судах, данные по которым приведены в таблице, значительно превышают как требования UR I3, так и требования РД5.1032-79. Исключение составляют суда с АППУ, для которых требования на основе линейной аппроксимации рекомендаций РД5.1032-79 наиболее близки.

Таблица 4

Сравнение размеров ледовых ящиков (ЛЯ) различных судов с результатами расчета

Судно, проект, ледовый класс	Тип СЭУ, мощность, МВт	Объем ЛЯ, м ³	Расчет, м ³		
			линейная аппроксимация	степенная аппроксимация	требования МАКО
Ледокол «Таймыр», пр. П-1300, LL2	ПТУ+АППУ, 37,5	154 и 161	94	78	50
Ледокол «Москва», пр.21900, Icebreaker 6	ДЭУ, 2×6,0	187 и 102	4,8	6,5	16
Танкер «Пермь», пр. АРКТИК17.2,	ДЭУ, 5,3	63,1	2	3,4	7
Судно Ro-Ro «Капитан Ман» (типа «Норильск»), УЛА	ДЭУ, 2×7,7	82 и 66	6,2	8	20,5
Балкер «Северная земля», проект ВС14, Arc4	ДЭУ, 9,48	57,7	3,8	5,5	12,6
Буксир «Тугнуй», Пр. 16609/1, Arc4	ДЭУ, 2×1,49	6,7	1,2	2,1	4
Судно обеспечения «Тобой», пр. Р621, Arc 7	ДЭУ, 3×4,32	117	5,2	7	17

Выводы

1. На основе проведенного исследования предлагается ввести в Правила РС требования к объему ледовых ящиков в зависимости от мощности и типа энергетической установки судна.

2. Результаты проведенного анализа показали, что хотя требования UR I3 являются несколько более жесткими, чем требования РД5.1032-79, их применение на судах с дизельной ЭУ с классом РС не приведет к каким-либо трудностям, так как реальные объемы ледовых ящиков значительно больше рекомендуемых.

3. В дополнение к требованиям UR I3 предлагаем ввести для судов ледового плавания с атомной энергетической установкой дополнительное требование об увеличении объема ледовых ящиков не менее чем в 2 раза.

Список литературы

1. Правила классификации и постройки морских судов. – СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2010.
2. РД5.1032-79. Ящики кингстонные и ледовые. Технические требования.
3. Вешкельский С.А. Справочник судового дизелиста. – Л.: Судостроение, 1990.
4. Фомин Ю.Я., Горбань А.И., Добровольский В.В. и др. Судовые двигатели внутреннего сгорания. – Л.: Судостроение, 1989. – 344 с.
5. Курзон А.Г. Основы проектирования судовых паротурбинных установок. – Л.: Судостроение, 1974. – 536 с.
6. Троицкий Б.Л., Сударева Е.А. Основы проектирования судовых энергетических установок. – Л.: Судостроение, 1980. – 133 с.
7. Румб В.К., Яковлев Г.В., Шаров Г.И., Медведев В.В., Минаян М.А. Судовые энергетические установки. Судовые дизельные установки: [учебник]. – СПб.: СПбГМТУ, 2007. – 622 с.
8. Родионов Н., Воробьев В. Безопасность атомной энергетической установки «Севморпути» / Морской флот. – 1989. – № 10, С. 32 – 35; № 11, С. 36 – 38.
9. Дубовец А.Б., Каиров Р.А., Щеголев Л.И. Атомному лихтеровозу «Севморпуть» – 15 лет / Судостроение. – 2004. – № 1. – С. 9 – 10.
10. Окольничков А., Худин В. Атомный ледокол «Таймыр» / Морской флот. – № 8. – 1987. – С. 42 – 50.

Б.А. Горелик, В.К. Шурляк

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ОПАСНОСТЕЙ И ОЦЕНКА РИСКА СУДОВЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

Международная морская организация (ИМО) решает задачи повышения безопасности мореплавания, в том числе и за счет применения формализованной оценки безопасности (ФОБ), которая является структурированной и систематизированной методикой оценки рисков. Формализованная оценка безопасности является последовательным процессом выявления различного рода опасностей до того момента, когда они вызовут аварийные ситуации, оценки риска их возникновения и эффективности принимаемых мер по их предотвращению. Основной целью ФОБ является снижение величины риска и оценка экономических преимуществ или потерь от решений, направленных на снижение этих рисков.

Использование ФОБ целесообразно в случае разработки технических мер по снижению риска возникновения опасных ситуаций в процессе эксплуатации судна и его составных элементов, таких как трубопроводы.

Структурно ФОБ состоит из следующих этапов:

идентификация (выявление) опасностей;

анализ и оценка риска;

способы управления и уменьшения риска;

оценка затрат при принятии тех или иных способов управления риском;

рекомендации по принятию решений (предупредительных, конструкционных и организационных).

Эти этапы в совокупности дают возможность создать механизм принятия решений по потенциальным опасностям до того, как произойдет авария.

При применении методологии ФОБ, как правило, величину риска R определяют по следующей математической зависимости:

$$R = F \cdot C, \tag{1}$$

где F – частота (вероятность) нежелательного события;

C – степень тяжести последствий от совершения нежелательного события (величина материальных затрат и количество жертв).

Риск в количественном выражении определяют после проведения идентификации опасностей. Суммирование рисков выполняют на основе «деревьев событий» или «деревьев отказов».

Принятие решения о приемлемости риска осуществляют при выполнении следующего условия:

$$R \leq R_{доп} \quad (2)$$

где $R_{доп}$ – допустимая (применяемая) величина риска нежелательного события.

Таблица 1

Данные об авариях, связанных с отказами трубопроводов судовых систем

Название системы или трубопровода	Тип и название судна	Вид и место дефекта	Результат воздействия
1	2	3	4
Охлаждение забортной водой турбины	а/л «Ленин»	Коррозия сварного шва переходного патрубка	Протечки, отрыв патрубка Выход из строя
Система охлаждения забортной водой	Рефрижератор «Татарстан»	Коррозия разнородных материалов Т и ТЭ	Нарушение герметичности, протечки
Охлаждение забортной водой главного двигателя	д.э.х «Актюбинск»	Сквозные разрушения в трубе из меди МЗр	Выход из строя главного двигателя
Система забортной воды, приемный патрубок	т/х «Локания Нова»	Коррозия сварного шва сектора, износ стенки трубы	Затонул в Индийском океане
Система забортной воды (осушительная, балластная, пожарная)	«Михаил Кутузов»	Коррозия сварного шва в зоне погибов труб	Протечки, затопление помещений судна
Система забортной воды (патрубок, балластная, пожарная)	«Юрий Долгорукий»	Коррозия сварного шва	Отрыв патрубка, протечки, затопление помещений судна
Топливный трубопровод	Танкер «Прага»	Разгерметизация фланцевых соединений	Разлив топлива на фланец ТГ, пожар
Топливный трубопровод	Танкеры «Крым» и «Кузбасс»	Разгерметизация фланцевых соединений	Пожар из-за разлива топлива в МО

Продолжение табл. 1

1	2	3	4
Трубопровод перегретого пара	п/х «Красный Профинтерн»	Разгерметизация фланцевого соединения (разрыв прокладки)	Ожог члена экипажа, порча близстоящего оборудования
Трубопровод перегретого пара	Танкер «Алиот»	Неисправность запорного органа предохранительного клапана	Ремонт трубопровода
Трубопровод перегретого пара	п/х «Аргунь»	Трещина образованная в лебедочной магистрали при размораживании	Ремонт трубопровода
Система осушения	т/х «Мирноньч»	Коррозия нижней поверхности трубы из стали	Затопление помещения МО
Система осушения	Танкер «Узбекистан»	Разгерметизация фланцевого соединения из-за коррозии шва	Протечки и затопление помещения судна
Система осушения	т/х «Тукан» (Финл.)	Коррозия сварного шва	Затонул в Бискайском заливе
Система бытового водоснабжения (питьевая вода)	п/х «Венера»	Коррозия резьбовых соединений	Протечки, затопление помещения
Трубопровод питательной воды	Танкер «Киргизстан»	Трещины сварного шва фланцевого соединения	Нарушение нормальной работы котла
Выпускной трубопровод (сильфонный компенсатор)	Сухогруз постройки Германия	Растрескивание металла	Ремонт трубопровода
Комплекс систем различного назначения (система хладоносителя, осушения, пароснабжения, противопожарная, балластная)	Танкер «София»	Фланцевые соединения – коррозия сварных швов	Протечки, затопление помещения

В данном случае задачей идентификации опасностей является выявление и описание возможных опасностей, возникающих на борту судна после отказа трубопроводов различного назначения. Это возможно осуществить на базе информации об авариях, приведенной в табл. 1.

С этой целью разработан перечень основных опасностей трубопроводов, которые способны привести к авариям, при этом максимально возможная точность достигается их ранжированием в зависимости от их значимости.

Используя данные по авариям, авторы определили опасности, возникающие при отказе трубопроводов и их элементов:

1. потеря способности судового оборудования функционировать по прямому назначению;
2. потеря способности судового оборудования обеспечивать движение судна;
3. затопление помещений судна водой, топливом и т. п.;
4. негативное воздействие на человека (отравление, ожог и др. травмы);
5. взрыв;
6. пожар;
7. негативное воздействие на другое оборудование;
8. загрязнение окружающей среды (атмосферы, акватории, береговой линии и т. п.);
9. потеря остойчивости судна;
10. опрессовка судового оборудования.

Отказы, возникающие в результате различных по характеру дефектов, можно классифицировать по двум признакам:

- по причинам появления и
- по тяжести последствий.

Основными причинами возникновения отказов, приводящих к потере герметичности или разрыву трубопровода, являются:

- коррозия труб и трубопроводных элементов;
- вибрация участков трубопроводов, передающаяся на трубы от механизмов и корпусных конструкций;
- гидравлические удары и пульсация давления в трубах;
- внешнее воздействие (столкновение, посадка на мель, волновое воздействие и т. д.).

Как известно, в соответствии с ГОСТ27.002 [1], отказ – это событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния объекта. Применительно к судовым трубопроводам это означает, что объект, т. е. трубопровод, находясь в исправном состоянии, должен:

- подводить к оборудованию транспортируемую по нему среду с заданными параметрами;

- препятствовать поступлению транспортируемой по трубопроводу рабочей среды в помещение или пространства, окружающие его.

ГОСТ 27.002 выделяет деградационные и эксплуатационные отказы. При этом под деградационным понимается отказ, обусловленный естественными процессами старения, изнашивания, коррозии и усталости при соблюдении всех установленных правил и норм проектирования, изготовления и эксплуатации, а под эксплуатационным – отказ, возникший по причине, связанной с нарушением установленных правил и условий эксплуатации. Из табл. 1 и из других источников видно, что отказы труб забортной воды носят деградационный характер, в то время как отказы трубопроводов топлива носят явный эксплуатационный характер. Об этом говорит статистика пожаров на судах. Согласно нескольким независимым источникам [2, 3], частота возникновения пожаров не связана с возрастом судна, а, следовательно, и с процессами деградации труб. Так, в анализе, проведенном НК [2], из 73 пожаров в машинном отделении судов за период 1980 – 1992 гг. только в трех случаях наблюдалось разрушение топливных труб. Все прочие утечки топлива и масел, послужившие причиной аварий, связаны с расхождением фланцев, отказами арматуры, переливом топлива и неисправностями электрооборудования. Примером деградационного отказа может служить коррозионный износ трубопроводов охлаждения забортной водой. В работе [4] производилась оценка (согласно РД5.5104-74 [5]) средней наработки до отказа трубопровода, полностью соответствующего требованиям Правил Регистра [6]. Согласно произведенной оценке, средняя наработка до отказа таких трубопроводов составляет около 10 лет, то есть при работе трубы в системе охлаждения забортной водой в пределах 20 лет такое событие можно считать практически достоверным и необходимо произвести четкую оценку его опасности.

По тяжести последствий отказы можно классифицировать по следующим признакам:

- протечки рабочей среды, вызванные разгерметизацией трубопровода;

- разливы рабочей среды, вызванные разрывом трубопровода.

В первом случае система считается работоспособной (свищи, отсутствие герметичности арматуры, фланцевых и штуцерных соединений и т. п.) и не исключается возможность временного ремонта без отключения трубопровода за счет накладки пластыря, хомута, наплавки, заварки, подтяжки болтов и т. п. При этом протечки рабочей среды незначительны.

Во втором случае возможны следующие последствия.

1. Происходит значительное поступление жидкости или нефтепродуктов в помещение судна, в котором произошел разрыв трубопровода.

2. Утрачивается работоспособность трубопровода функционировать по прямому назначению.

3. Исключается возможность проведения любого ремонта трубопровода, даже временного.

Для оценки тяжести повреждений имеет смысл использовать универсальную формализованную шкалу, характеризующую степень ущерба, предложенную Г.В.Егоровым [7, 8, 9]. По степени повреждений, нанесенных людям, окружающей среде и техническим средствам, аварии условно классифицированы 5 уровнями последствий (см. табл. 2). Формализованная оценка последствий обозначается величиной С, определяемой по 5-балльной шкале. Преимуществом указанной шкалы является ее гармонизация с Международным Кодексом проведения расследований аварий и инцидентов на море, введенным резолюцией ИМО А.849(20) [10].

Таблица 2

Классификация последствий аварий и аварийных ситуаций на море

Оценка	Уровень последствий С	Степень повреждения		
		Воздействие на людей	Воздействие на окружающую среду	Повреждение технических средств
1	Незначительное происшествие (Light Incident)	Нет	Нет	Ничтожное
2	Происшествие (Incident)	Легкое телесное повреждение	Ничтожное	Незначительное
3	Авария (Casualty)	Серьезное, необратимое телесное повреждение	Существенное	Серьезное
4	Серьезная авария (Serious Casualty)	Потеря человеческой жизни	Критическое	Значительное
5	Катастрофа (Very Serious Casualty)	Много человеческих жертв	Катастрофическое	Гибель судна

Используя данные по авариям, авторы статьи определили возможные конечные нежелательные события, которые могут наступить в результате отказа трубопровода, и свели их в табл. 3. Далее в табл. 3,

используя шкалу оценки тяжести аварии (табл. 2), производится оценка тяжести каждого возможного события.

Таблица 3

События, наступающие в результате аварии трубопровода

№ п/п	Событие	Оценка тяжести С (баллы)
1	Гибель людей (группы)	5
2	Потеря судна	5
3	Значительное загрязнение окружающей среды (более 700 т нефти) с тяжелыми последствиями	5
4	Утрата или порча груза	4
5	Загрязнение окружающей среды	4
6	Гибель одного человека, травмы людей, увечья одного или более	4
7	Авария судового оборудования, требующего замены или дорогостоящего ремонта	3
8	Буксировка судна в ближайший порт, судоремонтный завод или базу технического обслуживания	2
9	Невозможность выполнения условий фрахта судовладельцем	2
10	Авария корпуса, механизмов и другого судового оборудования, требующая постановки судна в док	2
11	То же, без постановки в док	1
12	Незначительные травмы людей	1
13	Незначительное загрязнение окружающей среды	1
14	Ремонт в рейсе силами экипажа	0

Если сопоставить опасности и аварии, которые наступают в результате разрыва трубопровода, становится очевидным, что большинство аварий не являются непосредственным следствием отказа трубопровода, а происходят в результате появления одновременно с ним одного или нескольких дополнительных событий: сложные навигационные условия (проход в узкостях), сложные метеословия (туман, шторм, дождь), ошибочные действия отдельных членов экипажа, наличие источника воспламенения и т. д. Отсюда следует, что далеко не всякий разрыв трубопровода заканчивается аварией и оформленным аварийным актом Регистра. Таким образом, по данным об авариях, связанных с поломкой трубопроводов, невозможно объективно судить о частоте появления отказов, так как большинство

отказов труб нигде не фиксируются, а устраняются на судне в рабочем порядке.

Для получения более достоверного результата разработана матрица зависимости видов опасности от различных по назначению трубопроводов и их расположения на судне (см. табл. 4).

Таблица 4

Идентификация опасностей от трубопроводов различного назначения в зависимости от расположения на судне

Проводимая среда		Система трубопроводов	Расположение										
			A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
1	Жидкие грузы с температурой вспышки ≤60 °С	Грузовая	NA	NA	1, 3, 4, 5, 6	NA	NA	1	5, 6	1, 5, 8	1, 3, 4, 5, 6	NA	1, 4, 6, 8
		Мойки танков сырой нефтью	NA	NA	1, 5	NA	NA	1	NA	NA	1, 3, 4, 5, 6	NA	1, 6, 8
		Газоотводная	NA	NA	NA	NA	NA	10	NA	NA	NA	NA	8, 4, 5, 10
2	Инертный газ	СИГ с генератором ИГ	1	1	–	NA	NA	5	NA	–	5	NA	5
		СИГ с азотным генератором	1	1	–	NA	NA	5	NA	–	5	NA	5
3	Воспламеняющиеся жидкости с температурой вспышки >60 °С	Грузовая система	NA	NA	1, 3, 6	NA	NA	1	1	1, 8	1, 3, 6	NA	1, 6, 8
		Топливная система	1, 2, 6, 7	1, 6	NA	6	NA	NA	1	8	1, 3, 6	NA	6, 8

Продолжение табл. 4

Проводимая среда	Система трубопроводов	Расположение											
		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
	Масляная система	1, 2, 6, 7	1, 6	NA	6	NA	NA	1	8	1, 6	NA	6, 8	
	Системы гидравлики	1, 6	1, 6	1, 6	1, 6	1, 11, 6	1,6	1	8	1, 6	NA	6, 8	
	Системы с органическим теплоносителем	1, 4, 6	1, 4, 6	6	4, 6	1, 11, 6	1	1	8	1	NA	6, 8	
4	Забортная вода	Осушительная система	1	1	1	1	1	NA	NA	NA	1	1	NA
		Дренажные трубопроводы внутренних помещен.	1, 3, 7	1, 3, 7	NA	9	9, 11	8, 11	NA	1	1	3, 7	NA
		Санитарные стоки (внутренние)	1, 7	1, 7	1	1	1, 11	NA	1, 2	1	1	1, 7	NA
		Дренаж с открытых палуб	1, 7	1, 7	1	1	1	1, 11	1, 2 ¹ , 8	1	1	1, 7 ²	1
		Водопожарная система и водораспыление ³	1, 7	1, 7	1	1	1	NA	NA	NA	1	1, 7 ²	1
		Система пенотушения ³	1, 7	1, 7	1	1	1	NA	NA	NA	1	1, 7 ²	1
		Спринклерная система ³	1, 7	1, 7	1	1	1	NA	NA	NA	1	1, 7 ²	1

Проводимая среда		Система трубопроводов	Расположение										
			A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
	Балластная система	1, 3, 7	1, 3, 7	1	1	1	1, 11, 8	1, 8, 2 ¹	1,9	1	1, 7 ²	1	
	Системы охлаждения ответственного назначения	2, 3, 7	1, 3, 7	NA	NA	NA	NA	NA	1	1	NA	NA	
	Донно-бортовые патрубки системы охлаждения	2, 3	2, 3	1, 3	NA	NA	NA	NA	1	1	NA	NA	
	Система мойки танков	NA	NA	1	NA	NA	1	NA	1	1	NA	1	
	Системы неотвественного назначения	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
5	Пресная вода	Системы охлаждения ответственного назначения	2, 7	1, 7	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	
		Система возврата конденсата	2, 7	2, 7	1, 7	1	1	5, 6	1, 2 ¹	1	1	NA	1
		Системы неотвественного назначения	1	1	1	1	1	NA	1	1	1	1	1

Продолжение табл. 4

Проводимая среда	Система трубопроводов	Расположение												
		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13		
6	Пар	Система главного пара	2, 4, 7	1, 4, 7	1, 4	NA	NA	NA	NA	NA	1	NA	NA	
		Система пара для хозяйственных нужд	1, 4, 7	1, 4, 7	1, 4	1, 4	1, 11	NA	NA	1	1	1, 7 ²	1	
		Система подогрева топлива	1, 4, 2	1, 4, 2	1, 4	1	1	1	1	1	1	1	NA	1
		Система подогрева груза	1, 4	1, 4	1, 4	NA	NA	1, 11, 5, 6	1	1	1	1	NA	1
7	Прочие среды	Воздушные, измерительные и переливные трубы водяных танков и сухих отсеков	1	1	1	1	1	1, 8, 11	1, 2, 8	1	1	1	1, 9	
		Системы управления Пневматические	1, 2	1	1	1	1	NA	1	1, 9	1	1	1	
		Воздушные для хозяйственных нужд	1	1	1	1	1	NA	1	1	1	1	1	
		Рассольные	1, 11	1, 11	NA	1, 11	1, 11	NA	NA	NA		1, 11, 7 ²	1, 11	

Проводимая среда	Система трубопроводов	Расположение										
		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
	Система CO ₂	1 ³ , 4	NA	NA	NA	1 ³ , 4	1 ³ , 4	1 ³				
	Хладагенты группы I	1, 4, 11	1, 4, 11	NA	1, 4, 11	1, 4, 11	NA	NA	NA	1, 4, 11	NA	1, 4, 11
	Хладагенты группы II (аммиак)	1, 4, 11	1, 4, 11	NA	1, 4, 11	1, 4, 11	NA	NA	NA	1, 4, 11	NA	1, 4, 11

Примечание.

Подразделение судовых помещений по категориям:	№	Опасности, возникающие при отказе трубопроводов
<p>A – Машинные помещения категории «А»</p> <p>B – Прочие машинные помещения</p> <p>C – Отделения грузовых насосов, включая входы и шахты</p> <p>D – Грузовые помещения судов с горизонтальной погрузкой</p> <p>E – Грузовые помещения сухих грузов и шахты</p> <p>F – Грузовые танки и шахты</p> <p>G – Топливные танки и шахты</p> <p>H – Балластные танки и шахты</p> <p>I – Коффердамы, сухие отсеки и пр.</p> <p>J – Жилые, служебные помещения и посты управления</p> <p>K – Открытые палубы</p>	1	Потеря функционирования по прямому назначению судового оборудования
	2	То же с потерей хода судна
	3	Затопление помещений судна (водой, топливом, жидким грузом и т. п.)
	4	Негативное воздействие на здоровье человека (отравление, ожог, удар и т. п.)
	5	Взрыв
	6	Пожар
	7	Воздействие на другое ответственное оборудование по причине разрыва трубопровода
	8	Загрязнение окружающей среды
	9	Потеря остойчивости судна
	10	Опрессовка судового помещения
	11	Порча груза
NA	Не применимо	

¹Для расходных топливных цистерн.

²Для постов управления.

³Уменьшение вероятности тушения пожара в случае отказа системы пожаротушения в настоящей оценке не учитывается

Методика оценки риска опасности для каждого трубопровода позволяет выделить из них наиболее опасные. Предлагаемая методика основана на результатах оценок последствий опасности и вероятности наступления событий, возникающих при аварии трубопровода. За основу взята методика расчета риска, описанная в [11].

Для оценки риска выхода из строя трубопровода необходимо оценку тяжести наступления определенного события C_i умножить на оценку вероятности наступления данного события B_j . При этом если нежелательное событие может в дальнейшем привести к другим нежелательным последствиям, оценки вероятностей последующих событий следует перемножать. Таким образом, оценку опасности, исходящей от трубопроводов какой-либо системы в каком-либо помещении судна, можно произвести по формуле

$$D_{\rho i} = \sum_{j=1}^n C_i \cdot B_{ij}, \quad (3)$$

где i – номер опасности;

j – номер события, которое предшествует наступлению нежелательного события;

C_i – оценка тяжести реализации i -ой опасности;

B_{ij} – оценка вероятности наступления нежелательного события, предшествующего реализации i -ой опасности.

Если такое событие одно, то $j = 1$, а если это цепь нескольких, следующих одного за другим событий (например, за потерей хода судна может следовать его гибель при наступлении нескольких нежелательных событий), то оценки вероятности этих событий перемножают:

$$B_i = \prod_{j=1}^{j=m} B_{ij}. \quad (4)$$

При необходимости для получения точной картины последовательно наступающих событий необходимо построение «деревьев отказов» или «деревьев событий».

Интегральная оценка безопасности в помещении ρ определяется по формуле

$$D_{\rho} = \sum_{k=1}^k D_{\rho k}. \quad (5)$$

Интегральная оценка безопасности трубопровода, проходящего в нескольких помещениях, определяется по формуле

$$D_k = \sum_{\rho=1}^{\rho} D_{\rho k}. \quad (6)$$

Интегральная оценка безопасности трубопроводов по судну в целом определяется по формуле

$$D = \sum_{p=1}^p \sum_{k=1}^k D_{p k} \quad (7)$$

Таким образом, пользуясь предлагаемой методикой, можно оценить как опасность, исходящую от трубопровода в конкретном помещении, так и общий уровень опасности от системы в целом.

Выводы

На основе анализа аварий, связанных с отказами систем на судах, в настоящей статье:

1. произведена классификация отказов по причинам их появления и по степени потери работоспособности систем;
2. произведена идентификация опасностей, исходящих от трубопроводов и их элементов в различных помещениях судна;
3. предложена методика количественной оценки риска, основанная на методике анализа видов, последствий и критичности отказов (АВПКО);
4. разработанные материалы позволяют в дальнейшем оценить риски отказов систем для различных помещений судна и разработать предложения по нормам резервирования различных элементов систем.

Список литературы

1. ГОСТ 27.002-89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения.
2. Engine room fire. Guidance to fire prevention – Tokyo: NIPPON KAIJI KYOKAI, 1994. – 161 с.
3. Сергеев А. А. Анализ аварийности на судах с классом Регистра // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – Вып. 28. – СПб., 2005. – С. 32 – 46.
4. Голуб Е. С., Шурпяк В. К. Оценка технического состояния трубопроводов забортной воды согласно новым документам Регистра // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – Вып. 23. – СПб., 2000. – С. 216 – 227.
5. РД5.5104-79. Трубопроводы судовые. Методика расчета безопасности и долговечности элементов и допустимые скорости потока морской воды.
6. Правила классификации и постройки морских судов. – СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2010.
7. Егоров Г. В. Проектирование судов ограниченных районов плавания на основании теории риска. – СПб.: Судостроение, 2007. – 384 с.

8. Егоров Г.В. Исследование риска при эксплуатации судов смешанного плавания // 36. наук. праць УДМТУ. – Николаїв: УДМТУ, 2000. – № 5(371). – С. 49 – 59.

9. Егоров Г.В. Развитие требований к средствам контроля загрузки морских и смешанного плавания судов // Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сб. – Вып. 5. – Одесса: ОГМА, 2000. – С. 36 – 53.

10. Международный Кодекс проведения расследований аварий и инцидентов на море. – СПб.: ЗАО ЦНИИМФ, 1998. – 112 с.

11. Александровская Л.Н., Аронов И.З., Елизаров А.И. и др. Статистические методы анализа безопасности сложных технических систем. – М.: Логос, 2001. – 232 с.

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРОГНОЗУ И ОЦЕНКЕ РИСКОВ ПРИ ОБОСНОВАНИИ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ МОДЕРНИЗАЦИИ СУДОВЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

В настоящее время достаточно часто встает вопрос о модернизации судов и, соответственно, их судовых энергетических установок (СЭУ). Это вызвано значительным средним возрастом судов и необходимостью поддержания годного технического состояния их механизмов в период между освидетельствованиями. Как правило, ориентировочный ресурс и периоды замены элементов СЭУ определяются на начальном этапе проектирования судна в соответствии с техническим заданием.

Обычно ресурс крупных малооборотных двигателей соответствует среднему нормативному сроку работы судна (25 – 35 лет) и их замена на новые производится крайне редко. Годное техническое состояние двигателей внутреннего сгорания (ДВС) поддерживается, в основном, за счет проведения своевременного технического обслуживания и, при необходимости, замены или ремонта их деталей.

В то же время следует отметить, что надлежащий технический уровень других механизмов, входящих в состав СЭУ, таких как редукторы, муфты, подшипники и т. д., а также высокооборотных ДВС (главных и вспомогательных), поддерживается не только за счет проводимых ремонтов. Нередкими являются случаи модернизации или полной замены какого-либо из элементов СЭУ или целого агрегата на новый. Это обусловлено значительно меньшим ресурсом высокооборотных ДВС по сравнению с малооборотными, экономической неэффективностью для судовладельца поддержания работоспособного состояния СЭУ путем проведения дорогостоящих ремонтов, а также возможностью повышения экономичности установки и снижения стоимости ее обслуживания за счет применения более совершенного оборудования. Так, в качестве примера можно привести пассажирские суда типа «Сахалин», на которых судовладелец посчитал экономически целесообразным провести замену главных дизель-генераторов 1985 – 1988 гг. изготовления на более современные агрегаты.

При решении вопроса о целесообразности модернизации обеспечение безопасности судна является одной из основных задач и важное место в общей судовой безопасности занимает СЭУ. Не случайно при оценке риска ей уделяется повышенное внимание, в качестве примера можно привести работы [1] – [3].

Решение вопроса о целесообразности и объемах модернизации и ремонта СЭУ происходит с учетом требований правил и руководств классификационного общества, международных конвенций, ГОСТов и других нормативных актов путем выполнения нескольких этапов анализа, которые отличаются между собой глубиной проработки конструктивного выполнения объекта модернизации. На каждом этапе решается задача выбора наилучшего решения на основе сопоставления вариантов выполнения судна и его СЭУ по различным показателям: энергетическим (мощностным); массогабаритным; энергетической эффективности (экономичности) и т. п. Помимо перечисленных критериев в современном судостроении появляется новый параметр. Он основан на оценке риска, включая анализ и его количественную оценку, как это предусмотрено ГОСТ Р 51901.4-2005 и ГОСТ Р ИСО 10006-2005. Такой критерий выбора не является достаточным, но становится, согласно идеологии заложенной в Федеральном законе «О техническом регулировании», необходимым. В общем случае прогноз и оценка риска выполняется на соответствующем этапе обоснования модернизации, а результат сравнения оценок является одним из аргументов для выбора лицами, принимающими окончательное решение, варианта модернизации СЭУ при переходе от одного этапа к другому (рис. 1).

В методологии формализованной оценки безопасности (ФОБ) риск определяется по формуле

$$R = PC, \tag{1}$$

где P – частота (или вероятность) нежелательного события;
 C – степень тяжести последствий нежелательного события.

Несмотря на то, что в Руководстве ИМО по ФОБ упоминаются параметры принятия решения, которые могут использоваться, однозначных критериев приемлемости в настоящее время в руководстве не определено, и на практике на данный момент наиболее часто применяются следующие из них:

1. оценка риска для индивида, находящегося на борту судна (член экипажа или пассажир), или для третьих сторон, на которые может

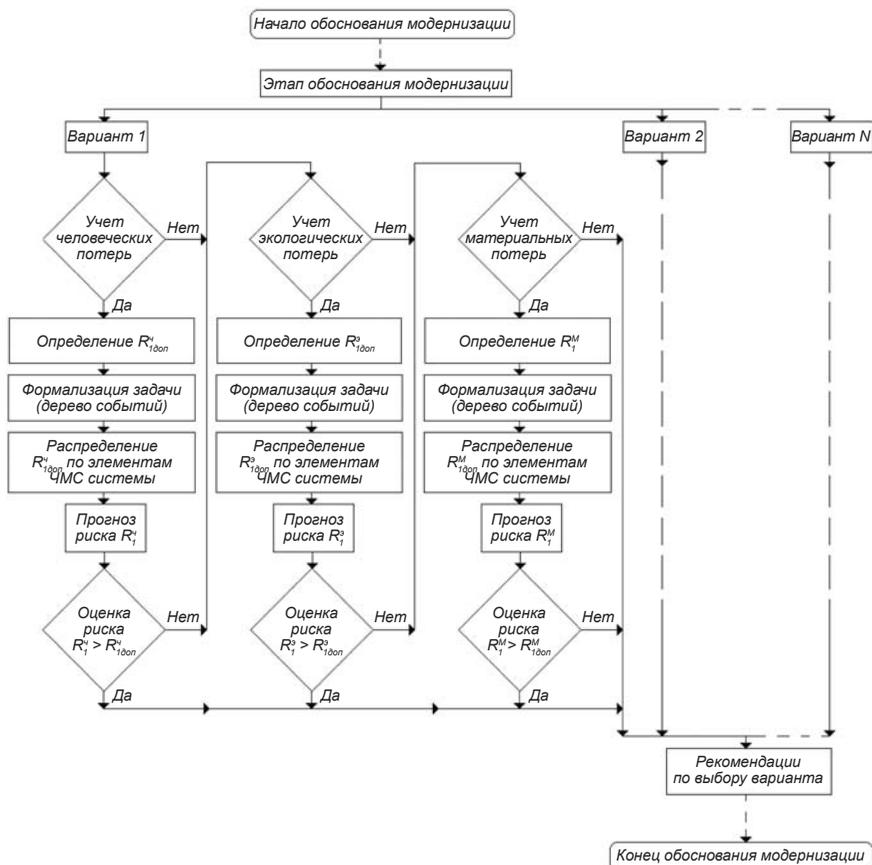


Рис.1
 Алгоритм обоснования целесообразности выполнения модернизации СЭУ
 на основе прогноза и оценки рисков

оказать воздействие авария. Риск смертельного случая для индивида может быть представлен как годовой уровень смертельных случаев или как значение FAR (отношение количества смертельных случаев к 10^8 рабочих часов).

Такие критерии могут быть установлены при сравнении с другими отраслями, с естественными опасностями, с решениями, хорошо подтвержденными положительной статистической информацией и т. д.;

2. оценка риска для общества (групповой риск), ее обычно осуществляют с использованием характеристики случайной величины потерь, называемую F/N -кривой (диаграммой);

3. оценка возможных экологических потерь, оцениваемых площадью загрязнения поверхности моря, береговой линии или атмосферы;

4. экономические показатели потерь за промежуток времени, которые сравниваются с величиной ожидаемой прибыли и оцениваются по сравнению с отношением рентабельности и уровня риска в других отраслях промышленности, а также при хранении денежных средств на банковском депозите.

Принятие решения о приемлемости риска выполняется при следующем условии:

$$R \leq R_{\text{доп}}, \quad (2)$$

где $R_{\text{доп}}$ – допустимая (приемлемая) величина риска нежелательного события.

При фиксированной величине $R_{\text{доп}}$ условие (2) соблюдается при разных пропорциях между значениями P и C . С этой точки зрения применение ФОР, в первую очередь к морским плавучим буровым установкам, танкерам, балкерам, пассажирским судам и судам с аммиачными установками, со стороны Международной морской организации (ИМО) и Российского морского регистра судоходства (РС) логично и обосновано.

В настоящее время можно выделить два основных направления при прогнозе и оценке риска. Первое связано с необходимостью учета при модернизации судна рисков для всего общества, что вынуждает рассматривать риски трех видов: человеческие, экологические и материальные (касающиеся третьих лиц) потери. Для этих рисков со стороны общества, через надзорные и другие органы управления, устанавливаются их лимитирующие величины. Риски нормируются в соответствии с числом человеческих потерь в единицу времени, допустимыми величинами загрязнения окружающей среды (разливы нефти, выбросы в воздух, шумовое воздействие). Такое нормирование осуществляется для судна в целом и позволяет на основании рекомендаций ИМО и национальных норм получить соответствующие значения $R_{\text{доп}}$. Нужно отметить, что раздельное нормирование таких видов рисков оправдано для исключения возможности перераспределения величины допустимого значения одного вида риска за счет другого.

Второе направление связано с вопросами хозяйственной деятельности конкретного судовладельца (судоходной компании – далее Ком-

пани) и определяет его коммерческой риск. Он учитывает не только указанные выше виды рисков, но и дополнительные, связанные, например, с техническим обслуживанием и ремонтом судна в процессе эксплуатации и т. п. Допустимые (приемлемые) значения такого риска Компания назначает сама.

Современное судно представляет собой сложную систему «человек–машина–среда» (ЧМС), которая является объектом оценивания степени приемлемости техногенного риска. Допустимую величину каждого вида риска для судна в целом нужно распределить между теми компонентами системы ЧМС, которые значимы на данном этапе модернизации. Это позволит перейти к обоснованию выбора вариантов выполнения модернизации компонентов системы и, далее, всех входящих в них элементов. Появляется потребность формализации задачи. Эта формализация подразумевает необходимость составления «дерева отказов» (Events Tree) или «дерева событий» (Fault Tree). Формализация для каждого вида риска производится отдельно. Здесь должен широко использоваться метод экспертной оценки, который выполняет команда экспертов во главе с координатором проекта, имеющим опыт и навыки по использованию методологии ФОб и анализу рисков.

На разных этапах обоснования модернизации состав команды может меняться, соотносясь с трудоемкостью и детализацией проекта модернизации. Для оценки степени согласия экспертов на каждом этапе можно использовать предложенный РС специальный коэффициент конкордации [4].

Методика ФОб предусматривает операцию ранжирования отказов с целью определения приоритетов по их опасности для СЭУ и судна в целом. Для оценки риска человеческих потерь следует принимать во внимание такие элементы «дерева событий», отказ которых может повлечь за собой человеческие жертвы. Для оценки рисков экологических потерь – такие элементы «дерева событий», отказ которых может повлечь за собой экологический ущерб и т. д. При рассмотрении различных эксплуатационных состояний системы ЧМС имеет смысл проводить ранжирование отказов ее элементов в соответствии с частотой отказов и степенью тяжести их последствий, как это предусмотрено в ГОСТ Р 27.310-95. Представляют также интерес предложения М.Д. Емельянова по определению критичных элементов морских судов [5].

Чтобы получить значение $R_{\text{доп}}$ для СЭУ и ее элементов по каждому виду рисков, следует распределить его между частями системы ЧМС,

пока не будет достигнут желаемый результат. СЭУ входит в компонент «машина» системы ЧМС. Этот компонент может быть представлен в виде «дерева событий», отображенного на рис. 2. Именно через этот участок «дерева событий» удастся получить необходимые для дальнейшего обоснования модернизации СЭУ и ее элементов допустимые значения рисков.

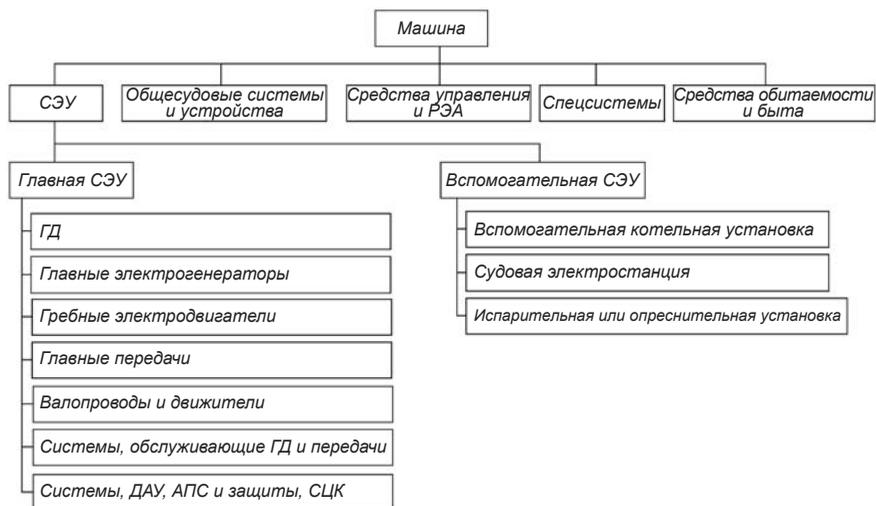


Рис. 2
Пример «дерева событий» для компонента «машина» системы ЧМС

На основе рассмотрения «деревьев событий» группа экспертов устанавливает как вид «дерева» для определения соответствующего риска, так и характер связей между элементами этих «деревьев». Связи между элементами разных уровней устанавливаются зависимостями на основании логики соподчиненности. В частности, могут быть использованы типы связей, рекомендованные ГОСТ Р51901.5-2005 и ГОСТ Р51901.13-2005.

Используя указанные связи или их сочетания, можно перейти по полученному «дереву событий» сверху вниз, т. е. от допустимого значения риска для всего судна до допустимых значений всех нижестоящих элементов, включая СЭУ целиком и ее отдельные элементы, как

главные, так и вспомогательные. Далее следует перейти к прогнозу и оценке риска.

В качестве рекомендации для выполнения прогноза риска предлагается использовать имитационное моделирование (ИМ) (использование имитационных методов получения частот происходящих событий предусмотрено ГОСТ Р 51901-2002). Это моделирование находит практическое применение при анализе сложных процессов и систем в условиях неопределенности исходных данных. Оно позволяет экспериментировать с аналитически-вероятностной моделью, проигрывая различные ситуации и упрощая принятия решения. Такой подход в полной мере соответствует философии ФОб, согласно которой необходимо управлять риском путем сопоставления различных вариантов. Для каждого из них производится оценка затрат и выгод и, таким образом, принимается оптимальное решение для снижения риска возникновения опасных ситуаций. Общие подходы в ИМ встречаются редко, поэтому применительно к рассматриваемой задаче, касающейся вопросов модернизации СЭУ и ее элементов, предлагается следующая последовательность действий (рис. 3).

1. На основе анализа «дерева отказов», полученного при распределении допустимых значений рисков среди элементов системы ЧМС, определяются все элементы (перечень) «дерева», отказ которых не зависит от отказа других элементов.

2. На основании, например, экспертных оценок необходимо выбрать определяющую величину Y , наиболее полно и информативно характеризующую состояние каждого элемента из определенного в п. 1 перечня. В качестве такой величины может быть рассмотрена долговечность (ресурс) элемента, уровень шума или вибрации, тепловое состояние (уровень температур или их градиентов) и т. п.

Обыкновенно эта величина имеет рассеивание и носит случайный характер. В результате величина Y представляет собой статистический ряд. Характеристиками этого ряда являются: характеристики положения (среднее арифметическое); характеристики рассеивания (дисперсия, среднее квадратичное отклонение); характеристики распределения (законы распределения). Часто в качестве характеристики рассеивания пользуются относительным показателем – коэффициентом вариации, который представляет собой отношение среднего квадратичного отклонения к среднему арифметическому.

3. Выбирается метод или алгоритм расчета Y и рекомендуются закон и параметры распределения Y . Тщательность и обоснованность этих действий определяет точность получения выходной информации.



Рис. 3
Последовательность выполнения прогноза риска

4. Определяются граничные значения y для определяющей величины Y . В качестве такой величины могут выступать назначаемые на основании тех или иных доводов экспертов численные значения (например, назначенный ресурс для долговечности, граничный уровень температур и/или их градиентов для теплового состояния). Могут использоваться и нормативные значения (например, определенные на основании санитарных норм по допустимым уровням вибрации и шума).

Перспективным является получение рекомендаций по Y , y , законам распределения и их параметрам от проектантов и/или про-

изготовителей оборудования СЭУ. Собственно говоря, согласно ГОСТ Р 51901.4-2005, предпосылка эффективного менеджмента риска при модернизации – это честный и открытый обмен информацией по вопросам риска внутри и вне проекта.

5. Следующим этапом прогноза риска при проведении ИМ являются статистические испытания. В их ходе разыгрывается, например, методом Монте-Карло (этот метод рекомендован для использования при анализе рисков ГОСТ Р 51901-2002) значение случайной величины Y и производится ее сравнение с граничным (например, нормативным) значением y . Если $Y \geq y$ или $Y < y$ (в зависимости от особенностей рассматриваемой задачи), то считается, что произошел отказ или, что испытание прошло успешно. Потом испытания повторяются. Выполнение заданного числа испытаний позволяет получить необходимую статистику для всех элементов из перечня, определенного в п. 1. На ее основе определяется вероятность

$$P_{\text{отк}} = N_{\text{н.и}} / N_{\text{исп}}, \quad (3)$$

где $N_{\text{н.и}}$ – число нарушений нормативного уровня;
 $N_{\text{исп}}$ – общее число испытаний.

Следует отметить, что, управляя количеством случаев реализации $N_{\text{исп}}$, можно получить достоверные результаты и при малом числе отказов. Это позволяет обойти проблему малости величин $P_{\text{отк}}$. Используемые при формализации задач ФОб методы и алгоритмы действий должны быть удобны для организации многочисленных статистических испытаний. Учет этого фактора был определяющим в работе [3] при рассмотрении примеров применения прогноза и оценки рисков.

6. Последний этап ИМ связан со статистической обработкой совокупности случайных параметров для всех остальных элементов «дерева отказов» – выходных данных реализации «дерева». Эта совокупность может быть получена в результате проведения однократного анализа «дерева отказов» для определения вероятности отказов всех остальных элементов «дерева» на основании логики соподчиненности после статистических испытаний для элементов, отказ которых не зависит от надежности других. Этот способ является более быстрым в реализации вычислительных процедур за счет проведения однократного анализа всего «дерева отказов». Он дает только одно значение риска, которое и сравнивается с допустимым значением (см. рис. 3).

Далее можно перейти к оценке риска отказа (например, СЭУ) в целом путем сравнения с допустимым значением, полученным выше на основании распределения допустимого значения между элементами системы ЧМС. Если величина риска больше допустимого значения, то этот вариант проекта модернизации отклоняется и производится прогноз риска для следующего варианта. Если риск меньше допустимого значения, то вычисляются риски для других вариантов и на основании сравнения их между собой дается рекомендация о выборе варианта для разработки на следующем этапе модернизации (см. рис. 1).

Составленные «деревья», выбранные методики и алгоритмы должны использоваться при разработке программных продуктов, необходимых для выполнения прогноза и оценки риска. Полученные результаты и программные комплексы являются продуктом, который может быть использован не только для обоснования выбора варианта выполнения модернизации того или иного технического решения, но и для продажи Компании. Прямая выгода Компании будет заключаться в том, что эти разработки можно использовать следующим образом: для прогноза риска своей хозяйственной деятельности; для показа грузовладельцу выгоды от получения услуг Компании или страховым компаниям для обоснования величины страховых ставок; для прогноза риска человеческих или экологических потерь, который можно предоставлять надзорным органам при очередном освидетельствовании судна или решении задач реновации.

Совершенствование процесса обоснования целесообразности выполнения модернизации СЭУ в ближайшем будущем будет направлено на обеспечение безопасности мореплавания за счет применения прогноза и оценки риска, что требует высокой квалификации и подготовки специалистов, занимающихся вопросами модернизации, к выполнению таких работ. Предлагаемые рекомендации могут быть полезны при решении этой задачи.

Список литературы

1. Туркин В. А. Основы комплексного решения проблемы обеспечения безопасности эксплуатации судовых технических средств на базе анализа риска: Автореф. дис. д-р. техн. наук, 2003.
2. Никитин А. М. Совершенствование технического обслуживания и ремонта судовых энергетических установок на основе анализа рисков: Автореф. дис. д-р. техн. наук, 2007.

3. Медведев В. В. Применение методологии формализованной оценки безопасности при проектировании судовой энергетической установки и ее элементов: монография. – СПб.: Реноме, 2008.

4. Апполонов Е. М., Бойцов Г. В., Захаров А. А., Литонов О. Е., Нестеров А. Б. Проблемы повышения уровня безопасности судов и плавучих сооружений // Научн.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – Вып. 27. – СПб., 2004.

5. Емельянов М. Д. Критичные элементы морских судов / Судостроение. – 2008. – № 6.

*В.И. Евенко, А.А. Сергеев, А.В. Андриюшин,
Г.В. Тарица, И.В. Щербаков, В.А. Беляшов*

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ПРОПУЛЬСИВНЫХ КОМПЛЕКСОВ СУДОВ ЛЕДОВОГО ПЛАВАНИЯ. ЛЕДОВЫЕ НАГРУЗКИ

1 Современные требования РС к пропульсивным комплексам судов ледового плавания, пути развития, основные проблемы и задачи

Обеспечение эксплуатационной прочности ледокольных пропульсивных комплексов (ПК) является одной из наиболее важных задач современного ледоколостроения. Внедрение на ледоколы в качестве ПК современных винторулевых колонок (ВРК) выводит указанную проблему в число первоочередных.

В настоящее время Российский морской регистр судоходства (РС) разработал новые требования к ледокольным гребным винтам (ЛГВ) [1, 2]. Прочные размеры ЛГВ назначаются из условия совместного обеспечения усталостной и статической прочности от воздействия ледовой нагрузки. Точность назначения прочных размеров ЛГВ соответствует требованиям современного проектирования. Однако во многих случаях необходима разработка ЛГВ со специальной профилировкой лопастей для улучшения гидродинамических и кавитационных характеристик, а также для снижения ледовых нагрузок. Одной из актуальных задач проектирования современных ПК является обоснованное уменьшение толщин корневых сечений лопасти ЛГВ и снижение ее силы поломки для обеспечения принципа пирамидальной прочности. Решение указанных задач требует разработки и внедрения уточненных методов расчета прочности ЛГВ, включая назначение распределенной ледовой нагрузки на лопасть, расчет ее напряженнодеформированного состояния (НДС), а также специальных проектных решений, направленных на его снижение. Разработка таких «уточненных» методов обработки ЛГВ ведется в настоящее время в РС в дополнение и к уже действующим, и к еще не вступившим в силу требованиям. Как правило, разработка выполняется совместно

с научно-исследовательскими и проектными организациями в рамках специального рассмотрения применительно к конкретному проекту ледокольного судна. В разд. 2 представлены результаты соответствующих исследований, выполненных для проекта ЛГВ современного арктического ледокола (ЛК).

Установка ВРК на современные ЛК связана с необходимостью определения проектных (расчетных) нагрузок для обеспечения прочности ее основных элементов, например, фланцевого соединения «ВРК–корпус». Эксплуатационная прочность указного соединения должна быть обеспечена с учетом ледовых нагрузок, воздействующих на корпус ВРК. В настоящее время для судов активного ледового плавания и ЛК отдается предпочтение «тянущим» ВРК. Экстремальное значение ледовой силы, воздействующей на обтекатель ЛГВ может быть соизмеримым с силой поломки лопасти, что делает необходимым учет указанной нагрузки для обеспечения эксплуатационной прочности элементов «тянущей» ВРК (усталостная прочность и прочность от одноразового экстремального воздействия). Поэтому, для «тянущих» ледокольных ВРК выполнение принципа пирамидальной прочности только от силы поломки лопасти может оказаться недостаточным для обеспечения несущей способности крепления ВРК к корпусу и главного упорного подшипника (ГУП).

В настоящее время только одно из классификационных обществ – DNV имеет требования к ледовым нагрузкам на ледокольные ВРК [3]. Анализ существующего опыта проектирования и эксплуатации показывает, что действующие требования DNV консервативны, что затрудняет их практическое применение. В настоящее время различными организациями выполняются интенсивные исследования, направленные на уточнение уровня ледовых нагрузок, воздействующих на ВРК. В этой области необходимо отметить работы Е.М. Апполонова, А.Б. Нестерова (ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова) [4, 5]. Однако разработанные к настоящему времени предложения по ледовым нагрузкам на ВРК могут значительно отличаться, что вызывает значительные трудности при проектировании. Поэтому для выработки адекватных решений применительно к конкретному судну проектными организациями под наблюдением РС проводятся дополнительные работы по уточнению ледовых нагрузок на ВРК. В настоящее время такие исследования были выполнены в рамках отработки ПК арктического ледокола ЛК-25 категории **Icebreaker8**, проект КБ «Петробалт». Для улучшения эксплуатационных характеристик на данный ЛК устанавливаются две «тянущие» (бортовые) ВРК типа «Azipod». Определе-

ние ледовых нагрузок выполнялось на базе комплексного подхода, включающего испытание самоходной модели в ледовом опытовом бассейне (ЛОБ) фирмы «Aker Arctic» для выявления типичных режимов взаимодействия ВРК со льдом и разработку уточненных методов назначения ледовых нагрузок. Исследования выполнялись с учетом ранее разработанных методов [4, 5] (Е.М. Апполонов, А.Б. Нестеров и др.), а также существующего опыта эксплуатации, включая данные натурных испытаний судна ледового плавания «Норильский Никель», предоставленные РС фирмой АВВ в рамках отработки ВРК для ледокола ЛК-25. Основные результаты этих исследований представлены в разд. 3 настоящей статьи.

Модельные испытания в ЛОБ являются одним из наиболее перспективных путей определения ледовых нагрузок на элементах ВРК. Основные положения развития этой технологии представлены в разд. 4 настоящей статьи.

2 Уточненные методы обеспечения прочности ледокольных гребных винтов

Обеспечение прочности ЛГВ является основной задачей при проектировании ПК ледокольных судов. Комплексный подход к решению этой задачи на базе расчетных и экспериментальных методов изложен в работах [6, 7, 8, 9, 10]. Наиболее актуальной является разработка методов определения распределенного ледового давления на лопасть ЛГВ для расчетного режима фрезерования льда. Решение этой задачи является ключевым для обеспечения прочности современных ЛГВ с улучшенными эксплуатационными характеристиками. В этой области необходимо отметить работы М.А. Игнатьева, В.А. Беляшова, В. Veitch, Н. Soinenen [11–15]. При определении ледовых нагрузок на режимах фрезерования необходимо рассматривать процессы прорезания льда входящей (выходящей) кромкой и периферийными сечениями лопасти. В первом случае на лопасть воздействует отрицательная ледовая сила, во втором – положительная.

2.1 Расчетные нагрузки на режимах фрезерования льда.

2.1.1 Фрезерование льда входящей (выходящей) кромкой лопасти ЛГВ.

В настоящее время наиболее адекватной для определения ледовой нагрузки на лопасть ЛГВ является модель (схема) взаимодействия кромки лопасти со льдом, представленная в работах [7, 8]. Схема разработана на основе гидродинамической модели вытеснения вяз-

кого ледового слоя (порошка) с учетом исследований Д.Д. Хейсина, В.А. Беляшова, Н. Soinenen, В. Veitch, Е.М. Апполонова, А.Б. Нестерова [4, 12 – 16]. Схема внедрения профиля в лед представлена на рис. 2.1.1. Распределение p_{ice} вдоль зоны контакта лопасти со льдом со стороны засасывающей и нагнетающей поверхностей описывается уравнением (2.1.1).

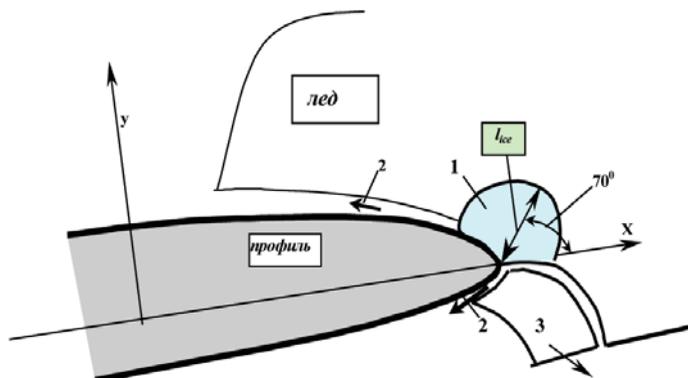


Рис. 2.1.1

Схема взаимодействия кромки лопасти со льдом на режиме его фрезерования:
 1 – зона смятия; 2 – ледовый порошок;
 3 – элемент скола; l_{ice} – характерный размер зоны смятия

$$\bar{p}_{ice} = 0,66854 \cdot e^{(-x/c)} + 0,33147 \cdot e^{(-x/d)}, \quad (2.1.1)$$

где c, d – коэффициенты;

x – безразмерная координата по длине контакта;

$x \in [0, 1]$, 0 – начало зоны контакта, 1 – конец зоны контакта;

$\bar{p}_{ice} = p_{ice} / (p_{ice})_{max}$ – нормированное контактное давление;

$(p_{ice})_{max}$ – максимальное контактное давление в зоне смятия 1.

Максимальное контактное давление $(p_{ice})_{max}$ определяется в функции от прочности льда на одноосное сжатие. Уравнение (2.1.1) с необходимой точностью описывает распределение (p_{ice}) в зонах контакта кромки лопасти [14, 7, 8] и «обтекаемого» индентора со льдом [15]. Последнее дает возможность использовать решение (2.1.1) для определения ледового воздействия на такие конструкции, как обтекатель ЛГВ, см. разд. 3.

При фрезеровании льда кромкой лопасти основная нагрузка сосредоточена на ее засасывающей поверхности, что обусловлено скалыванием льда со стороны нагнетающей (см. рис. 2.1.1). Средняя интегральная нагрузка со стороны нагнетающей поверхности составляет около 10 % от соответствующей для засасывающей. Это приводит к тому, что результирующая ледовая сила направлена в сторону, противоположную гидродинамическому упору. В расчетах прочности лопасти, включая район ее кромки, нагрузкой со стороны нагнетающей поверхности можно пренебречь в безопасную сторону.

2.1.2 Фрезерование льда периферийными сечениями лопасти.

Фрезерование льда периферийными сечениями является одним из типовых взаимодействий лопасти со льдом. Схема процесса представлена на рис. 2.1.2.

При фрезеровании периферийными сечениями интегральная ледовая сила является положительной, т. е. направлена в сторону действия гидродинамического упора. Рассматриваемый сценарий и соответствующие ледовые нагрузки являются определяющими для назначения прочных размеров лопастей ЛГВ в районе концевых радиусов. При прорезании льда периферийными сечениями происходит дробление льда нагнетающей поверхностью лопасти с последующим

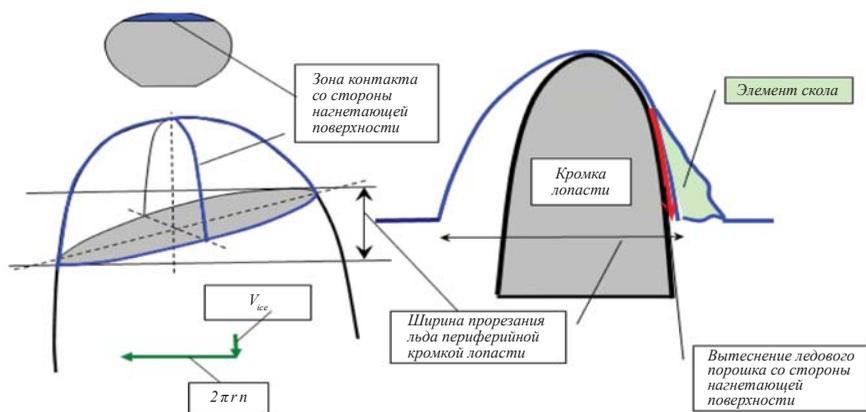


Рис. 2.1.2

Процесс прорезания льда периферийной частью лопасти

V_{ice} – аксиальная скорость взаимодействия гребного винта со льдом;
 $2\pi rn$ – угловая скорость цилиндрического сечения гребного винта на радиусе r ,
 n – обороты гребного винта

вытеснением ледового порошка вдоль радиуса к свободной границе, см. рис. 2.1.2. Это позволяет принять модель 2.1.1 для распределения контактных ледовых давлений по нагнетающей поверхности вдоль радиуса. Вдоль цилиндрических сечений ледовое давление принимается постоянным.

2.2 Уточненные расчеты прочности лопастей ЛГВ.

Представленные в 2.1.1 и 2.1.2 модели взаимодействия лопастей со льдом используются в настоящее время РС для обеспечения их прочности на базе расчета НДС методом конечных элементов (МКЭ). В качестве примера на рис. 2.2 представлены результаты расчета НДС лопасти ЛГВ арктического ЛК для режимов фрезерования льда ее кромками и периферийными сечениями. Отличительной особенностью проекта данной лопасти являются специальные «разгружающие» галтели для корневых сечений, что позволяет существенно снизить напряжения и толщины лопасти. Для режима фрезерования льда кромкой лопасти зона максимальных напряжений расположена на засасывающей поверхности корневых сечений около входящей кромки. При фрезеровании льда периферийными сечениями происходит отгиб (изгиб) верхней части лопасти в сторону засасывающей поверхности лопасти, что приводит к возникновению максимальных растягивающих напряжений на нагнетающей поверхности в районе относительного радиуса 0,6 – 0,7.

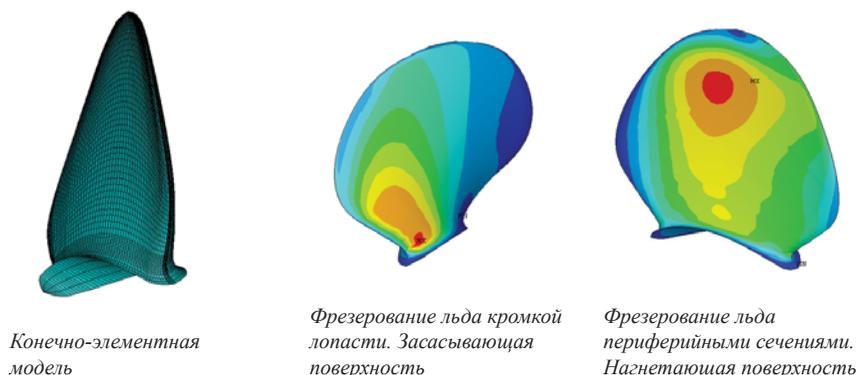


Рис. 2.2
Расчет НДС лопасти ЛГВ для режима фрезерования льда

Представленные процедуры расчета ледовых нагрузок и прочности лопасти могут быть рекомендованы для уточненной обработки ее профилировки с целью улучшения эксплуатационных характеристик ЛГВ. Методика таких расчетов и результаты должны быть согласованы с РС в рамках «специального рассмотрения».

3 Ледовые нагрузки на элементах ледокольных ВРК

3.1 Ледовые нагрузки и режимы взаимодействия бортовой ВРК со льдом для проекта арктического ледокола ЛК-25.

На основе выполненных испытаний в ЛОБ, опыта эксплуатации арктических ЛК, анализа предыдущих исследований [3, 4, 5] были выделены типичные нагрузки и режимы взаимодействия ВРК со льдом, перечень которых представлен ниже.

Нагрузка 1. Ледовая сила, воздействующая на лопасти гребного винта F_{ice} для режима фрезерования льда [1].

Нагрузка 2. Сила поломки лопасти ЛГВ F_{damage}^{blade} . Для ледоколов поломка лопасти ЛГВ наиболее типична при эксплуатации в торосах на режимах маневрирования [1, 11]. Для обеспечения прочности необходимо рассматривать варианты нагрузки при расположении лопасти в крайнем нижнем положении (нагрузка 2.1), см. рис. 3.1-1, и на уровне оси гребного винта (нагрузка 2.2).

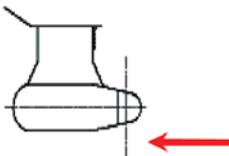


Рис. 3.1-1
Сила поломки лопасти

Нагрузка 3. Продольная ледовая сила ($F_{ice}^{cup} \log_{lim} nit$), воздействующая на обтекатель ЛГВ от удара обломка льда из разрушенного корпусом ледового покрова (нагрузка 3.1), см. рис. 3.1-2, или из нижней (неконсолидированной) части тороса (нагрузка 3.2).

Нагрузка 4. Продольная ледовая сила ($F_{ice}^{strut} \log_{lim} nit$), воздействующая на стойку гондолы, рис. 3.1-3, от удара обломка льда из разрушенного

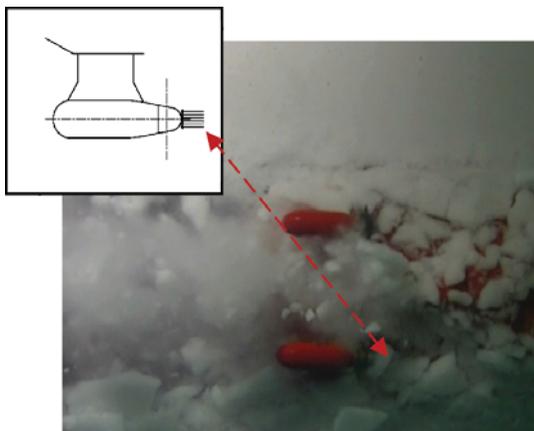


Рис. 3.1-2
Продольная ледовая сила на обтекатель гребного винта

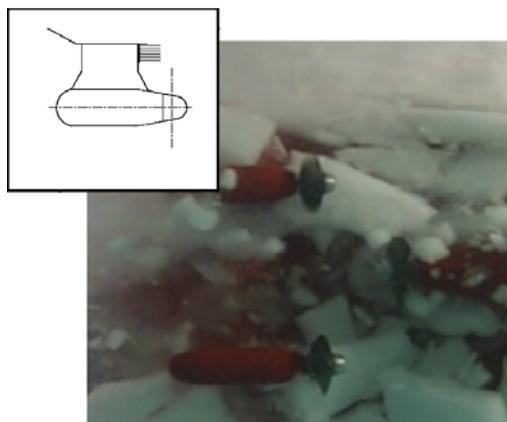


Рис. 3.1-3
Продольная ледовая сила, воздействующая на стойку гондолы

корпусом ледового покрова (нагрузка 4.1) или из неконсолидированной части тороса (нагрузка 4.2).

Нагрузка 5. Поперечная ледовая сила, воздействующая на гондолу ВРК ($(F_{ice}^{pod})_{limit}^{transverse}$) от удара обломка льда при повороте колонки во время движения передним ходом в ровных льдах. Сила ($(F_{ice}^{pod})_{limit}^{transverse}$) создает дополнительный скручивающий момент ($(M_{ice}^{pod})_{limit}$) относительно оси поворота колонки, рис. 3.1-4.

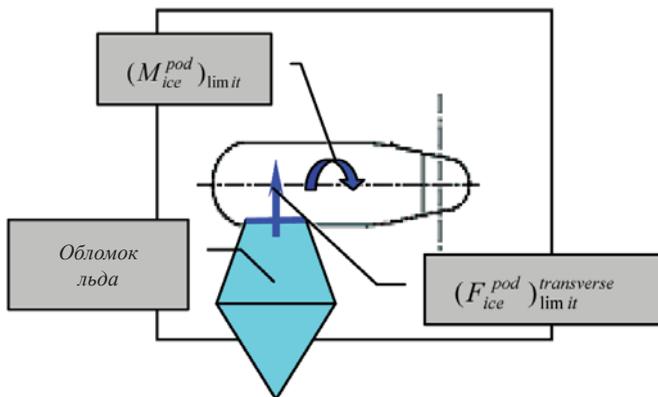


Рис. 3.1-4

Поперечная ледовая сила на гондолу от удара обломка льда

Нагрузки 6, 7. Поперечные ледовые силы 6, 7, воздействующие на стойку гондолы ($(F_{ice}^{strut})_{limit}^{transverse}$) от навала (дробления) ледового покрова на режиме заднего хода при маневрировании. Нагрузка 7 – поперечная «внецентренная» ледовая сила, воздействующая на стойку гондолы с одновременным воздействием ($(M_{ice}^{pod})_{limit}$) относительно оси вращения ВРК, рис. 3.1-5.

Нагрузка 8. Поперечная ледовая сила на гондолу колонки, обусловленная «раздвиганием» («проталкиванием») обломков льда на режиме заднего хода при маневрировании (сопротивление обломанных кусков льда продвижению гондолы в поперечном направлении), см. рис. 3.1-5.

3.2 Эксплуатационные нагрузки и сценарии их совместного воздействия на ВРК арктического ледокола ЛК-25 для обеспечения несущей способности ее основных элементов.

В табл. 3.2 представлены нагрузки и сценарии их совместного воздействия, учет которых необходим для обеспечения усталостной проч-

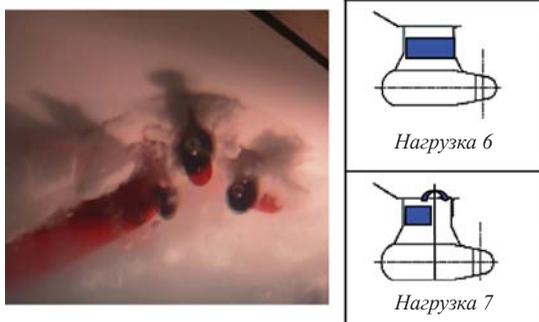


Рис. 3.1-5
 Поперечные ледовые силы на стойку гондолы от «навала» ледового покрова

ности и прочности при экстремальном воздействии. Необходимо отметить, что для ледокольных судов гидродинамические нагрузки на гребном винте являются одними из определяющих усталостную прочность главного упорного подшипника (ГУП), что требует их обязательного учета при выборе типоразмера ГУП для обеспечения требуемого ресурса.

Таблица 3.2
Эксплуатационные нагрузки и сценарии их совместного воздействия на ВРК арктического ледокола ЛК-25 для обеспечения несущей способности ее основных элементов

Основные конструктивные элементы в потоке силовых линий	Сценарии нагрузок для обеспечения несущей способности элементов ВРК	
	Усталостная прочность	Прочность на экстремальное воздействие
1	2	3
Фланцевое соединение ВРК-корпус	Ледовые нагрузки: 1; 3.1; 3.2; 4.1; 4.2; 5; 6; 7; 8	<u>Сценарий 1.</u> Ледовые нагрузки: 1; 3.1; 4.1 <u>Сценарий 2.</u> Ледовые нагрузки: 2.1; 3.2; 4.2 <u>Сценарий 3.</u> Ледовые нагрузки: 2.2; 3.2; 4.2 <u>Сценарий 4.</u> Ледовые нагрузки: 5 <u>Сценарий 5.</u> Ледовые нагрузки: 6; 8 <u>Сценарий 6.</u> Ледовые нагрузки: 7; 8

1	2	3
Главный упорный подшипник	Ледовые нагрузки: 1; 3.1; 3.2 Гидродинамические нагрузки на гребном винте	Сценарий 2. Ледовые нагрузки: 2.1; 3.2

3.3 Назначение ледовых нагрузок на элементы ВРК.

3.3.1 Расчетная модель ледовых нагрузок на обтекатель ЛГВ и гондолу ВРК от удара льдины.

3.3.1.1 Основные подходы к назначению ледовой нагрузки.

Значение ледовой силы при ударе куска льда конечной массы об элемент ВРК определяется из следующего условия [18]:

$$(m_{ice} V_{ice}^2 / 2) = \int_0^l F_{ice}(S) dl, \quad (3.3.1.1-1)$$

где m_{ice} – характерная масса куска льда;

V_{ice} – характерная скорость взаимодействия куска льда с ВРК;

S – площадь контакта куска льда с элементом ВРК;

l – характерная дистанция разрушения льда или дистанция внедрения элемента ВРК в лед.

Для определения продольной ледовой силы $F_{ice} = (F_{ice}^{cup})_{\lim it}^{log nit}$, действующей на обтекатель ЛГВ при заданных параметрах контакта со льдом, целесообразно использовать модель разрушения льда, представленную в 2.1. Аналогичный подход может быть использован и для определения $(F_{ice}^{strut})_{\lim it}^{log nit}$ (нагрузка 3). Для назначения величин ледовых нагрузок 5, 6, 7 (см. 3.1) целесообразно использовать подход, традиционно используемый в «ледотехнике» для решения аналогичных задач. Ледовые силы $(F_{ice}^{pod})_{\lim it}^{transverse}$, $(F_{ice}^{strut})_{\lim it}^{transverse}$ при заданных параметрах контакта элемента ВРК со льдом могут быть определены на основе выражения

$$F_{ice} = p_{ice}(S) \cdot S, \quad (3.3.1.1-2)$$

где $p_{ice}(S)$ – контактное ледовое давление;

S – площадь контакта.

Контактное давление $p_{ice}(S)$ определяется с учетом масштабного эффекта на основе экспериментально полученных данных [19].

3.3.1.2 Прочность льда для назначения ледовых нагрузок.

Для задания ледового давления и соответственно нагрузок на основе модели 2.1.1 необходимо определение прочности льда на од-

ноосное сжатие σ_{compr} для обломков льда из ледового покрова и киля тороса. Необходимо принимать во внимание, что ледокол категории **Icebreaker8** предназначен для эксплуатации как в однолетних, так и в многолетних льдах. Прочность σ_{compr} зависит от пористости льда (температуры, солёности) и направления нагрузки относительно осей кристаллов льда. Последнее необходимо учитывать при назначении ледовой нагрузки на обтекатель гребного винта, который может контактировать как с верхней поверхностью обломка из ледового покрова, так и с его поперечной частью (рис. 3.3.1.2-1). Прочность обломков льда из неконсолидированной части киля тороса ниже, чем для верхней части ледового покрова, что обусловлено более высокой температурой первых.

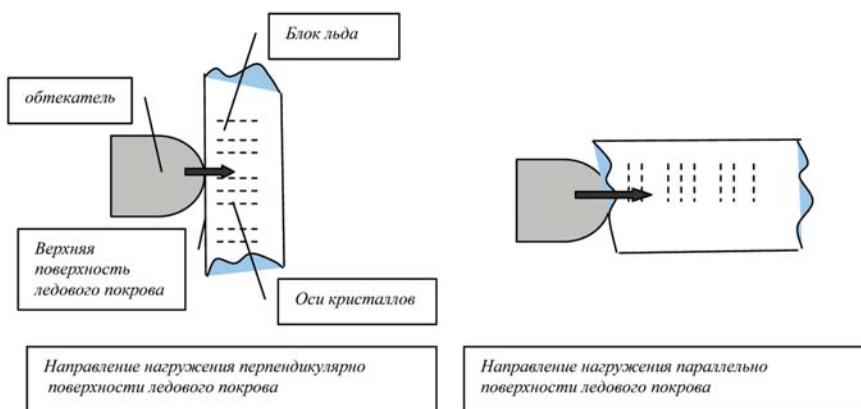


Рис. 3.3.1.2-1
Взаимодействие обтекателя гребного винта с обломком льда

На рис. 3.3.1.2-2 представлены зависимости σ_{compr} для толстого однолетнего льда (ровного ледового покрова), а также для многолетнего льда в функции от глубины ледового покрова (пористости). Значения σ_{compr} для однолетнего льда соответствуют толстому льду (около 2 м толщиной) в Карском море (район «Диксона») в период марта, когда прочность достигает максимальных значений. Соответствующие значения σ_{compr} получены с учетом натуральных данных, включая измерения

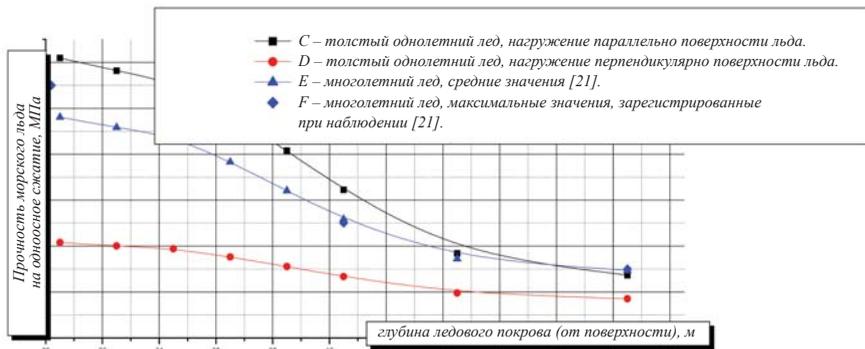


Рис. 3.3.1.2-2
Прочность морского льда на одноосное сжатие, МПа

температуры льда поперек ледового покрова [20]. Прочность однолетнего льда при горизонтальном нагружении выше соответствующей при вертикальной нагрузке. Представленные значения σ_{comp} хорошо соответствуют натурным данным [21, 22, 23]. На рис. 3.3.1.2-2 также представлена прочность (средние и максимальные значения) для многолетнего льда по данным работы [21]. При взаимодействии элемента ВРК с куском льда из нижней части тороса прочность льда можно принимать соответствующей нижним слоям ровного льда.

3.3.1.3 Назначение характерной массы обломков льда и расчетной скорости их взаимодействия с ВРК.

Анализ предыдущих исследований [5], а также результаты, полученные в рамках данной работы (см. 3.3.2), показывают, что в качестве расчетного режима для назначения экстремальных ледовых нагрузок от удара льдины может быть принят режим движения в ровных льдах, приближенных к предельной «ледопроеходимости». В части расчетных ледовых нагрузок такой подход дает результаты, близкие к полученным в процессе натуральных испытаний (см. 3.3.2). Характерные размеры обломка льда могут быть определены в соответствии с результатами работ [24, 25]. На рис. 3.3.1.3 представлена диаграмма для назначения размеров обломка льда из разрушенного корпусом ровного сплошного льда.

Диаграмма задана в виде

$$[b / h_{ice}^{3/4}]^{def} = f[Fr_{ice}],$$

где b – характерный размер обломка льда;

h_{ice} – толщина льда;

$Fr_{ice} = (V_{ice}^{tg} / \sqrt{g \cdot h_{ice}})$ – число Фруда по толщине льда;

V_{ice}^{tg} – вертикальная скорость корпуса.

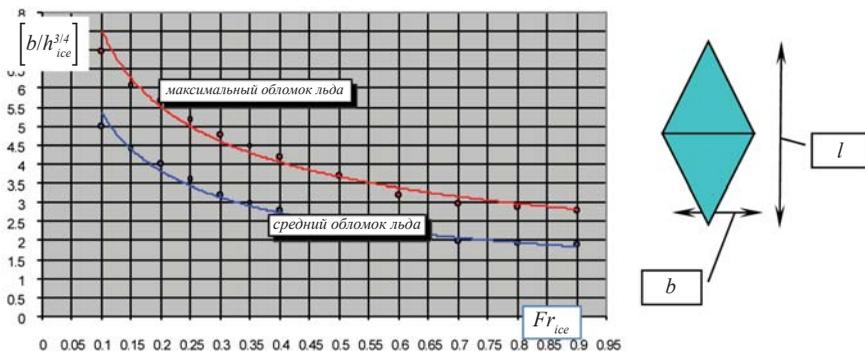


Рис. 3.3.1.3

Диаграмма для назначения характерных размеров обломков льда

В качестве расчетных для назначения экстремальных ледовых нагрузок принимаются максимальные значения обломков льда. Указанная диаграмма позволяет обоснованно назначать массу обломка льда и его кинетическую энергию для решения уравнения (3.3.1.1-1).

3.3.2 Верификация расчетной модели экстремальных ледовых нагрузок на ВРК.

Методика определения экстремальных ледовых нагрузок на элементы ВРК от удара льдины верифицирована на основе сравнения соответствующих расчетных и натуральных данных для ВРК «Azipod» ледокольного судна «Норильский Никель».

3.3.2.1 Расчет ледовой нагрузки на обтекатель гребного винта судна «Норильский Никель».

Обтекатель гребного винта представляет полусферу с радиусом 770 мм. Характерные размеры максимального обломка льда (b , l , h_{ice}), попадающего в район пропульсивного комплекса и взаимодействующего с обтекателем ЛГВ, определялись с учетом диаграммы 3.3.1.3 для заданных скоростей судна V_{ship} и толщин ровного льда $h_{ice} = h_{ice}(V_{ship})$, соответствующих диаграмме ледопроеходимости судна. Максимальное значение кинетической энергии $E_{kinetic} = (m_{ice} V_{ship}^2) / 2$

практически соответствует режиму предельной ледопроеходимости, см. рис. 3.3.2.1-1. Для определения экстремальной ледовой силы, действующей на обтекатель гребного винта, предполагается его взаимодействие с обломком льда параллельно поверхности ледового покрова. На рис. 3.3.2.1-2 представлена ледовая сила на обтекателе гребного винта $F_{ice} = (F_{ice}^{cup})_{limit}^{log nit} = f(l)$ в зависимости от глубины его внедрения в лед l . Экстремальное значение ледовой силы определялось из условия (3.3.1.1-1). Расчетное значение экстремальной ледовой силы на обтекатель ЛГВ составляет $[(F_{ice}^{cup})_{limit}^{log nit}]_{design} \cong 800$ т при глубине внедрения в лед $l = 275$ мм и с необходимой точностью соответствует максимальному значению, замеренному в процессе натуральных испытаний.

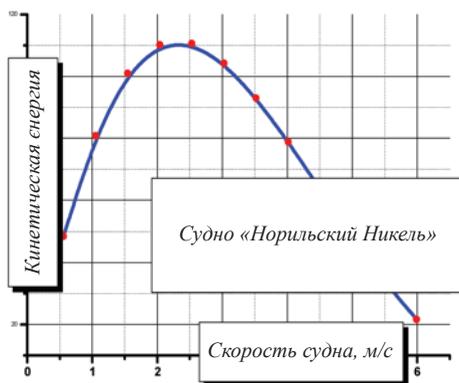


Рис. 3.3.2.1-1
Кинетическая энергия обломка

3.3.2.2 Расчет поперечной ледовой силы на гондолу ВРК судна «Норильский Никель».

Значение кинетической энергии обломка льда аналогично для расчета ледовой нагрузки на обтекатель ЛГВ (см. выше). Расчет поперечной ледовой силы $(F_{ice}^{pod})_{limit}^{transverse}$ выполнялся согласно уравнению (3.3.1.1-2). Результаты расчета $(F_{ice}^{pod})_{limit}^{transverse}$ в зависимости от дистанции разрушения характерного обломка льда представлены на рис. 3.3.2.1-2. Расчетное значение $(F_{ice}^{pod})_{limit}^{transverse} \cong 7$ МН (700 т) получено из условия (3.3.1.1-1) и хорошо согласуется с натурными данными.

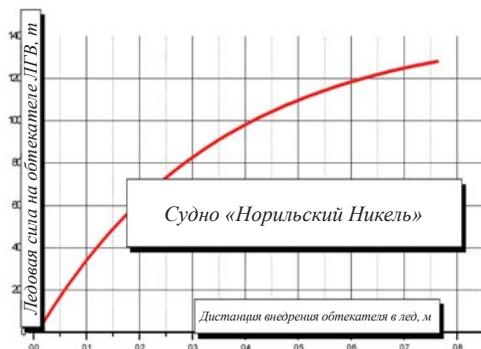


Рис. 3.3.2.1-2
Ледовая сила на обтекателе ЛРВ

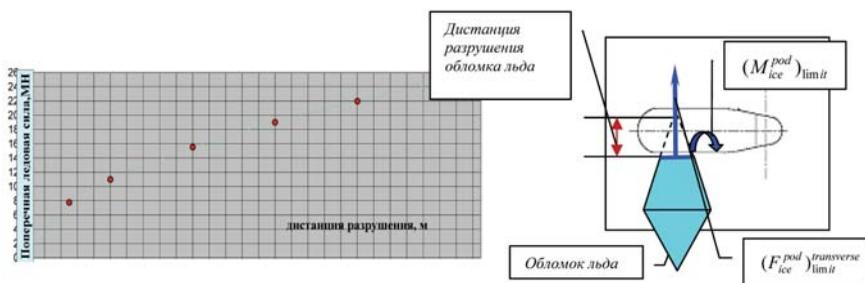


Рис. 3.3.2.2
Поперечная ледовая сила на гондолу ВРК «Azipod» от удара обломка льда из разрушенного корпусом ледового покрова. Судно «Норильский Никель»

Учитывая приемлемое для практического обеспечения прочности соответствие натуральных и расчетных значений ледовых сил, представленная расчетная методика была принята для назначения соответствующих ледовых нагрузок на бортовую ВРК «Azipod» ледокола ЛК-25, пр. 22600.

3.4 Результаты назначения ледовых нагрузок на элементы ВРК арктического ледокола ЛК-25

Результаты представленных исследований были использованы для назначения ледовых нагрузок на элементы ВРК «Azipod» аркти-

ческого ледокола ЛК-25 (пр. 22600), проект которого разрабатывается КБ «Петробалт». Расчет выполнен для перечня нагрузок, представленного в 3.1 и 3.2. Увеличение ледопроеходимости ледокола ЛК-25 в сравнении с судном «Норильский Никель» приводит к росту интенсивности ледовых нагрузок, включая нагрузки от удара обломка льда. Анализ показал, что обтекатель ЛГВ «пробивает» лед на полную возможную глубину, соответствующую его радиусу. Последнее необходимо учитывать для обеспечения прочности указанного элемента ВРК. Для обеспечения прочности ВРК необходимо принимать во внимание «ледокольные» режимы заднего хода, на которых происходит навал льда на стойку гондолы, см. 3.1, нагрузки 6, 7 (рис. 3.1-5). Уровни соответствующих нагрузок 6, 7 могут быть назначены на основе выражения (3.3.1.1-2).

Представленные и апробированные методы назначения ледовых нагрузок не являются консервативными. Расчетные схемы построены на реальных физических моделях. Уровни ледовых нагрузок назначаются применительно к конкретному судну в зависимости от реальных режимов эксплуатации. Это позволяет перейти на более высокий уровень обеспечения безопасной эксплуатации на основе «ледового паспорта». В частности, применительно к ледоколу ЛК-25 пр. 22600 поворот ВРК на режимах форсирования торосов (режим «ramming») должен быть запрещен, так как это может привести к «сверхрасчетным» нагрузкам, при которых обеспечение прочности ВРК невозможно в рамках приемлемых проектных решений.

4 Отработка пропульсивных комплексов в ледовом опытовом бассейне

Модельные испытания в ЛОБ являются одним из наиболее перспективных путей уточнения параметров интенсивности ледовых нагрузок, воздействующих на элементы ПК: гребные винты, лопасти гребных винтов, насадки и т. д. Научно-обоснованный подход к решению этих проблем был заложен и развит В.С. Шпаковым, Ю.Н. Алексеевым, В.А. Беляшовым, О.Н. Беззубиком, А.В. Андриюшиным в ЛОБ ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова [10, 26–32]. Одним из наиболее перспективных типов испытаний является фрезерование льда гребными винтами. Схема испытаний представлена на рис. 4-1 [6, 10]. Указанные испытания имеют большое методологическое и практическое значение, так как позволяют исследовать ледовые нагрузки на ЛГВ в зависимости от угла атаки лопасти, глубины заглубления в лед,

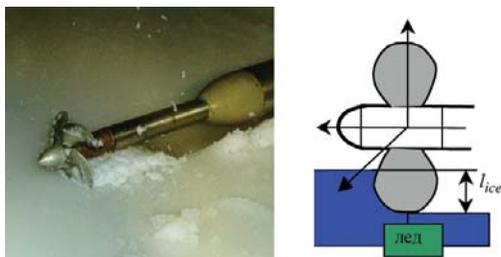


Рис. 4-1

Схема испытаний модели гребного винта в ледовом опытном бассейне ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова на режиме фрезерования льда

прочности льда. В ЛОБ ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова для измерения ледовых нагрузок на гребных винтах и их лопастях используются «винтовые» и «лопастные» динамометры соответственно [31, 32]. Использование «лопастного» динамометра типа 23-ВД6 [31, 32] позволяет определить ледовые нагрузки на лопасти гребного винта (скручивающий и изгибающий лопасть моменты) в функции от времени процесса взаимодействия со льдом. Нагрузки на гребном винте могут быть определены по результатам измерения последних на лопасти с последующим их суммированием в зависимости от угла поворота ЛГВ (лопасти). Пересчет ледовых нагрузок на гребных винтах для режимов фрезерования осуществляется по методике, предложенной в работах [6, 10, 30]. На рис. 4-2 представлены процессы изменения отдельных скручивающего Q_{spind} и изгибающего Q_{bend} лопасть ледовых моментов на лопасти ЛГВ [6, 10] (по данным модельных испытаний в ЛОБ ЦНИИ им. акад. ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова). На рис. 4-3 представлен процесс изменения аксиальной отрицательной ледовой F_{ice} силы (упора) для натурального ЛГВ, полученный на основе модельных нагрузок (см. рис. 4-2) в предположении приложения F_{ice} на относительном радиусе 0,8.

Полученные указанным способом нагрузки на гребном винте могут быть использованы для расчета динамических колебаний системы «гребной винт – главный двигатель». Наряду с принципом пирамидальной прочности усталость от ледовых нагрузок является определяющим фактором для обеспечения прочности элементов пропульсивной установки судов ледового плавания и ледоколов. Применительно к конкретному проекту параметры интенсивности ледо-

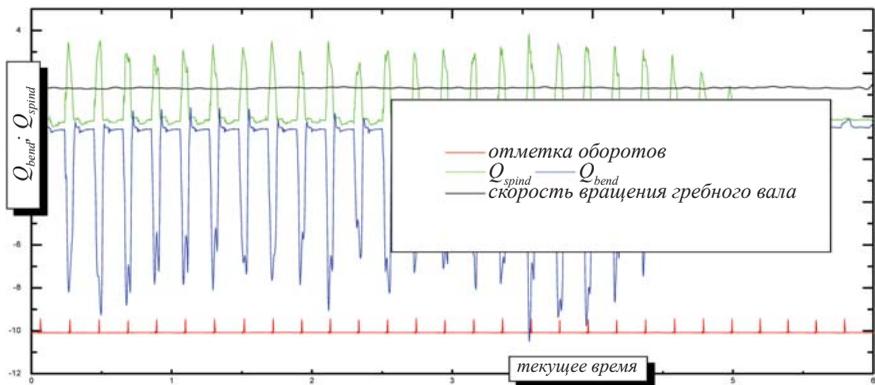


Рис. 4-2
 Процесс изменения изгибающего и скручивающего лопасть ледовых моментов.
 Поступь $J = 0,37$

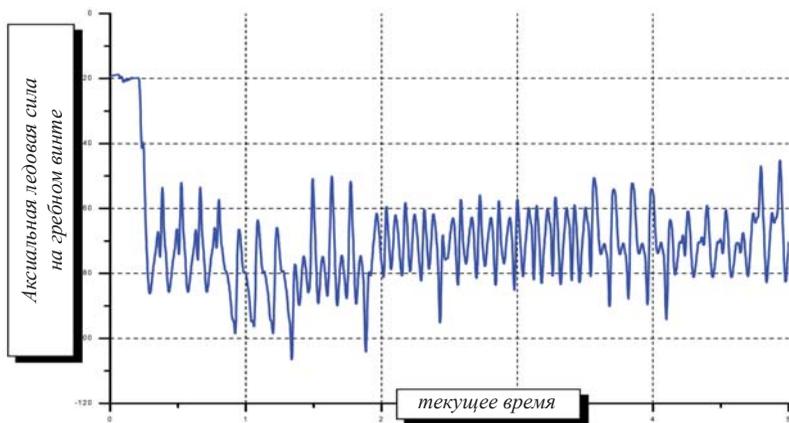


Рис. 4-3
 Процесс изменения аксиальной ледовой силы.
 Поступь $J = 0,37$

вых нагрузок (частота и уровень ледовых нагрузок) для расчетов усталостной прочности, могут быть получены по результатам испытаний

самоходной модели в ЛОБ. В настоящее время указанные испытания нашли широкое применение для отработки движительного комплекса (см. разд. 3 настоящей статьи), в частности элементов его ледовой защиты от воздействия льда. На рис. 4-4 представлено статистическое распределение натуральных и модельных ледовых моментов сопротивления льда вращению бортового гребного винта ледокола Арктика [6]. Точность натурального прогноза ледовых нагрузок по модельным данным в ЛОБ соответствует требованиям современного проектирования.

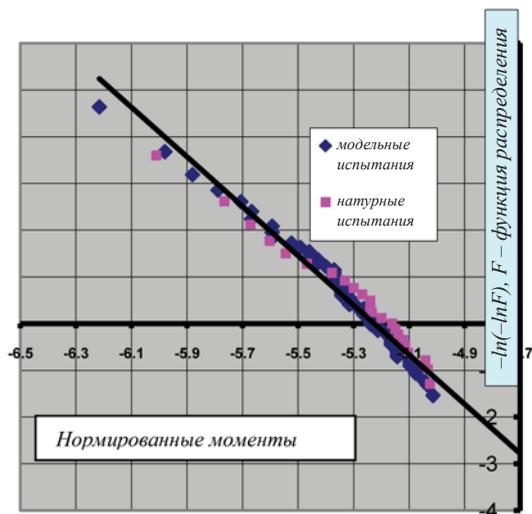


Рис. 4-4

Распределение натуральных и модельных нормированных ледовых моментов на бортовом гребном винте ледокола «Арктика». Толщина льда $h_{ice} = 2$ м

Заключение

В данной работе изложены основные результаты исследований по развитию уточненных методов отработки пропульсивных комплексов судов ледового плавания и ледоколов, которые выполняются РС совместно с ведущими проектными и научными организациями. В рамках статьи освещены современные методы обеспечения прочности лопастей ЛГВ. Представлены уточненные модели задания распреде-

ленной ледовой нагрузке (контактного ледового давления) на поверхность лопасти для режимов фрезерования льда. Разработка соответствующих моделей контактного ледового давления дает возможность значительно детализировать НДС лопасти на основе МКЭ, включая ее кромки. Выполнение уточненных расчетов прочности кромок лопастей позволяет отработать новые варианты их профилировки с целью значительного улучшения эксплуатационных характеристик ЛГВ.

Обеспечение эксплуатационной прочности ледокольных ВРК и соответственно определение ледовых нагрузок, воздействующих на ее элементы, являются одними из наиболее важных и актуальных задач современного ледоколостроения. РС совместно с КБ «Петробалт» и фирмой АВВ выполнен цикл работ по разработке современных методов назначения ледовых нагрузок на элементы бортовой ВРК «Azipod» арктического ледокола ЛК-25, категория **Icebreaker8**. Исследования выполнялись на базе комплексного подхода, включающего разработку расчетных методов, выполнение испытаний в ЛОБ для детализации режимов взаимодействия ВРК со льдом. Разработанные расчетные схемы были верифицированы результатами натурных измерений ледовых нагрузок на ВРК «Azipod» судна «Норильский Никель». Точность расчетного назначения ледовых нагрузок соответствует требованиям современного проектирования.

Анализ проектирования арктического ледокола ЛК-25 указывает на целесообразность выполнения специализированных испытаний самоходных моделей в ЛОБ для отработки ПК судов ледового плавания и ЛК. В статье выполнен обзор методов проведения модельных испытаний в ЛОБ для решения указанной задачи.

Представленные в статье методы могут быть рекомендованы проектным организациям для отработки пропульсивных комплексов ледокольных судов и обеспечения эксплуатационной прочности их элементов в дополнение к действующим требованиям РС. Применение указанных методов допускается по согласованию с РС в рамках специального рассмотрения.

Список литературы

1. Collection of Regulating Documents, Book Twelve // Russian Maritime Register of Shipping, Saint-Petersburg, 2004.
2. Evenko V.I., Sergeev A.A., Andryushin A.V. New Machinery Installation Requirements of the Russian Maritime Register of Shipping for Ice Ships and Icebreakers // Arctic Shipping 2009, Helsinki, 2009. 27–29 April.

3. DNV Rules for classification of Ships, Part 5, Chapter 1 Ships for Navigation in Ice, Section 4 Vessels For Arctic and Icebreaking Service.

4. Апполонов Е.М., Дидковский А.В., Кутейников М.А., Нестеров А.Б. Совершенствование методологии определения ледовых нагрузок // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – Вып. 25. – СПб., 2002. – С. 83 – 100.

5. Регламентация величины и повторяемости расчетных нагрузок на обтекатели для оценки усталостной прочности элементов пропульсивной линии азимутальных пропульсивных систем современных судов ледового плавания и ледоколов, включая суда двойного действия. Подготовка проекта требований РС к ледовым нагрузкам на обтекатель ступицы гребного винта в обеспечение требований к прочности элементов пропульсивной линии винторулевых колонок современных судов ледового плавания и ледоколов, сопоставление разработанного проекта требований РС с требованиями норвежского веритаса // Научно-технический отчет ГНЦ РФ ФГУП «ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова». – Вып. 44636. – 2008.

6. Андрияшин А.В. Теория взаимодействия гребного винта со льдом. Обеспечение эксплуатационной прочности элементов пропульсивного комплекса судов ледового плавания и ледоколов : диссертация на соискание ученой степени д.т.н. – СПб.: СБМГТУ, 2007.

7. Андрияшин А.В. Ледовые нагрузки для расчета местной прочности лопастей ледокольных гребных винтов // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – Вып. 26. – СПб., 2003. – С. 93 – 138.

8. Андрияшин А.В. Ледовые нагрузки на лопастях гребных винтов ледоколов и судов ледового плавания // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского технического университета. – 2006. – № 2. – С. 209 – 216.

9. Андрияшин А.В., Лемус Н.Д. Анализ опыта эксплуатации гребных винтов арктических ледоколов и разработка критериев их усталостной прочности // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – Вып. 26. – СПб., 2003. – С. 108 – 138.

10. Андрияшин А.В., Беззубик О.Н., Бицуля А.В., Гаппоев М.А. Ледовые нагрузки для расчета прочности ледокольных гребных винтов // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – Вып. 23. – СПб., 2000. – С. 162 – 179.

11. Игнатьев М.А. Гребные винты судов ледового плавания. Приложения I–VI. – Л.: Судостроение. – 1966. – 114 с.

12. Belijashov V.A. Method for calculating ice loads encountered by propeller blades // The 12th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC –93). – Hamburg, 1993, August 17–20. – Proceedings. – Vol. 2. – P. 359 – 368.

13. Беляшов В.А., Шпаков В.С. О механике разрушения льда лопастями гребных винтов // Механика и физика льда. – М.: Наука, 1983. – С. 21–29.

14. Soinenen H. A propeller-ice contact model Dissertation for the degree of Doctor of Technology // VTT technical research centre of Finland. – Espoo. – 1988. – 116 p.

15. Veitch B. Predictions of Ice Contact Forces on a Marine Screw Propeller During the Propeller-Ice Cutting Process // Acta Polytechnica Scandinavia, Mechanical Engineering Series № 118, Helsinki 1995, 140 p.

16. Курдюмов В.А., Хейсин Д.Е. Гидродинамическая модель удара твердого тела о лед // Прикладная механика. – Киев, 1976. – Т. XII. – № 10. – С. 103 – 109.

17. Андрияшин А.В., Бойцов Г.В., Голубев В.С., Кацман Ф.М. Методы оценки напряженного состояния лопастей гребных винтов для ледовых крупнотоннажных танкеров с целью разработки требований к их прочным размерам //

Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – Вып. 25. – СПб., 2002. – с. 121 – 146.

18. Balji C. Menon, Ian F. Glen, Ian M. Baily Analysis and design of Steering System components for Arctic Class Ships – SNAME, Transactions, Vol. 94, 1986, pp. 75–91.

19. Fredercing R. Effect of scale on the Indentation resistance of ice//POAC 93, Vol. 1, P. 37 – 48.

20. Богородский В.В., Гаврило В.П. Лед. Физические свойства. Современные методы гляциологии. – Л.: Гидрометеоиздат, 1981. – 384 с.

21. Kovacs A. Comparison of axial double-balland uniaxial unconfined compression test on freshwater and sea ice samples // POAC 93, Volume 1. – P. 73–84.

22. J. Kamarainen. Studies in ice mechanics – Helsinki University of Technology, Research Reports, № 15, June 1993.

23. Ледяные образования морей западной Арктики. – СПб.: ААНИИ, 2006.

24. Enkvist E. On the ice resistance Encountered by ships operating in the continuos mode of icebreaking – The Swedish Academy of engineering Sciences in Finland. Report № 24. – 1972.

25. Алексеев Ю.Н., Сазонов К.Е., Шахаева Л.М. Оценка составляющей полного ледового сопротивления, зависящей от разрушения льда // Вопросы судостроения. Серия: Проектирование судов. – Вып. 32. – 1982.

26. Беляшов В.А., Андрушин А.В. Методы экспериментальных исследований ледовых нагрузок на движителях ледоколов и судов ледового плавания // Судостроение за рубежом. – 1986. – Вып. 11.– № 239. –16 с.

27. Беляшов В.А., Андрушин А.В., Бицуля А.В., Семенова И.Н. К вопросу о прогнозировании ледовых нагрузок в системе «двигитель-валопровод» судов ледового плавания по результатам самоходных испытаний в ледовом опытовом бассейне // Сборник ВНТО им. акад. А.Н. Крылова.– 1992. – Вып. 532.– СПб.: Судостроение.– С. 32 – 39.

28. Беляшов В.А., Андрушин А.В., Бицуля А.В. Методы пересчета результатов модельных исследований ледовых нагрузок на движителях на натуре // Проектирование, теория и прочность судов, плавающих во льдах : межвузовский сборник научных трудов. – Н.Новгород. – 1992. – С. 23 – 34.

29. Беляшов В.А., Андрушин А.В., Бицуля А.В. Прогнозирование ледовых нагрузок на открытых гребных винтах и винтах в насадках по результатам испытаний самоходных моделей в ледовом опытовом бассейне // Труды Первой международной конференции «Освоение шельфа арктических морей России». – М.– 1994. – С. 220–225.

30. Андрушин А.В. Проектирование и отработка движительно-рулевых комплексов судов ледового плавания и ледоколов по результатам экспериментальных исследований [текст] : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук : выполнена в ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. – СПб.: Государственный Морской технический университет. – 1995. – 254 с.

31. Беззубик О.Н., Шпаков В.С. Экспериментальные средства для модельных и натуральных исследований ледовых нагрузок, возникающих при взаимодействии движителей со льдом – Проектирование, теория и практика судов, плавающих во льдах // Межвузовский сборник научных трудов. – Нижний Новгород, 1992.

32. Алексеев Ю.Н., Беззубик О.Н., Беляшов В.А., Шпаков В.С. Экспериментальные возможности нового ледового опытового бассейна ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова – Судостроительная промышленность. Серия: Проектирование судов, вып. 13, 1989.

УДК 629.5.014:629.564.7

В.Г. Макаров, Г.В. Мохов

РАСШИРЕНИЕ МОНИТОРИНГА КОНТИНЕНТАЛЬНОГО ШЕЛЬФА СУДАМИ СЕЙСМИЧЕСКОЙ РАЗВЕДКИ ПОСЛЕ ИХ МОДЕРНИЗАЦИИ

Перспектива истощения запасов углеводородного сырья на континентальной части России ставит задачу освоения нефтегазового потенциала российского арктического шельфа, занимающего площадь порядка 3 млн км² и содержащего в своих недрах до 13 млрд т нефти и 73 трлн м³ газа. Одновременно доказывается принадлежность большей части арктического шельфа именно России, для чего выполнен рейс научно-исследовательского судна (НИС) «Академик Федоров» под проводкой атомного ледокола «Россия» к Северному полюсу в августе 2007 г. с целью определения границ отечественного шельфа, а также подача России в ООН в мае 2009 г. документов, обосновывающих расширение наших внешних границ континентального шельфа.

Работы по освоению шельфовых месторождений первыми начинают научно-исследовательские суда сейсмической разведки, оборудованные комплексом геофизического оборудования (сейсмокомплексом) – источником сейсмических колебаний (ИСК), приемным устройством (сейсмокошой) и регистрирующей аппаратурой (рис. 1).

Такие суда широко используются во всем мире для поиска запасов углеводородного сырья на морском дне. В настоящее время за рубежом геофизические суда строятся серийно и обладают высокими техническими характеристиками. Например, сейчас строится девятое судно серии судов типа «Ramform» (Норвегия), стоимость которого без учета стоимости сейсмического оборудования и компьютеров составляет 88 млн долларов. Особенностью судов этой серии является

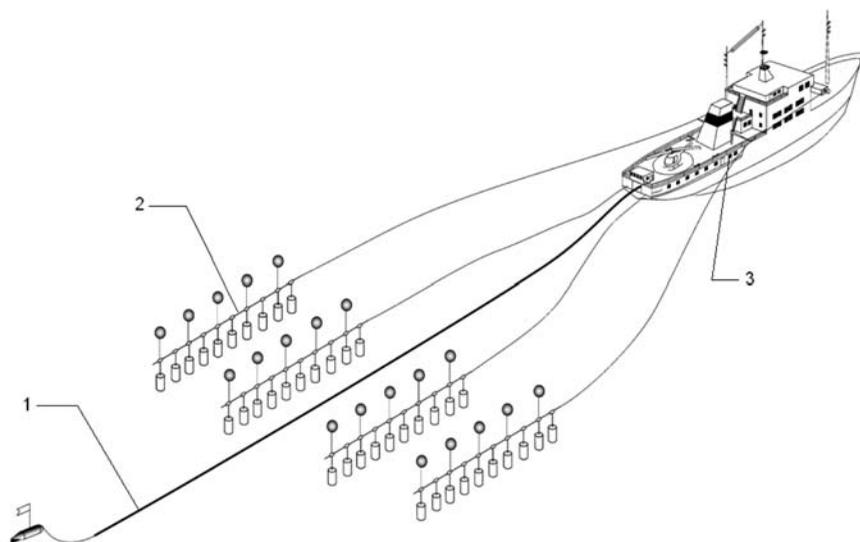


Рис. 1
 Геофизическое судно буксирует ИСК и сейсмокосу
 1 – сейсмокоса, 2 – элемент ИСК,
 3 – регистрирующая аппаратура в геофизической лаборатории

«треугольная» форма корпуса: при длине 82 м максимальная ширина его составляет 39 м (рис. 2).

Эти суда способны одновременно буксировать как разветвленный ИСК, так и до 22 сейсмических кос длиной до 6 км каждая. Одно из судов этой серии «Maryata-2» – является кораблем радиолокационной разведки ВМФ Норвегии и постоянно отслеживает деятельность сил Северного флота России.

В России суда сейсмической разведки были представлены в основном приспособленными для задач геофизики отечественными рыболовными судами пр. 388М и пр. 1615, а также специализированными геофизическими судами пр. В-93, судами-катамаранами пр. 3870 польской постройки и геофизическими судами финского производства. Эти суда, построенные еще в 80-х годах прошлого века, за прошедший с момента постройки период времени были либо списаны (пр. 388М, пр. 1615), либо неоднократно модернизированы и именно поэтому находятся в рабочем состоянии вплоть до настоящего времени.



Рис. 2
Геофизическое судно типа «Ramform»

Подробное изучение и анализ отечественного и зарубежного опыта эксплуатации судов сейсмической разведки на разных этапах жизненного цикла, их модернизации, проводимой в соответствии с нормативными требованиями Регистра, учет обеспечения необходимой эффективности и качества проведения геофизического мониторинга позволили разработать методику модернизации судов сейсмической разведки. Модернизационные работы, которые стали проводиться на основе этой методики, позволили существенно расширить возможности таких судов по мониторингу континентального шельфа, в том числе арктического.

Методика состоит в выполнении следующих этапов работ по модернизации судов сейсморазведки:

1 – выполнение анализа планируемых геофизических работ и определение в связи с этим наличия на борту судна необходимого оборудования, а также потребности в его модернизации, определение номенклатуры нового геофизического оборудования для установки на модернизируемое судно;

2 – выявление потребности в дополнительных площадях и объемах судовых помещений для размещения на судне нового или модер-

низированного сейсмического оборудования, выполнение корпусных работ по наращиванию бортов и закрытию их палубами;

3 – определение необходимого количества буксируемых сейсмокос, их протяженности и расстояния между ними и крайними косами при буксировке;

4 – оценка требуемой буксировочной мощности судна для возможности выполнения работ с новым сейсмокомплексом;

5 – обеспечение требуемой мощности источника сейсмических колебаний и определение необходимого количества компрессоров воздуха высокого давления (ВВД) для установки на судно, проведение необходимых модернизационных работ в системе ВВД;

6 – разработка технологии спускоподъемных операций модернизированного сейсмокомплекса с учетом способа отведения и расстановки сейсмокос;

7 – обоснование наличия ледовых подкреплений корпуса судна с учетом перспективности исследований в Арктических и Дальневосточных морях;

8 – доведение автономности модернизируемого судна не менее чем до 60 сут. за счет введения смены экипажей в море, повышения надежности машин и механизмов, переоборудования части балластных цистерн в топливно-балластные, дозаправки судна топливом в море;

9 – принятие мер по обеспечению допустимых уровней гидродинамического шума, создаваемого судном и судовым оборудованием на ходу;

10 – дооборудование судов сейсмической разведки относительно малого водоизмещения вертолетным комплексом для улучшения обзора акватории и разведки ледовой обстановки при мониторинге углеводородного сырья на шельфе, а также для надежной связи с береговой инфраструктурой;

11 – разработка принципиальной технологии комплексной модернизации геофизических судов, позволяющей проводить работы как на отечественных, так и на зарубежных верфях;

12 – определение влияния модернизационных мероприятий на изменение основных проектных характеристик;

13 – оценка соответствия геофизического судна действующим международным конвенционным требованиям и устранение возможного несоответствия;

14 – проверка тактико-технических характеристик (ТТХ) модернизированных геофизических судов в ходе швартовных и, при необходимости, сдаточных испытаний.

Структурная схема, соответствующая предлагаемой методике модернизации, представлена на рис. 3.

Выполнение любых модернизационных работ возможно только при наличии проектно-конструкторской документации, причем эта документация должна быть на определенных стадиях разработки согласована с РС, Санитарной инспекцией, горнопромышленным надзором и др. Разработка конструкторской документации базируется на безусловном выполнении государственных и отраслевых стандартов. При этом следует учитывать, что принимаемые конструкторами решения по изменению или усовершенствованию той или иной конструкции зачастую бывают уникальными, т. е. обладают существенными признаками новизны.

Приведем несколько примеров модернизации судов сейсмической разведки, приписанных к порту Мурманск.

Суда проекта В-93 были подвергнуты модернизации практически сразу после постройки. В данной статье рассматриваются модернизационные работы только по корпусу и механическому оборудованию.

Расположенный на открытой палубе в кормовой части судна рамный ИСК был заменен новым, состоящим из четырех линейных пневматических излучателей (ЛПИ). Для этого палуба бака была продолжена по всей ширине судна, а пространство между верхней палубой и палубой бака зашито по линии бортов. Таким образом, на судне образовалось новое, закрытое с трех сторон помещение – ангар, простирающийся от 45 шп. ПрБ и от 65 шп. ЛБ до кормового среза судна, где работа с ИСК стала безопасной, чему способствовало вновь спроектированное спускоподъемное устройство, предусматривающее работу только с кормы. Для удобства работы с ЛПИ и сейсмической косой на корме судна в районе 1 ... – 6 шп. палубы бака была установлена специально спроектированная рубка. Круговое остекление рубки позволило осуществить обзор обстановки за кормой судна и на палубе бака. Входы в рубку предусматривались с верхней палубы и палубы бака.

Таким образом, был предложен и осуществлен на практике переход от работы с рамным ИСК, расположенным на открытой палубе, к работе с ИСК, состоящим из ЛПИ и расположенным на почти полностью закрытой палубе. В этом варианте значительно повысилась безопасность работ. Впредь подобная конструкция стала применяться на всех отечественных геофизических судах при их модернизации.

Разработанный проект был рассмотрен и согласован Мурманским филиалом РС, внедрение проекта модернизации на судне «Академик Лазарев» осуществлялось на СРЗ «Нерпа» (рис. 4).

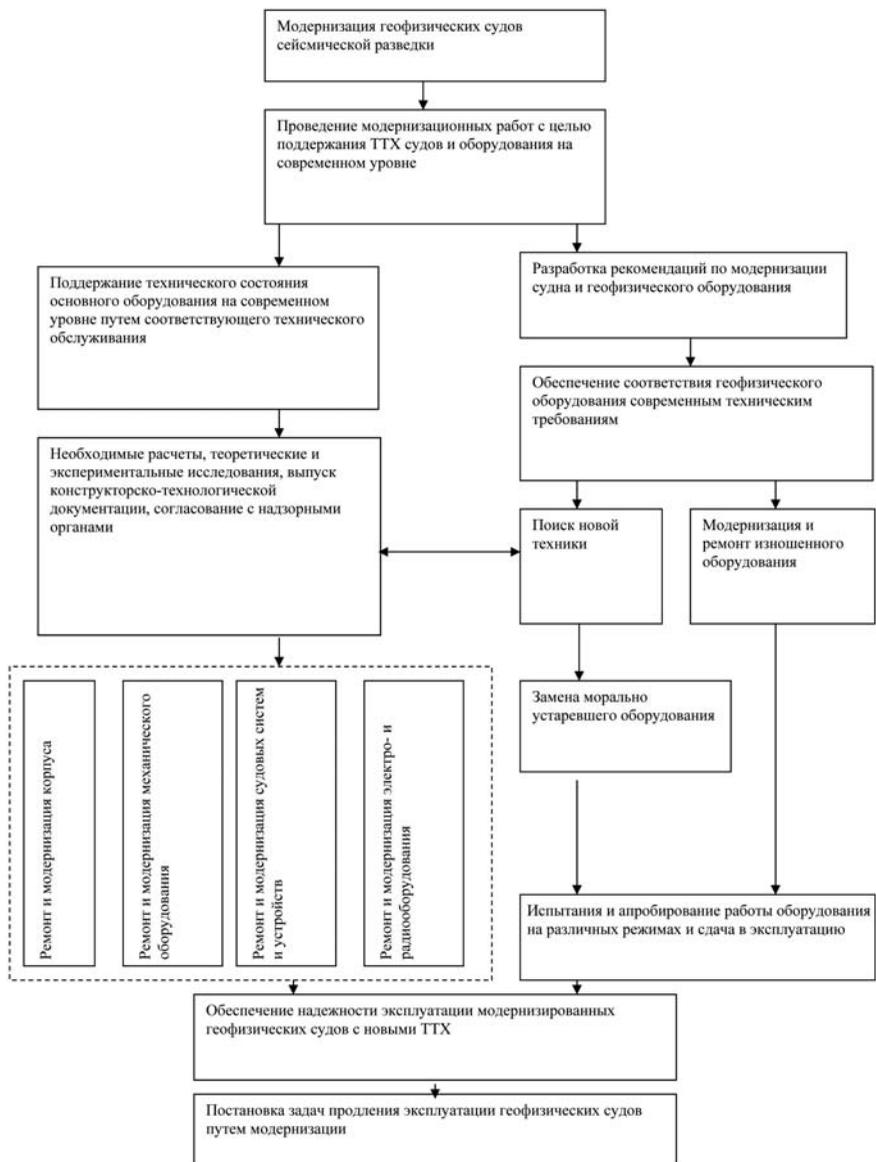


Рис. 3

Структурная схема модернизации геофизических судов сейсмической разведки

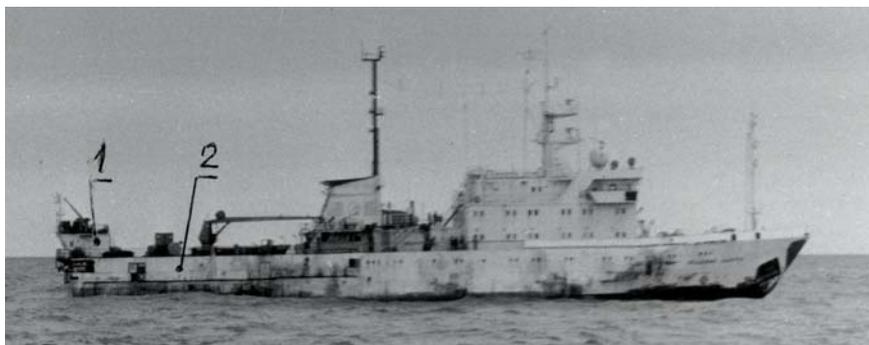


Рис. 4
НИС «Академик Лазарев» после модернизации
1 – кормовая рубка; 2 – бортовая обшивка ангара

На последующих этапах модернизации, реализация которых в силу сложившихся обстоятельств выполнялась на зарубежных верфях, на судах этого проекта были установлены мощные дизель-компрессоры фирмы LMF, обеспечивающие работу модернизированного ИСК. Размещение компрессоров выполнялось по разным вариантам: от установки контейнерного варианта компрессоров на открытой палубе бака в районе 0...20 шп. (НИС «Академик Лазарев») до размещения компрессоров на втором дне судна в районе 60...75 шп. (НИС «Академик Шатский» и НИС «Академик Немчинов»). Работа ИСК стала осуществляться с интервалом 6 с.

Эти суда в процессе модернизации были дооборудованы вертолетным комплексом для обеспечения оперативной доставки получаемых сейсмических материалов в береговые обрабатывающие центры и выполнения ряда других операций (доставка членов экипажа или необходимых грузов, ледовая разведка). Посадочная площадка вертолета (ППВ) шириной 14,8 м была размещена на уровне палубы рубки в районе 5...20 шп. На НИС «Академик Наметкин» (впоследствии «Геоарктик») ширина ППВ была увеличена по рекомендации авиаторов до 20 м за счет двух бортовых крыльев шириной по 3 м, которые могли складываться в случае швартовки. И хотя базирование вертолета на судне не предусматривалось, суда были оборудованы приспособлениями, системами и средствами навигации и связи по всем авиационным требованиям. Здесь уместно заметить, что основной труд-

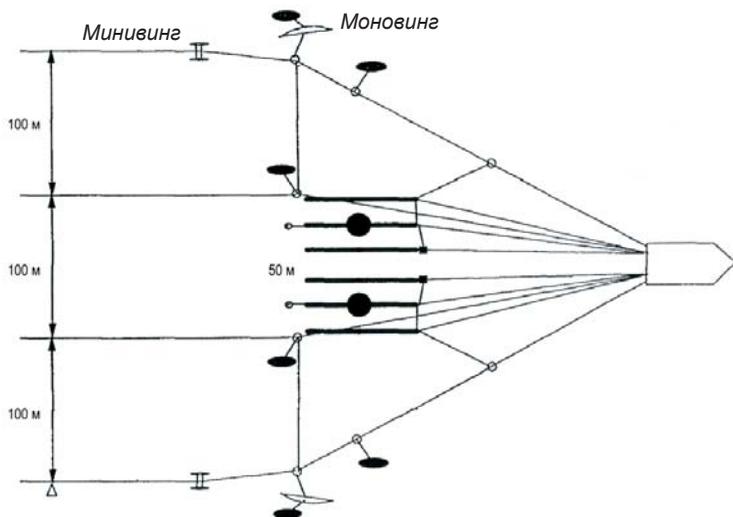


Рис. 7
Система буксировки сейсмического оборудования на НИС «Академик Немчинов» после модернизации

бедка для бакштовного троса и шланговая лебедка, предназначенные для бесконтактной бункеровки топливом.

Модернизация каждого из судов пр. В-93 осуществляется на протяжении уже значительного промежутка времени, переоборудование выполняется на зарубежных судоремонтных предприятиях. Вследствие этого некогда практически одинаковые суда имеют в настоящее время неоднородный состав и различное расположение геофизического оборудования, что выразилось даже в архитектурно-конструктивном оформлении кормовой части этих судов.

В процессе модернизации судов пр. 650 была коренным образом изменена конструкция кормовой части этих судов. В междупалубном пространстве судна «Профессор Полшков» после установки спонсонов на главную палубу, расширившую ее до 12 м по всей длине от 5 до 15 шп., между главной и верхней палубами был обустроен ангар, в котором разместился ИСК из четырех ЛПИ (рис. 9). На верхней палубе была установлена дополнительная часть сейсмокосы длиной 2000 м на специальной лебедке, отводители для бортовых ЛПИ. На второй палубе были размещены мощный компрессор ВВД фирмы

LMF для обеспечения работы ИСК и инсинератор для сжигания бытового мусора. На судне «Геолог Дмитрий Наливкин» была существенно модернизирована топливная система – предусмотрена возможность принять в балластные танки дополнительно 125 т топлива. Это позволило осуществлять контрактные работы без дополнительных заходов в порт для бункеровки.

Суда пр. 3870 в процессе модернизационных работ были оснащены новым ИСК из четырех ЛПИ с установкой гидравлических лебедок для каждого ЛПИ и отводителей для бортовых ЛПИ, дополнительными компрессорами ВВД для работы ИСК, опреснителем, дополнительными цистернами для топлива и пресной воды и т. д.

Некоторые НИС сейсмической разведки после модернизации показаны на рис. 9 – 11.

Модернизационные работы позволили существенно повысить эффективность работы судов сейсмической разведки, но вместе с тем вновь установленное оборудование за счет своих массогабаритных характеристик привело к увеличению осадки судна, приблизив ее к максимально допустимой, т. е. проведенная модернизация в ряде случаев достигла своего предела.

Модернизация судов сейсмической разведки существенно затронула вопросы соблюдения требований МК МАРПОЛ 73/78, СОЛАС-74 и соответствующих Правил РС. Практически на всех упомянутых судах были заменены на более совершенные сепараторные установки для очистки нефтесодержащих вод, выполнены соответствующие изменения в системах трубопроводов, на части судов были установлены новые установки по обработке сточных вод, на всех судах проведены работы по модернизации систем сбора и удаления мусора.

В период строительства геофизических судов пр. В93 снабжение их спасательными средствами осуществлялось согласно требованиям части II «Спасательные средства» Правил по конвенционному оборудованию морских судов РС (изд. 1985 г.). На основании действовавших правил судно пр. В-93 с экипажем в 60 чел. (31 член экипажа и 29 научных специалистов) было оборудовано всеми необходимыми спасательными средствами. За прошедший с начала эксплуатации судов сейсмической разведки срок взамен упомянутых правил были введены в действие Правила по оборудованию морских судов (изд. 1995 г.), и наличие спасательных средств на судах стало носить альтернативный характер. Так, на судне могут находиться либо спасательные шлюпки, либо спасательные плоты необходимой вместительности, введено дополнительное понятие «скоростная дежурная шлюпка».

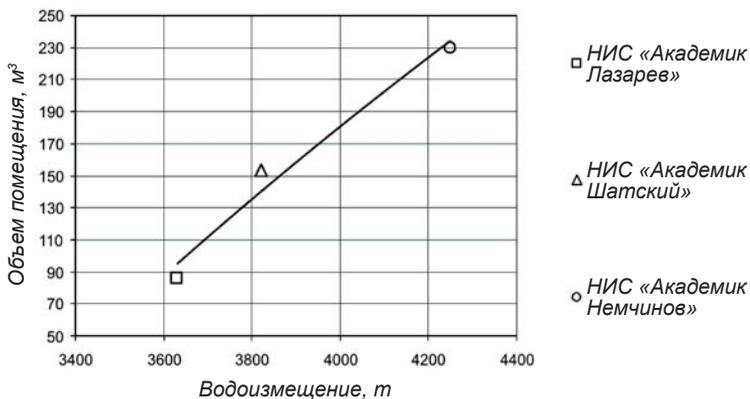
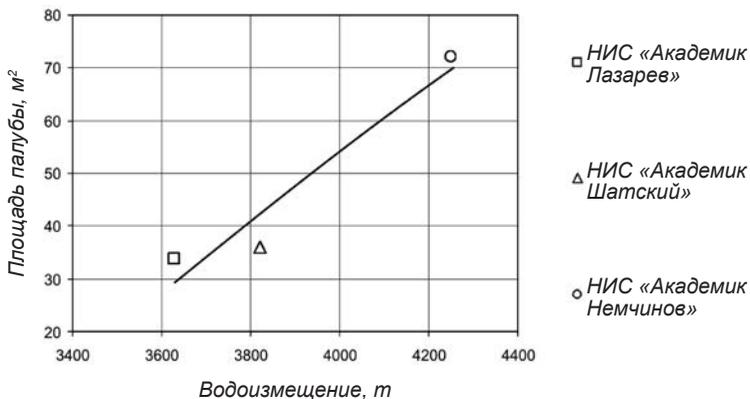


Рис. 8
Площади и объемы помещений размещения нового сейсмооборудования на различных судах сейсморазведки

Эти изменения позволили судовладельцам провести необходимую замену существующих на судах спасательных средств. При этом освободились значительные палубные пространства для размещения дополнительного оборудования. Например, на судне пр. В-93 «Геоарктик» произведена установка побортно двух скоростных дежурных шлюпок «22 Workboat» на 35...60 шп. палубы бака на гидравлических шлюпбалках с одноточечным подвесом шлюпки, легким и безопасным в эксплуатации. На этом судне используется сейсмокоса длиной до



Рис. 9
НИС «Профессор Полшков» после модернизации



Рис. 10
НИС «Профессор Полшков»
(видны спонсоны в кормовой части и открытый кормовой срез судна)



Рис. 11

НИС «Искатель-5».

Вид в нос по ПрБ. Видны:

направляющие для ЛПИ; выстрел ПрБ; гидравлическая двухбарабанная лебедка ПрБ

12 км, поэтому крайне важно иметь на борту скоростные дежурные шлюпки для быстрого решения вопросов, возникающих с косой в процессе проведения геофизических работ (устранение неисправностей, зацепы косы, пересечение курса косы другими судами и т. п.). На других НИС этого проекта также установлены скоростные дежурные шлюпки. Одновременно взамен одной демонтированной спасательной шлюпки увеличено количество надувных спасательных плотов.

Разработка технической документации для модернизации судов сейсмической разведки проводилась в конструкторских бюро Мурманска. При этом документация была разработана в таком виде, что ее после согласования с мурманским филиалом РС судовладельцы могли использовать при модернизации судов как на отечественных, так и на зарубежных верфях.

Результаты работ с использованием предложенной методики обеспечили увеличение производительности модернизационных работ судов сейсмической разведки, позволили продлить их нахождение

в море без заходов в порт для выполнения полного цикла геофизических исследований, обеспечили соответствие судов действующим конвенционным правилам и нормативам. Все суда сейсмической разведки, приписанные к порту Мурманск и прошедшие соответствующие модернизационные работы, имеют в настоящее время необходимые документы РС и востребованы для проведения геофизических работ как в России, так и за рубежом.

Список литературы

1. Макаров В. Г. Буксируемая система забора проб воды // Совершенствование конструкций судовых систем: Труды ЛКИ.– Л.: ЛКИ, 1987. – С. 56 – 67.
2. Мохов Г. В. О модернизации геофизических судов // МГТУ «Наука и образование 2005»: материалы междунар. науч.-техн. конф. (Мурманск, 6–14 апреля 2005 г.): в 7 ч. / Мурман. Гос. техн. ун-т. – Мурманск, 2005. – ч. 7. – С. 236 – 238.
3. Мохов Г. В. О некоторых требованиях к новому геофизическому судну // Вестник МГТУ. Труды Мурманского государственного технического университета, том 9, № 2 / Мурман. Гос. техн. ун-т.– Мурманск, 2006. – С. 337 – 339.
4. Борисов Р. В. Морские инженерные сооружения. Ч. I. Морские буровые установки: Учебник. / Р.В. Борисов, В.Г. Макаров, В.С. Никитин и др. – СПб.: Судостроение, 2003. – 535 с.

УДК 517.977:517.938:629.5.067

А.Е. Сазонов

НЕЙРОТЕХНОЛОГИИ: НАСТОЯЩЕЕ И БУДУЩЕЕ

В последние десятилетия прошлого века широкое развитие получило использование нейротехнологий в различных областях науки и техники. Наибольшие достижения в этой области достигнуты в области создания интеллектуальных систем управления, в том числе и в системах управления подвижными объектами. Это новое направление развития теории управления получило название нейроуправление. Основой построения этих систем являются нейронные сети.

В настоящей статье нет необходимости останавливаться на теории построения нейронных сетей и методах их обучения. По этому вопросу в настоящее время уже существует достаточное количество специальной литературы, которая и позволяет получить о них достаточно подробную информацию [1, 2, 3, 4].

Анализ уже существующих систем нейроуправления позволяет назвать основные условия, которые определяют целесообразность его применения. Можно назвать два основных, это:

наличие нечеткой постановки задачи и

существующий нелинейный характер поведения самого управляемого объекта.

Нечеткий характер постановки задач, прежде всего, зависит от следующих причин:

невозможно четко определить физическое или статистическое состояние объекта управления;

существует значительное рассеивание наблюдаемых исходных данных;

алгоритм, реализующий обработку исходных данных, носит нелинейный характер.

Использование принципов нейроуправления при построении интеллектуальных систем обработки сигналов позволяет:

учитывать нелинейность поведения объекта управления путем извлечения статистики более высокого порядка из исходной информации;

обучить систему управления объектом физическому механизму поведения среды его эксплуатации и адаптировать его к ее физическим и статистическим изменениям, создать условия для самоорганизации системы управления.

Эти преимущества нейроуправления имеют большое значение при создании адаптивных систем обработки сигналов в системах управления подвижными объектами (летательные аппараты, космические корабли, морские суда и др.).

Применительно к системам судовой автоматизации системы нейроуправления разрабатываются или уже используются при построении:

навигационных фильтров, используемых в навигационных интегрированных системах [5];

адаптивных авторулевых [3];

адаптивных регуляторов шага винта [6];

адаптивных систем управления, обеспечивающих совместное управление шагом винта и регулятором работы судового дизеля с целью оптимизации его рабочих процессов. Судя по литературным материалам, оптимизация осуществляется по оценке отношения расхода топлива к уровню выделяемых в выхлопных газах оксидов азота [6].

Насколько известно автору этой статьи, в последнее время, судя по докладам на различных научных конференциях и статьям в научных трудах различных классификационных обществ, проявляется интерес к оценке влияния нейротехнологий на безопасность судна.

Надо полагать, что в недалеком будущем следует ожидать включения в правила классификационных обществ специальных разделов, регламентирующих использование нейротехнологий в процессе проектирования, строительства и эксплуатации судов и других плавучих объектов. В первую очередь это коснется использования нейронных сетей в системах нейроуправления.

Прежде чем сделать заключение о возможном влиянии систем нейроуправления на безопасность судна, следует познакомить читателя с основными принципами построения систем нейроуправления и сделать попытку оценить недостатки и преимущества этих систем

по сравнению с действующими классическими методами построения систем управления.

Известно, что при использовании традиционных методов в основном приходится использовать теорию линейных систем. Сами же объекты управления являются нелинейными. Использование принципов нейроуправления позволяет рассматривать объекты управления как нелинейные. Это является одним из основных преимуществ нейроуправления.

Ради справедливости следует отметить, что и при использовании традиционных методов управления существуют различные способы учета нелинейности объектов управления. Достаточно назвать следующие известные в теории управления методы:

- использование пропорциональных интегрально-дифференциальных регуляторов (ПИД-контроллеров);

- создание систем управления с самонастройкой (адаптивные системы) и систем стабилизации, обеспечивающих прогнозирование законов управления в зависимости от изменения среды существования объекта управления.

В последнее десятилетие в Японии и частично в США получили также развитие системы управления с использованием аппарата нечеткой логики. Однако необходимо отметить, что областью использования этих систем управления пока является, в основном, бытовая техника [1].

Из названных традиционных методов управления наибольшее распространение на судах получили ПИД-схемы управления, благодаря простоте их структуры и их надежности. Развитием этих схем на судах являются адаптивные схемы управления. При проектировании этих схем управления всегда приходится решать две задачи:

- оценивать текущее состояние процесса и
- определять законы прогнозирования ситуации.

Эти задачи реализуются, например, во всех адаптивных навигационных фильтрах в интегрированных навигационных системах, основой построения которых является алгоритм фильтра Калмана.

Однако все эти традиционные методы обладают существенными недостатками, так как при изменении внешних сил, воздействующих на объект управления, они требуют перенастройки. Примером этого может служить система стабилизации судна на курсе, где оператору приходится менять параметры системы в зависимости от изменения внешних сил, воздействующих на судно, и его собственных характеристик.

На рис. 1 приводится традиционная обобщенная схема систем адаптивного управления.

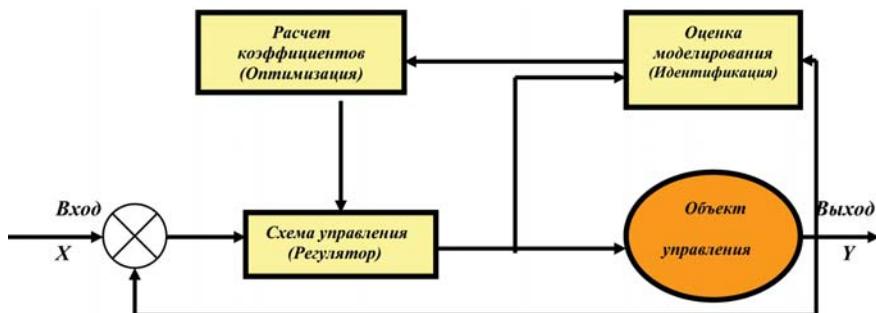


Рис. 1

Обобщенная блок-схема традиционной системы адаптивного управления

Традиционными системами управления являются и многомерные ПИД-регуляторы со многими переменными.

Но и в многомерных схемах адаптивного управления мы встречаемся с нелинейностью, изменением динамики объекта управления во времени, наличием стохастических возмущений и изменяющимися временными задержками. Следует также прибавить решение задачи параметризации и устойчивости с учетом наличия неравномерных временных задержек. Это приводит к необходимости использовать ряд существенных допущений при описании объекта управления в линейном виде [4].

$$A(z^{-1}) y(t) = B(z^{-1}) u(t-d) + C(z^{-1}) \varepsilon(t),$$

где помехи $\varepsilon(t)$, нарушающие работу системы, принимаются, как стабильные, т. е. нули полинома $C(z^{-1})$ лежат внутри круга единичного радиуса на z -плоскости; полиномы $A(z^{-1})$ и $B(z^{-1})$ рассматриваются, как взаимно простые; верхние границы всех скалярных полиномов, входящих в матрицы $A(z^{-1})$, $B(z^{-1})$ и $C(z^{-1})$, рассматриваются как известные; транспортное запаздывание, составляющее не менее d интервалов времени, предполагается для каждого канала одинаковым и известным; звенья $A(z^{-1})$ и $B(z^{-1})$ рассматриваются как устойчивые, а, следовательно, система принимается как минимально фазовая.

Практически во всех системах судовой автоматизации, которые являются многомерными, эти допущения также присутствуют. Примером может служить система автоматической стабилизации судна на курсе.

Особый интерес для динамических объектов управления, к которым может быть отнесено и судно, представляет управление с прогнозированием значения выходного параметра. Прогноз основывается на использовании имитационной математической модели динамики управляемого объекта. Положительным свойством этой схемы управления является отказ от управления с минимально-фазовыми и неустойчивыми в разомкнутом состоянии системами, в частности, с системами с не полностью известными значениями времени задания управляющего воздействия. Эта схема управления носит название обобщенного прогнозирующего управления. Она обеспечивает как хорошие показатели качества управления, так и асимптотическую устойчивость разнообразных объектов управления. Примером такой имитационной модели могла бы служить разработанная в РС имитационная модель судна, работающего в режиме динамического позиционирования.

В последние десятилетия развитие получила теория управления на базе методов нечеткой логики. Схемы управления на базе нечеткой логики имеют ряд преимуществ перед приведенными ранее схемами. Прежде всего – это возможность использования в алгоритмах управления лингвистических правил. Нечеткие схемы управления состоят из набора условных лингвистических операторов, или правил, задающих конкретные ситуации управления. Состав условных лингвистических операторов определяется из соображений здравого смысла или технических сведений о процессе, которым необходимо управлять.

Наиболее эффективное применение эти схемы управления находят в многомерных, нелинейных системах с быстро изменяющимися во времени рабочими процессами. Эти схемы управления также могут работать с не полностью описанными системами с неизвестной динамикой, так как для них не требуется априорная математическая модель объекта управления. Об использовании этих схем в системах судовой автоматизации автору статьи не известно.

Можно сделать некоторое обобщение сказанному. Известно, что существующие в настоящее время классические теории управления в основном базируются на принципе линеаризации управляемых процессов. На практике этот подход заставляет нас разрабатывать математические имитационные модели, основанные, как правило, на предположении о линейности систем. Эти математические модели очень редко совпадают с реальными связями, существующими между входами и выходами системы. Только системы с низкой

чувствительностью по параметрам могут достаточно полно отражать эти связи.

Эти соображения и послужили основой для принятия решения об использовании нейросетей в системах управления.

В [1] приводятся следующие причины, которые стимулируют использование нейросетей в схемах управления.

1. Нейронные сети – наилучший способ аппроксимации и экстраполяции функций.

2. Наличие множественных нелинейных функций активации в многослойной нейронной сети обеспечивает эффективную реализацию достаточно гибких нелинейных преобразований.

3. Способность нейронных сетей к самообучению не требует априорного определения математической модели, как это требуется в существующих адаптивных схемах управления.

4. Параллельное одновременное использование большого числа нейросетей в схемах управления позволяет эффективно использовать программную и аппаратную реализацию схем управления.

Наибольшее распространение в настоящее время получили следующие методы включения нейросетей в схемы управления подвижными объектами [5]:

прямой (непосредственный) метод;

косвенный метод;

с эмулятором и схемой управления (контроллером).

Реализация этих методов может осуществляться как в последовательных схемах нейроуправления, так и в параллельных схемах.

На рис. 2 приведена обобщенная блок-схема построения нейросетевой схемы управления объектом.

На рис. 3 представлена блок-схема прямого (непосредственного) нейроуправления.

Эта схема управления, благодаря наличию обученной нейросети, позволяет реализовать управление, аналогичное традиционной схеме управления с обратной связью.

В косвенной схеме нейроуправления при обучении нейросети с учетом ошибки, которая появляется в цепи обратной связи, нейросеть включается в систему параллельно обычной схеме управления с обратной связью. После окончания процесса обучения нейросети, она принимает на себя управление объектом. В этом случае обычная схема управления с обратной связью уже не используется. Этот метод обучения заключается в многократном повторении цикла желаемой траектории. Поэтому его практическое применение ограничивается

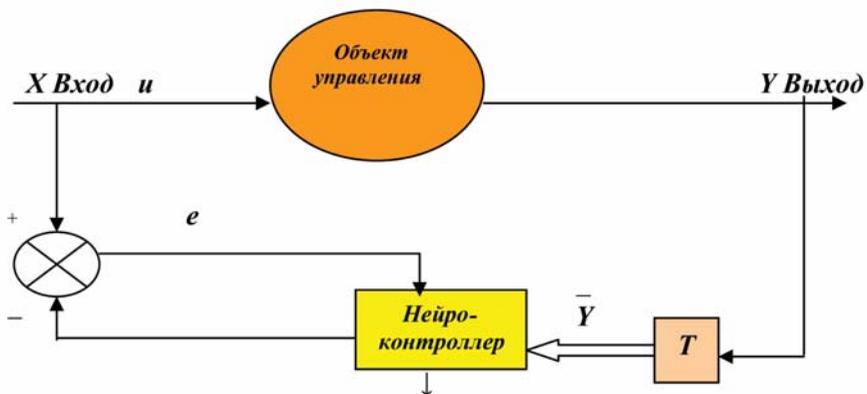


Рис. 2

Обобщенная блок-схема нейросетевой системы управления:
 T – условное обозначение линии задержки, используемой для формирования многомерного входного сигнала нейронной сети; e – ошибка управления; u – управляющее воздействие; X – вход системы (опорный сигнал)

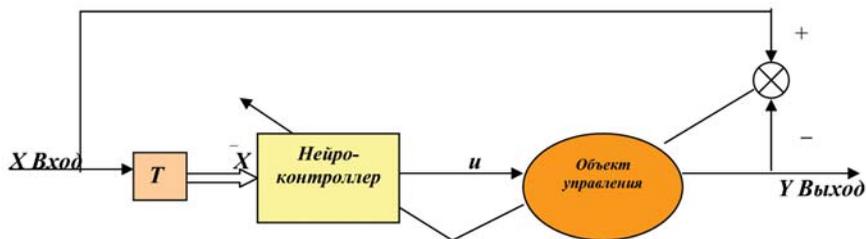


Рис. 3

Блок-схема прямого нейроуправления

только некоторыми типами систем, в частности, системами управления рукой робота и сервомоторами. На рис. 4 приведена блок-схема косвенной схемы нейроуправления.

Эта схема нейроуправления позволяет определять параметры объекта управления в каждый момент времени и затем использовать их для оценки параметров нейроконтроллера. Таким образом, имеет место явно выраженный процесс идентификации.

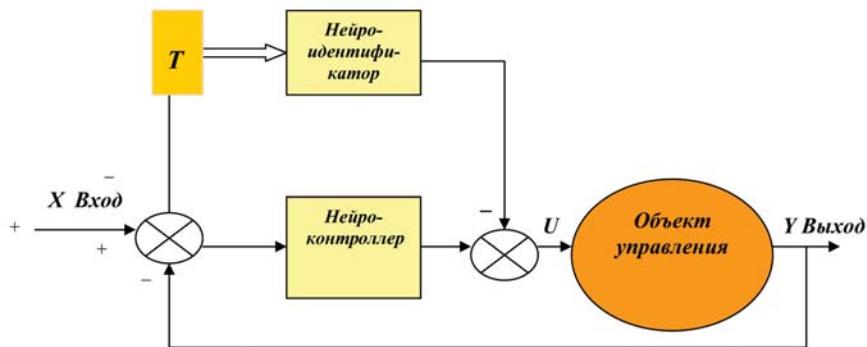


Рис. 4
Блок-схема косвенной схемы нейроуправления

Значительный интерес представляет использование в схемах нейроуправления одновременно двух нейросетей. Одна нейросеть используется как эмулятор, вторая – как контроллер. Задачей для нейросети-эмулятора является ее автономное обучение динамике объекта управления. Эта схема позволяет более точно осуществлять непосредственное обучение нейроконтроллера, так как ошибка управления может распространяться в обратном направлении через эмулятор для каждой выборки (Образца). На рис. 5 приведена блок-схема нейроуправления с наличием эмулятора и контроллера.

Известны схемы нейроуправления, в которых используются два нейроконтроллера: один из них реализует прямую схему, второй – нейросетевую схему управления с обратной связью. Блок-схема этой системы нейроуправления приведена на рис. 6. Она носит название общей схемы нейроуправления [3].

Схемы нейроуправления могут иметь как последовательную, так и параллельную архитектуру. Особый интерес для систем судовой автоматизации представляет использование схем с последовательной архитектурой. Эти схемы обладают большей надежностью и способны к более быстрому обучению. Они должны в идеальном случае позволять реализовывать обратную динамическую характеристику объекта управления. На рис. 7 приведена одна из возможных последовательных схем нейроуправления. На этой схеме нейронная сеть реализует схему управления с прямой связью и позволяет минимизировать функциональную ошибку e .

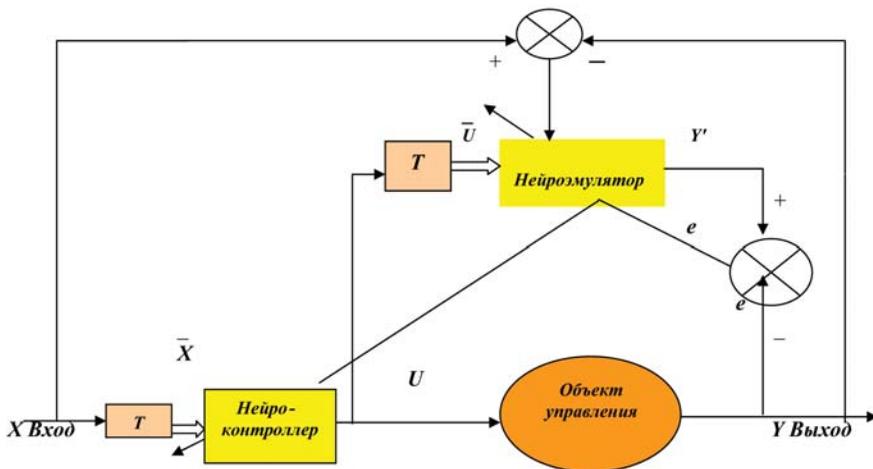


Рис. 5
Блок-схема нейроуправления с эмулятором и контроллером

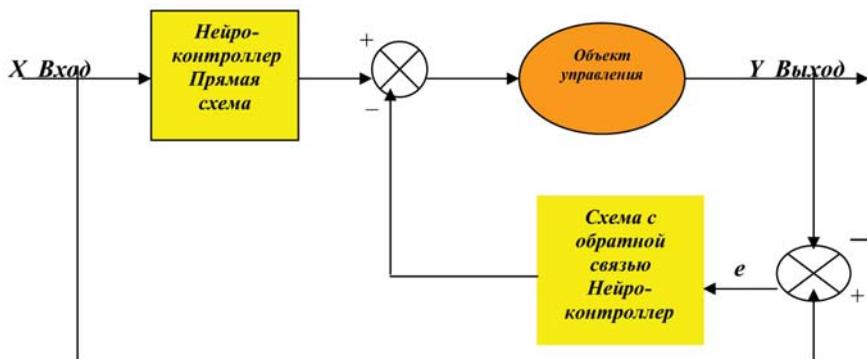


Рис. 6
Блок-схема общей схемы управления

Представляет интерес использование нейросетей в последовательных схемах нейроуправления с имитационным моделированием динамики объекта управления.

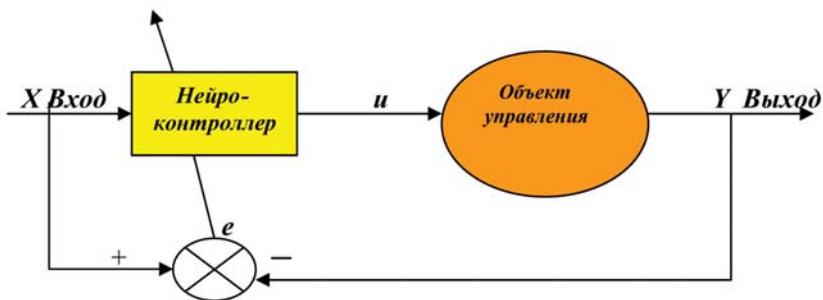


Рис. 7
Последовательная схема нейроуправления

В этом случае нейросеть служит в качестве идентификатора динамики объекта управления – эмулятора. На рис. 8 приведена схема, представляющая вариант обучения идентификатора объекта управления. В этом варианте схема нейрозмулятора является косвенным средством оценки функционирования объекта управления.

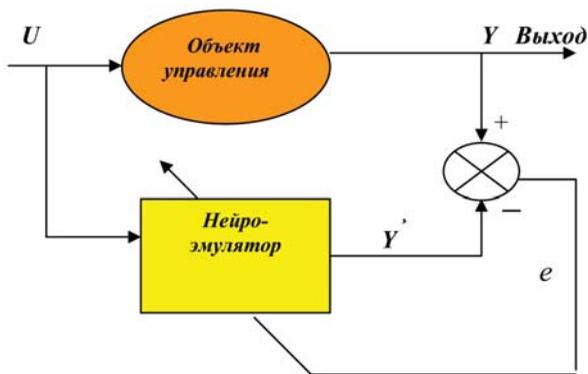


Рис. 8
Схема обучения идентификатора объекта

Блок-схема параллельной схемы нейроуправления приведена на рис. 9. На этой схеме в качестве схемы управления использует-

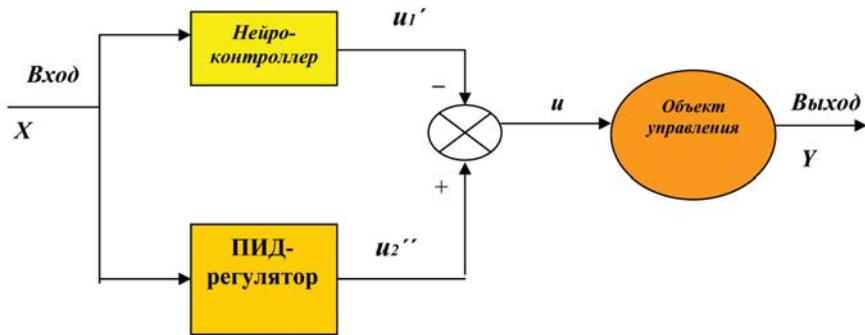


Рис. 9
Блок-схема параллельной схемы нейроуправления

ся обычный ПИД-регулятор. В этом варианте параллельной схемы нейроконтроллер осуществляет корректуру сигнала на выходе ПИД-регулятора.

Для ознакомления читателей с существующими и проектируемыми системами нейроуправления приведем примеры его использования в системах управления движением, виброзащитой и регулированием температурных режимов [4]. Это те области управления технологическими процессами, которые, по мнению автора статьи, представляют интерес и для систем управления судовыми технологическими процессами.

Можно перечислить следующие системы управления движением, в которых нейроуправление или уже используется, или его использование находится в стадии разработки:

- системы управления электродвигателями;
- системы управления пьезодвигателями;
- сервоприводы;
- гидравлические и электрогидравлические системы;
- пневматические системы;
- системы управления подъемными кранами.

С целью доказательства преимущества использования нейронных сетей в системах управления движением остановимся на системах управления сервоприводами [7].

Известно, что любой электродвигатель является нелинейной динамической системой. Это обстоятельство и явилось достаточным условием для использования для его управления нейронных сетей.

Использование для этой цели нейроуправления в настоящее время охватывает широкую номенклатуру электродвигателей: от микроминиатюрных до сверхмощных (несколько мегаватт). Последние – используются для переработки руды, перекачки нефти и газа. Фирмой Texas Instruments выпущена специальная серия СБИС, ориентированная на создание систем управления электродвигателями с программной эмуляцией на СБИС нейросетевых алгоритмов управления.

Нейроконтроллеры применяются также для уменьшения пульсации вращающего момента в переключаемых режимах асинхронных двигателей. Идентификация двигателя как нелинейной системы осуществляется на основе нейросетевых моделей. При этом в значительной степени компенсируются неопределенности параметров работы двигателя и нагрузки. Использование принципов нейроуправления для управления скоростью позволяет значительно улучшить динамические характеристики асинхронных электродвигателей и упростить процесс их проектирования.

При управлении высокоточным движением системы нейроуправления позволяют контролировать эффект нелинейного трения.

Нейроуправление позволяет эффективно справиться с существенными нелинейностями в электрогидравлических и электропневматических сервомеханизмах. Большой интерес для судостроения представляет использование нейроуправления в системах виброзащиты и шумопоглощения.

Формирование в реальном времени сигнала управления системой активной виброзащиты возможно с помощью вычислительной системы, построенной на принципах нейроуправления. Предметами синтеза подобных систем является не только нейроуправление, но и способы размещения датчиков и приводов непосредственно на объекте, требующем активной виброзащиты.

Известно использование нейроуправления в системах виброзащиты кривошипно-шатунных механизмов, турбогенераторов и других подобных изделиях [8].

Задачей систем шумопоглощения является генерация сигналов, противодействующих входному шуму, с целью обеспечения минимального шума на выходе в наушниках у человека.

Для судов, предназначенных для перевозки сжиженного газа, должно представлять интерес использование нейроуправления для регулирования температурных режимов.

В первую очередь это относится к объектам с режимами, требующими совпадения заданных графиков изменения температуры с ее

текущими значениями. Известные нейроконтроллеры для систем управления температурой реализованы в криостатах с жидким гелием и используются в системах быстрой тепловой обработки. Как правило, целями управления при этом являются:

- установление требуемого температурного режима в заданное время;

- предотвращение перегрева или переохлаждения;

- обеспечение максимальной устойчивости заданного температурного режима.

Опыт эксплуатации нейроконтроллеров для адаптивной настройки ПИД-регуляторов температуры показывает улучшение работоспособности систем, их статических и динамических характеристик регулирования.

В системах нейроруавления температурой пара учитываются такие особенности, как:

- изменение параметров во времени;

- большой гистерезис;

- наибольшее время запаздывания.

Заключение

За последние десятилетия достигнуты значительные успехи в области использования нейроруавления в системах управления различными технологическими процессами.

Известны примеры использования нейротехнологий и в системах автоматизации судовых технологических процессов. Проводимые разработки в этой области позволяют сделать вывод об их неминуемом более широком внедрении на судах в ближайшее десятилетие.

Однако существуют и причины, которые сдерживают и будут какой-то период времени продолжать сдерживать внедрение нейротехнологий в системы управления судовыми технологическими процессами. На основных причинах следует остановиться.

Это, прежде всего, возникающие трудности с определением длительности процесса обучения нейронных сетей. Этот процесс до настоящего времени является недостаточно изученным и строгих методов определения условий обучения не существует. Трудности возникают также и при определении условий завершения процесса обучения нейросетей. Отсутствуют разработки стандартов обучения нейросетей в зависимости от требований, предъявляемых к надежности и безопасности систем управления. Все предлагаемые в настоя-

шее время методы обучения нейросетей [1] не позволяют сформулировать достаточные доказательства их корректности.

Разработанные и разрабатываемые в настоящее время схемы нейроуправления различными технологическими процессами в промышленности, в системах управления летательными аппаратами и космическими объектами [9], позволяют реализовывать на их основе распределенные системы управления, которые должны функционировать и при отказе их отдельных узлов. Нужно полагать, что требования по безопасности и надежности управления судовыми технологическими процессами потребуют также наличия судовых многомерных распределенных систем нейроуправления.

Современное состояние разработок нейрокомпьютеров свидетельствует о том, что наступит момент времени, когда вместо вычислительных машин, основой построения которых продолжают оставаться принципы, определенные фон Нейманом, в системах судовой автоматизации появятся нейрокомпьютеры. В настоящее время во всех известных системах нейроуправления судовыми технологическими процессами программы нейросетевых алгоритмов реализуются на традиционных средствах цифровой вычислительной техники. Эта тенденция будет продолжаться еще длительное время. С появлением нейрокомпьютеров, реализующих полный нейросетевой базис, необходимость в программировании отпадет. Но этого момента времени, возможно, придется еще подождать и несколько десятилетий.

Развитие теории и практики использования нейроуправления в различных системах управления технологическими процессами свидетельствует о необходимости готовиться к его появлению и на судах. Первые примеры его появления в системах автоматизации судовых технологических процессов уже известны.

Специалисты классификационных обществ должны готовиться к более широкому появлению систем нейроуправления на судах. Необходимо заранее оценить их преимущества и недостатки по сравнению с традиционными методами управления, используемыми в системах судовой автоматизации в настоящее время. Наиболее важной задачей является оценка влияния нейротехнологий на надежность функционирования судовых технологических процессов и на безопасность судна.

Необходимо заранее определить наиболее влияющие на безопасность технологические решения, используемые при разработке систем нейроуправления. Особое внимание должно быть обращено на изучение возможности определения стандартов обучения нейросетей в зависимости от влияния объектов управления на безопасность.

Список литературы

1. Саймон Хайкин. Нейронные сети. – М.: Изд. дом «Вильямс», 2008. – 1103 с.
2. Нейронные сети. STATISTICA Neural Networks. – М.: Горячая линия-Телеком. – 2008. – 392 с.
3. Галушкин А. И. Теория нейронных сетей : [Сер. «Нейрокомпьютеры и их применение». Кн. 1]. – М.: ИПРЖР, 2000.
4. Галушкин А. И. Основы нейроуправления / Приложение к журналу «Информационные технологии» № 10. – 2002. – 24 с.
5. Степанов О. А. и др. Оптимальная линейная фильтрация с использованием нейронной сети / Гироскопия и навигация. – 2004. – № 5. – 10 с.
6. Терехов В. А. и др. Нейросетевые системы управления : [Сер. «Нейрокомпьютеры и их применение». Кн. 7]. – М.:ИПРЖР, 2002.
7. Miller W. T. Neural Networks for Control. MIT Press. Cambridge, Mass. 1990.
8. Tafestas S. G. Sft Computing in Systems and Control Technology. World Scientific. – 1999. – 10 с.
9. Комашинский В. И. и др. Нейронные сети и их применение в системах управления и связи. – М.: Горячая линия-Телеком, 2002. – 94 с.
10. Омату С. и др. Нейроуправление и его приложение : [Сер. «Нейрокомпьютеры и их применение». Кн. 2]. – М.: ИПРЖР, 2000.
11. Чимишкин С. Распределенные алгоритмы управления / Мир компьютерной автоматизации. – 2000. – № 1.
12. Jmills P. M. Neuro-Adaptive Process Control. A Practical Approach. Wiley. – 1996.

В.Н. Павлов, А.О. Трусов, В.И. Ратников

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ УСТРОЙСТВ ЗАЩИТНОГО ОТКЛЮЧЕНИЯ (УЗО) В СУДОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

В работе приведен анализ технической реализуемости устройства защитного отключения (УЗО) для электрических установок с изолированным от земли режимом нейтрали источника электрической энергии.

Устройство предназначено для обеспечения электробезопасности персонала в тех системах электроснабжения, где иные защитные мероприятия оказываются недостаточно эффективными или надежными, а отключение (обесточивание) защищаемого участка сети и защищаемой группы потребителей является возможным по требованиям бесперебойности электроснабжения.

Вторым назначением УЗО является обеспечение пожарной безопасности режима однофазного замыкания (или локального однофазного снижения величины сопротивления изоляции).

В статье анализируется один из возможных вариантов построения УЗО, основанный на многоканальном принципе выявления факта протекания через тело человека опасных для него токов. Сформулированы базовые принципы обеспечения работоспособности УЗО в сетях рассматриваемого вида.

Приводятся результаты математического моделирования наиболее неблагоприятных (по соотношению величин сопротивлений изоляции и емкостей фаз) режимов системы электроснабжения и сформулированы рекомендации по построению систем электроснабжения типа IT, в которых возможно обеспечить надежную электробезопасность за счет применения УЗО такой архитектуры.

Постановка задачи

Ряд отраслей промышленности и сферы оказания услуг по действующим правилам используют для целей электроснабжения своих объектов сети с изолированными от земли токоведущими частями.

Основными причинами такого решения являются:

необходимость обеспечения надежности (бесперебойности) электроснабжения электроприемников;

возможность в таких сетях обеспечить электробезопасность обслуживающего персонала за счет применения комплекса специальных мероприятий, причем в первую очередь – без использования принципа снятия рабочего напряжения сети.

Наиболее характерными областями применения сетей такого вида являются горнодобывающие предприятия, в том числе – шахты, карьеры, авиационные и морские суда, сети военного назначения, медицинские объекты и ряд других. Наиболее монопольное положение таких сетей сформировалось в судовых электроустановках.

Нелишним будет напомнить, что для сетей любой архитектуры важнейшим требованием является применение системы обеспечения их электробезопасности для пользователей. Такая система традиционно включает в себя ряд организационных и технических мероприятий.

В качестве основной защиты от прямого прикосновения служат мероприятия, предотвращающие прикосновение к токоведущим частям:

изоляция токоведущих частей;

недоступность токоведущих частей – применение ограждений и оболочек, установка барьеров, размещение вне зоны досягаемости.

Но так как такие мероприятия являются техническими, и, следовательно, ограниченно технически надежными, подверженными случайным или преднамеренным повреждениям, то они должны быть дополнены «дополнительными» защитными мерами, которые встраиваются уже в систему электроснабжения и действуют в случае отказа основных мер защиты.

В этой ситуации возможно попадание человека под действие электрического тока. Тогда критериями безопасности такой ситуации являются:

величина тока, протекающего через тело человека (или величина напряжения прикосновения);

длительность протекания тока через тело человека (в зависимости от величины протекающего тока).

Современная система электробезопасности должна обеспечивать защиту человека от поражения в двух наиболее вероятных и наиболее опасных случаях:

при прямом прикосновении к токоведущим частям электрооборудования и при косвенном прикосновении.

Под косвенным прикосновением понимается прикосновение человека к открытым проводящим частям оборудования, на которых в нормальном режиме (исправном состоянии) электроустановки отсутствует электрический потенциал по отношению к земле (корпусу судна), но при каких-либо неисправностях, вызвавших нарушение изоляции или пробой на корпус, на этих частях возможно появление опасного для жизни человека потенциала.

Стратегически обеспечение безопасности на случай косвенного прикосновения является обязательным, а на случай прямого прикосновения – желательным, т. к. не всегда является достижимым.

Применительно к наиболее распространенным на судах сетям с изолированными от корпуса судна токоведущими частями для стационарных электроприемников, наряду с основными мерами защиты, в качестве дополнительной защиты (технические защитные мероприятия, необходимые на случай выхода из строя основной защиты) используется, в первую очередь, защитное заземление доступных прикосновению металлических частей электрооборудования, дополняемое мерами по контролю величины сопротивления изоляции сети. Возможно также использование в качестве дополнительной меры защиты методов защитного разделения сетей, устройств компенсации емкостных токов на землю (в том числе – токов через тело человека) и ряд других.

Защита от прямого прикосновения в системах с изолированными от земли токоведущими частями может быть обеспечена только специальными мерами схмотехнического плана, когда характеристики системы электроснабжения (низкие уровни емкостных проводимостей относительно земли (корпуса судна) и высокие уровни сопротивления изоляции последних) обеспечивают приемлемо безопасные уровни напряжения при прикосновении.

Дополнительную защиту от поражения электрическим током при прямом прикосновении может обеспечить только применение устройств защитного отключения. Однако в этом случае участок сети с возникшей утечкой на корпус судна (возможно – с прикоснувшимся человеком) будет этим устройством обесточен, что не всегда приемлемо с позиций требования бесперебойности.

На настоящий момент времени сложилась ситуация, когда сети с изолированными от корпуса судна токоведущими частями имеют достаточно разветвленную структуру. Причем архитектура сетей предусматривает, как правило, наличие участков сетей, которые ради безопасности персонала могут быть обесточены. Электроприемники

в таких участках сетей используются в условиях, когда частота их повреждения значительно превышает нормальную, а использование традиционных защит не обеспечивает их достаточную надежность. В первую очередь – это различные передвижные и переносные электроприемники бытового и аналогичного назначения, которые не относятся к числу ответственных потребителей, т. е. могут быть обесточены без ущерба для надежности электроснабжения. Количество таких электроприемников все время увеличивается, причем возрастает удельный вес этих потребителей в общем числе электроприемников судна. Особо следует подчеркнуть, что работу с такими потребителями осуществляет, как правило, не специальный электротехнический персонал (его число на судне сокращено до единиц), а скорее – технологический персонал или иные лица в условиях, близких к бытовым.

Поэтому современные правила Российского морского регистра судоходства предусматривают использование в сетях типа IT, в качестве дополнительной защиты от поражения электрическим током и от возникновения пожароопасных ситуаций, устройств защитного отключения. Причем – в списке первоочередных мер. Однако выясняется, что техническое решение проблемы применения УЗО в сетях такого вида не является делом простым и очевидным. И, если говорить об УЗО, рекомендуемых к применению в судовых сетях с изолированной от земли нейтралью источника, то их число составляет также единицы моделей. Во всяком случае, в каталогах крупнейших электротехнических фирм отсутствует информация о производстве УЗО, предназначенных для работы в сети с изолированной нейтралью (или изолированными полюсами однофазной сети). Авторам известны случаи, когда вместо специализированных УЗО на ряде судов были формально установлены УЗО, но из числа тех, которые предназначены для работы в сетях с заземленной нулевой точкой источника электроэнергии. Устройства вроде бы и есть, но защиту персонала они не обеспечивают.

Проблемам увязки характеристик УЗО и характеристик электрических сетей, в которые эти УЗО должны встраиваться, и посвящена настоящая статья.

Возможные решения

Разработчики систем электроснабжения в ситуации отсутствия на рынке специализированных УЗО для сетей с изолированной от земли нейтралью источника электроэнергии пытаются использовать в сетях,

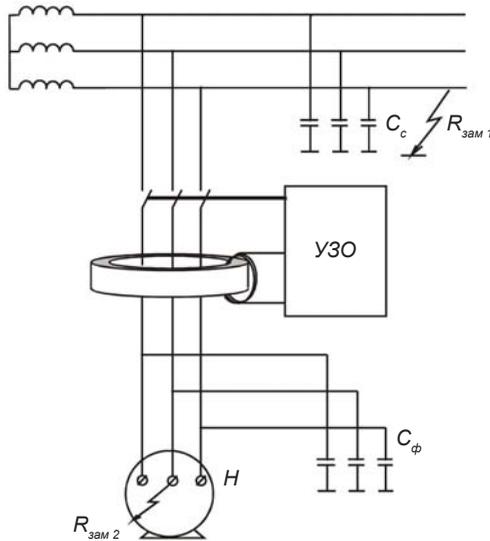


Рис. 1

Схема включения в сети с изолированной нейтралью УЗО, реагирующего на токи нулевой последовательности (НП)

изолированных от земли, те УЗО, которые предназначены для сети с глухозаземленной нейтралью, причем, как правило, реагирующие на токи нулевой последовательности (дифференциальные токи утечки).

Далеко не во всех случаях это удастся. В разветвленной электрической сети (или сети большой протяженности) со сравнительно большими величинами емкостей фаз относительно земли C_1, C_2, C_3 применение такого УЗО еще имеет смысл, так как вызванный прикосновением человека или однофазным повреждением изоляции в защищаемой зоне $R_{зам2}$ ток НП может составлять десятки миллиампер и более, что превышает уставку срабатывания УЗО по дифференциальному току $I_{\Delta n}$ (как правило, 10 или 30 мА).

Но такого же уровня ток может вызываться несимметрией емкостей фаз относительно земли (корпуса судна) и/или несимметрией рабочих напряжений фаз. И в этом случае пользоваться электроприемниками окажется невозможно (УЗО будет постоянно отключаться). Кроме того, ложные срабатывания могут вызываться однофазными замыканиями вне защищаемого участка сети. В обоих случаях про-

цесс поиска причин ложного срабатывания УЗО может существенно затянуться.

Минимальная величина емкости фаз сети, при которой однофазное прикосновение человека вызывает ток нулевой последовательности, имеющий величину, большую, чем уставка срабатывания УЗО по дифференциальному току $I_{\Delta n}$, приведена в табл. 1. При емкости фаз сети, превышающей указанные значения, установка УЗО становится эффективной.

Таблица 1

$I_{\Delta n}$, mA	Критическая емкость фазы, мкФ		
	1-фазная сеть 230 В	3-фазная сеть 230 В	3-фазная сеть 400 В
10	0,14	0,08	0,05
30	0,43	0,25	0,15

Но для сети типа IT следует учитывать, что ток утечки, в случае прикосновения в защищаемом УЗО участке сети (ток, проходящий через тело человека), не равен току НП и имеет две составляющие. Одна составляющая I_{Δ} , пропорциональная величине емкостей фаз сети C_c до места установки УЗО (при условии хорошего состояния изоляции сети относительно корпуса судна), протекает через трансформатор тока нулевой последовательности (ТТНП) УЗО и может вызывать срабатывание УЗО. Другая составляющая тока через тело человека, пропорциональная величинам емкостей фаз участка сети после места установки УЗО C_{ϕ} (в зоне защиты), не протекает через ТТНП УЗО и, соответственно, не вызывает срабатывание защиты.

На основании изложенного можно сделать следующие выводы (численные значения относятся к наиболее распространенной трехфазной сети с линейным напряжением 400 В):

1. применение УЗО, контролирующего только величину токов нулевой последовательности, не может быть оценено как эффективное решение, т. к. этот принцип не является достаточно надежным;

2. если емкость всей сети не превышает величины 0,05 мкФ на фазу, то установка УЗО неэффективна, да и не нужна (ток, проходящий через тело человека не превысит предел 10 мА);

3. если емкость сети в защищаемой зоне превышает 0,05 мкФ на фазу, а емкость сети вне зоны защиты имеет меньшую величину, то протекающий через тело человека ток имеет опасную величину, но УЗО не сработает.

Однако те же правила Российского морского регистра судоходства в части рыболовных судов рекомендуют для обеспечения электробезопасности систему электроснабжения типа IT, имеющую структуру «разделительный трансформатор – УЗО – электроприемники» и характеризующуюся малым значением электрической емкости сети относительно корпуса судна.

В такой сети применение любых УЗО, оценивающих токи НП, в большинстве случаев оказывается неэффективным, так как токи утечки могут представлять опасность для человека, не вызывая при этом срабатывание защиты. Ток, проходящий через тело человека, замыкается на емкости защищаемого участка сети, не является для ТТНП таким УЗО информативным и, соответственно, не вызывает срабатывание защиты. Особенно это актуально в случае установки УЗО непосредственно после разделительного трансформатора, когда в защищаемую зону включается и кабель питания электроприемника, подверженный механическим повреждениям. Тогда емкость участка сети после УЗО соизмерима, а то и превосходит емкость сети до УЗО.

Поэтому условием правильной установки в сети с изолированной нейтралью УЗО на дифференциальных токах является соблюдение **Требования 1:** *эффективность защиты обеспечивается при условии, что емкость участка сети вне зоны защиты превышает критическую величину, приведенную в табл. 1, а также существенно превышает емкость сети в защищаемой УЗО зоне.*

Корректный инженерный расчет должен обеспечить такую емкость участка сети до места установки УЗО, которая создает условия для срабатывания УЗО в режимах прикосновения человека в защищаемой зоне (рис. 2).

Другой причиной признания УЗО на токах НП как не вполне эффективного средства защиты является то, что УЗО должно обеспечивать не только надежное срабатывание, но и не допускать ложных срабатываний.

Действительно, достаточный для срабатывания УЗО дифференциальный ток может вызываться не обязательно прикосновением человека к токоведущим частям или повреждением электрической изоляции, но и несимметрией емкостей фаз относительно корпуса судна и/или несимметрией рабочих напряжений фаз (для трехфазной сети). В этом случае пользование электроприемниками может оказаться невозможным, так как УЗО будет постоянно отключаться. По этой же причине протекание токов емкостной несимметрии через УЗО дифференциального типа может стать причиной пропусков в срабатывании

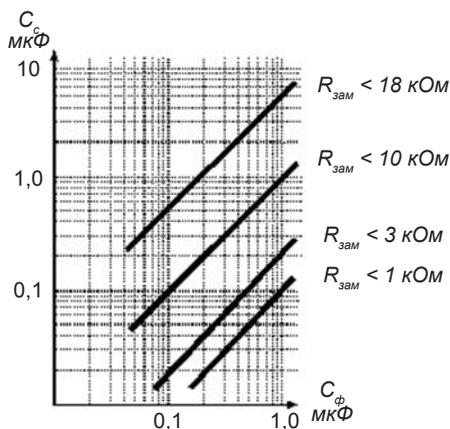


Рис. 2

Зависимость минимально необходимой емкости фаз сети до места установки УЗО C_c от емкости фаз в защищаемой УЗО зоне сети C_ϕ , при которых обеспечивается выявление в защищаемой зоне замыкания фазы на корпус с сопротивлением менее $R_{зам}$ (для трехфазной сети напряжением 4000 В, УЗО с $I_{\Delta n} = 10 \text{ мА}$)

УЗО (человек прикоснулся, ток, проходящий через его тело, представляет опасность для его жизни, а УЗО не сработало).

С другой стороны, если емкость защищаемого участка сети соизмерима с емкостью остальной части сети, то ток, проходящий через тело человека I_h , превышает ток НП I_{Δ} , протекающий через ТТНП $I_h = I_{\Delta} \cdot (1 + C_\phi / C_c)$. В этом случае, чем больше отношение C_ϕ / C_c , тем на более ранней стадии развития повреждения изоляции произойдет его отключение (обеспечивается выявление в защищаемой зоне замыкания фазы на корпус с более высоким сопротивлением $R_{зам}$).

Анализ возможных альтернативных решений

Авторами проведен анализ альтернативных решений в части принципа работы УЗО, предназначенного для использования в сетях типа IT.

Аналізу подверглись активные методы контроля величины токов утечки на землю (корпус судна) с наложением на сеть оперативных напряжений постоянного или переменного тока. Такое решение, несо-

менно, достовернее в плане «направленности» токов, однако также не лишено недостатков. А именно:

– наложение непромышленной частоты усложняет аппаратурную реализацию системы из-за введения блока источника напряжения. Усложняются методы фильтрации полезного сигнала и сигнала от «паразитного» (в данном случае) напряжения контролируемой сети. Кроме того, токи НП «обратного» направления (по аналогии с рассмотренным пассивным методом) могут привести к ложным срабатываниям. Вероятность такого срабатывания будет тем ниже, чем ниже выбранная частота напряжения оперативного источника. Но вероятная низкая добротность применимых в цепях, имеющих связь с сетью сравнительно высокого напряжения, фильтрующих блоков не позволяет снизить ее настолько, чтобы возможные ложные срабатывания возникали только при малореальных величинах однофазного снижения сопротивления изоляции до уровня порядка долей единиц 0 м . Кроме того, реализация низкочастотных источников существенной мощности представляет известные схемные сложности.

При наложении на сеть оперативного напряжения постоянного тока указанные сложности в значительной мере разрешаются простотой известных схемных решений. Однако возможная реализация чувствительных блоков по принципу «чем меньше, тем больше» требует кроме дополнительных сигнальной обмотки и обмотки источника сигнала еще и высоких метрологических характеристик самого ТТНП. При таком подходе чрезвычайно высоки требования к материалу и конструкции сердечника ТТНП, т. к. измеряемый ток от оперативного источника снижает чувствительность трансформатора. Можно спрогнозировать и дополнительную вероятность ложных срабатываний при переключениях источников напряжения сети или при наличии в кривой напряжения субгармонических составляющих, вызванных «перекачиванием» мощности между параллельно работающими источниками.

Авторам кажется, что значительно лучшие результаты в таких сетях дает применение многоканальных УЗО, реагирующих не только на амплитуду тока НП, но и на его фазовый сдвиг относительно напряжения НП (рис. 3). Несмотря на то, что данный принцип известен относительно давно [3] и даже применяется в устройствах контроля состояния изоляции, практическое применение в конструкции УЗО он получает только в настоящее время.

В этих условиях речь, конечно, идет о так называемых «электронных устройствах», у которых электронная схема и механизм для вы-

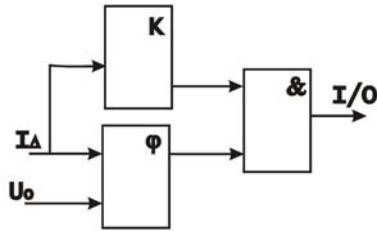


Рис. 3

Структурная схема двухканального УЗО:

K – блок проверки амплитуды тока НП I_{Δ} ;

φ – блок проверки фазового сдвига тока НП относительно напряжения НП U_0 ;

$\&$ – схема совпадения;

I/O – сигнал на срабатывание защитного отключения

полнения операции отключения нуждаются в энергии, получаемой либо от контролируемой сети, либо от внешнего источника. Хотя надежность устройств, функционально зависящих от напряжения питания, может оказаться ниже, чем у «электромеханических» УЗО в силу их большей сложности, подверженности воздействию внешних факторов и др., альтернативные решения в этом виде сетей пока не видны.

При выполнении данного исследования авторами была поставлена задача на основе математического и физического моделирования, а также путем натурных испытаний, реализующих этот принцип работы УЗО, подтвердить принципиальную возможность применения метода для условий работы УЗО в электрических сетях с оговоренными ниже параметрами.

Математическая модель для расчета токов НП в судовой электрической сети рассматриваемого вида построена на основе схемы замещения, приведенной на рис. 4.

Задача разрабатываемой модели – определение соотношений входных сигналов УЗО (I_0 , U_0 , $\Delta \varphi$) с заданными параметрами сети ($R_{из с}$, C_C , C_P , $K_{НС}$, $K_{НФ}$) для достижения состояния однозначного выделения фидера с однополюсным прикосновением человека или иным несимметричным повреждением изоляции.

Авторам априорно было известно [1], что для рассматриваемого вида сетей ток НП в окне ТТНП, работающего в режиме трансреактора, может быть записан для упрощенного случая симметрии

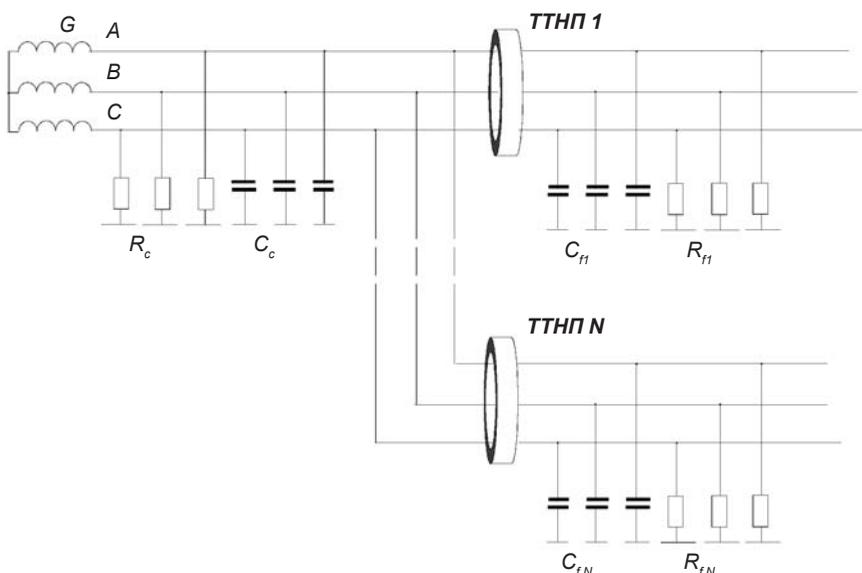


Рис. 4

Схема замещения разветвленной сети типа IT:

G – источник электроэнергии; ТТНП 1... N – трансформаторы тока НП, входящие в состав УЗО 1... N соответственно; R_c – сопротивления изоляции фаз сети вне защищаемой зоны (в том числе сопротивление однофазного повреждения изоляции); C_c – емкости фаз сети вне защищаемой зоны; R_{fn} ... R_{fN} – сопротивления изоляции фаз защищаемых участков сети (в том числе сопротивление прикосновения или однофазного повреждения изоляции); C_{fn} ... C_{fN} – емкости фаз защищаемых участков сети

емкостных проводимостей фаз сети относительно земли (корпуса судна), как:

$$I_{\Delta} = U_0 \sqrt{G^2 + B^2} \cdot e^{j \cdot \arctg B/G},$$

где I_{Δ} – ток НП;

U_0 – напряжение НП;

B – емкостные проводимости фаз относительно корпуса судна;

G – активные проводимости фаз относительно корпуса судна.

Для указанного выражения при расчетах токов НП в случае однофазного замыкания (или прикосновения человека) в защищаемой

зоне учитываются проводимости вне защищаемой зоны, и наоборот, для токов НП в случае замыкания вне защищаемой зоны, учитываются проводимости в защищаемой зоне. При этом меняется на противоположный знак угла фазового сдвига между током и напряжением НП, что позволяет по величине фазового сдвига разделить эти два случая. При симметрии проводимостей фаз сети и защищаемой зоны в случае однофазного замыкания (или прикосновения человека) в защищаемой зоне фазовый сдвиг составляет $+90^\circ$, а в случае замыкания вне защищаемой зоны -90° .

Другой особенностью современных судовых электроустановок является возможная существенная несимметрия емкостных проводимостей фаз сети между собой. И в рассматриваемой конструкции УЗО эта особенность судовых сетей была учтена.

Наличие несимметрии проводимостей фаз сети и защищаемой зоны приводит к тому, что реальные фазовые углы отличаются от $\pm 90^\circ$, вплоть до противоположных, когда в случае однофазного замыкания в защищаемой зоне фазовый сдвиг оказывается равным -90° . Поэтому при формулировании требований к сдвигу фаз между током и напряжением НП следует использовать более тонкие алгоритмы.

Специальный подбор диапазона возможного фазового сдвига, при попадании в который должна срабатывать защита, с учетом реальных несимметрий конкретной сети позволяет существенно снизить вероятность недостоверной работы УЗО, а при выполнении некоторых условий – и исключить таковую.

Поэтому на описанной выше модели проводилось исследование зависимости фазовых сдвигов между током и напряжением НП при различных соотношениях емкостей сети и фидера с моделью повреждения.

В модели были заложены следующие частные закономерности:

.1 проводимости фаз сети y_{ic} и защищаемых ее участков y_{if} относительно корпуса судна (земли) определяются выражениями:

$$y_{ic} = 1/R_{ic} + j \cdot 314 \cdot C_{ic};$$

$$y_{if} = 1/R_{if} + j \cdot 314 \cdot C_{if};$$

.2 напряжение НП в сети описывается как:

$$\begin{cases} \vec{e}_i - \vec{I}_{ic} / y_{ic} = \vec{U}_0; \\ \vec{e}_i - \vec{I}_{if} / y_{if} = \vec{U}_0; \end{cases}$$

$$\vec{U}_0 = \sum_{A,B,C} \vec{e}_i \cdot (y_{ic} + y_{i\bar{i}});$$

.3 ток НП, протекающий через ТТНП УЗО определяется выражением:

$$\vec{I}_0 = \sum_{A,B,C} (\vec{e}_i - \vec{U}_0) \cdot y_{ic};$$

.4 величина фазового сдвига между напряжением и током НП:

$$\Delta \varphi = \varphi_{U_0} - \varphi_{I_0} = \arctg \operatorname{Im} U_0 / \operatorname{Re} U_0 - \arctg \operatorname{Im} I_0 / \operatorname{Re} I_0.$$

При моделировании учитывалось, что конструкции УЗО, реализующие двухканальный алгоритм, при оценке фазового сдвига должны учитывать фазовые погрешности, вносимые ТТНП. Величина сдвига фаз δ между током НП I_{Δ} , протекающим через ТТНП, и оцениваемым схемой УЗО током вторичной обмотки ТТНП I_2 зависит от величины I_{Δ} [1]:

$$I_{\Delta} = I_2 \sqrt{1 + 2 \cdot (Z_{\text{вт}} / Z_{\text{нам}}) \cdot \sin(\varphi + \psi) + (Z_{\text{вт}} / Z_{\text{нам}})^2} \cdot e^{-j\delta},$$

где $Z_{\text{вт}}$ – сопротивление ветви вторичного тока;
 $Z_{\text{нам}}$ – сопротивление намагничивания трансформатора;
 φ – фазовый угол ветви вторичного тока;
 ψ – угол потерь в материале магнитопровода;
 δ – создаваемый ТТНП сдвиг фаз.

В связи с широким диапазоном изменений амплитуд входных сигналов фазовый сдвиг в ТТНП может изменяться в зависимости от амплитуды I_{Δ} сигнала из-за влияния нелинейности кривой намагничивания на начальном участке и в зоне насыщения. Ввиду существенной зависимости угла ψ от тока намагничивания, угол δ непостоянен, и поэтому угловые погрешности трансформатора лучше определять экспериментально.

Выводы по итогам анализа результатов моделирования работы двухканальных УЗО

Результаты расчета полностью подтвердили опасения авторов в части достоверной работоспособности одноканальных (на основе токов НП) УЗО.

И для рассматриваемых двухканальных УЗО применимы те ограничения (требование 1), которые были указаны выше.

Применение двухканальных УЗО в однофазных сетях позволяет полностью избавиться от наиболее опасного вида недостоверной работы УЗО – пропусков срабатывания. В трехфазной сети полностью исключить пропуски срабатывания в условиях существенной несимметрии емкостей фаз даже двухканальное УЗО не в состоянии. Правда, благодаря указанным выше особенностям алгоритма работы УЗО, пропуски возможны только при совпадении трех следующих условий:

.1 в сети за фазой с наименьшей емкостью следует фаза с емкостью, значение которой близко к среднеарифметическому

$$C_{\text{cp}} = \sum_{i=A,B,C} C_i / 3;$$

.2 замыкание (прикосновение человека) происходит именно в фазе с емкостью $C_c \approx C_{\text{cp}}$;

.3 сопротивление замыкания превышает критическое значение (величина таких критических сопротивлений зависит от суммарной величины емкости сети, величины уставки срабатывания УЗО, номинального напряжения сети).

Пример формулировок критических уровней сопротивления замыкания представлен на рис. 5.

Во всех остальных случаях УЗО будет срабатывать достоверно.

Поэтому условием правильной эксплуатации (установки) двухканального УЗО является соблюдение **Требования 2: эффективность**

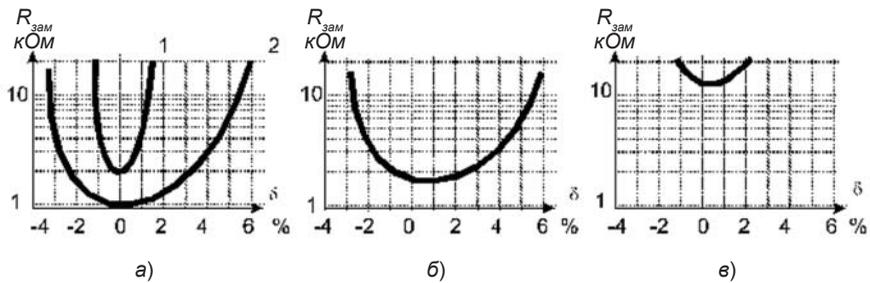


Рис. 5

Зависимость максимальной величины сопротивления замыкания фазы на корпус $R_{\text{зам}}$, достоверно отключаемого УЗО, от отклонения емкости замкнутой фазы от среднего значения δ и коэффициента несимметрии емкостей фаз сети $K_{\text{нс}}$

для трехфазной сети напряжением 400 В, $I_{\Delta n} = 10$ мА:

а) $C_{\text{cp}} = 20$ мкФ; кривая 1 – $K_{\text{нс}} = 10$ %; кривая 2 – $K_{\text{нс}} = 30$ %;

б) $C_{\text{cp}} = 10$ мкФ; $K_{\text{нс}} = 30$ %; в) $C_{\text{cp}} = 1$ мкФ, $K_{\text{нс}} = 30$ %

защиты в трехфазной сети обеспечивается при условии, что емкость каждой из фаз сети отличается от среднего значения C_{cp} на величину δ , не большую указанной на рис. 6

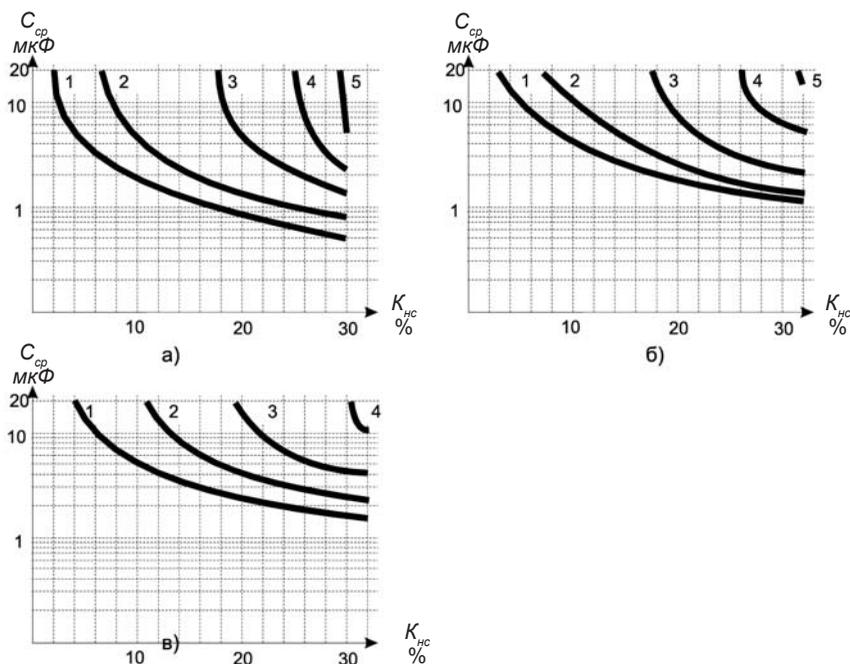


Рис. 6

Критические уровни отклонения δ емкости замкнутой фазы сети от среднего значения в зависимости от среднего значения емкости фаз сети C_{cp} и коэффициента несимметрии емкостей фаз сети $K_{нс}$:

Кривая 1 - $\delta = 0\%$; кривая 2 - $\delta = +1...-1\%$; кривая 3 - $\delta = +3...-1,5\%$;
 кривая 4 - $\delta = +5...-2,5\%$; кривая 5 - $\delta = +6...-3\%$.

а) для трехфазной сети напряжением 400 В, $I_{\Delta n} = 10$ мА;

б) для трехфазной сети напряжением 230 В, $I_{\Delta n} = 10$ мА;

в) для трехфазной сети напряжением 400 В, $I_{\Delta n} = 30$ мА

$$\delta_i = (3 \cdot C_i - \sum_{i=A,B,C} C_i) / \sum_{i=A,B,C} C_i \cdot 100\%.$$

Эта же причина (несимметрия емкостей в защищаемой зоне сети) может приводить к ложным срабатываниям УЗО. Поэтому условием

правильной эксплуатации (установки) УЗО является соблюдение **Требования 3**: *эффективность защиты обеспечивается при условии, что емкости фаз (полюсов) в защищаемой зоне сети C_{ϕ} не превышают критических значений, указанных на рис. 7.*

Одновременное существование несимметрии емкостей фаз (полюсов) сети в защищаемой УЗО зоне и вне ее вносит дополнительные условия обеспечения работоспособности УЗО. Наиболее неблагоприятным является совпадение условий:

.1 в питающей УЗО сети за фазой с наибольшей емкостью следует фаза с наименьшей емкостью;

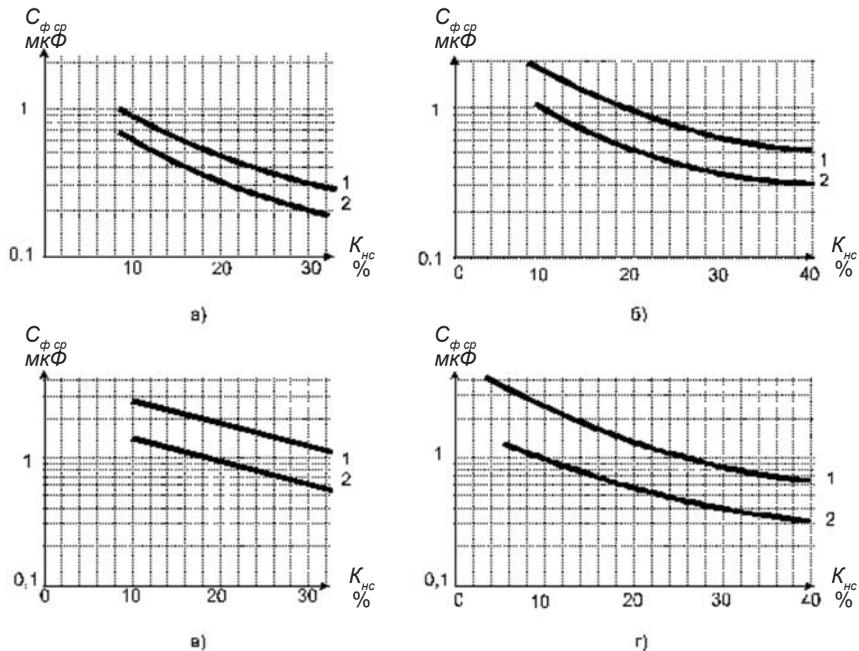


Рис. 7

Зависимости критической емкости фаз в защищаемой зоне сети $C_{\phi, \text{ср}}$ от коэффициента несимметрии емкости фаз в защищаемой зоне сети $K_{\text{н}\phi}$ и средней емкости фаз сети вне защищаемой зоны $C_{\text{ср}}$.

Кривая 1 – $C_{\text{ср}} = 20$ мкФ; кривая 2 – $C_{\text{ср}} = 1$ мкФ.

- а) для трехфазной сети напряжением 400В, $I_{\Delta n} = 10$ мА;
- б) для трехфазной сети напряжением 230В, $I_{\Delta n} = 10$ мА;
- в) для трехфазной сети напряжением 400В, $I_{\Delta n} = 30$ мА;
- г) для однофазной сети напряжением 230В, $I_{\Delta n} = 10$ мА

.2 в защищаемой УЗО зоне фазе с наибольшей емкостью предшествует фаза с наименьшей емкостью;

.3 наибольшей емкостью в сети и в защищаемой УЗО зоне обладает одна и та же фаза;

.4 замыкание (прикосновение человека) происходит к фазе с наименьшей емкостью в защищаемой зоне.

Поэтому условием правильной эксплуатации (установки) УЗО является соблюдение **Требования 4:** *для предупреждения ложных срабатываний и пропусков срабатывания УЗО необходимо обеспечение несовпадения фаз с наибольшей емкостью в защищаемой УЗО зоне и вне ее.*

Для исключения возможности возникновения режимов работы сети, когда протекающий через тело человека опасный ток не вызывает срабатывание УЗО, необходимо выполнять **Требование 5:** *емкость фаз участка сети, защищаемого УЗО, не должна превышать критических значений (см. рис. 8).*

Таким образом, рассматриваемая конструкция УЗО, по сравнению с иногда приспособляемыми (более – для проформы) для сетей с изолированной от корпуса судна нулевой точкой источника устройствами «берегового» типа (одноканальные устройства на основе дифференциального способа выявления токов утечки на землю (корпус судна)), демонстрирует приемлемую работоспособность. Тогда как применение «одноканальных» УЗО в разветвленных судовых сетях с несимметрией емкостей фаз сети относительно корпуса является неэффективным, а в большинстве случаев – снижает надежность электроснабжения.

Серийный выпуск проанализированных в статье двухканальных УЗО организован под маркой УЗО-С петербургским предприятием «ЭРМА». Конструкция УЗО-С и его производство имеют одобрение Российского морского регистра судоходства. Устройство выпускается как в однофазной версии, так и в трехфазной версии. Гамма модификаций позволяет подобрать УЗО для наиболее применимых напряжений сети питания, для различных токов нагрузки защищаемого участка сети и для различных уставок срабатывания защиты. Предусмотрены УЗО с задержкой по времени срабатывания, что позволяет обеспечить необходимую селективность работы многоуровневой системы защиты.

Однако, как следует из приведенных выше рекомендаций, установка УЗО на судах требует анализа условий их применений, т. е. привязки к особенностям электроустановки конкретного судна. При

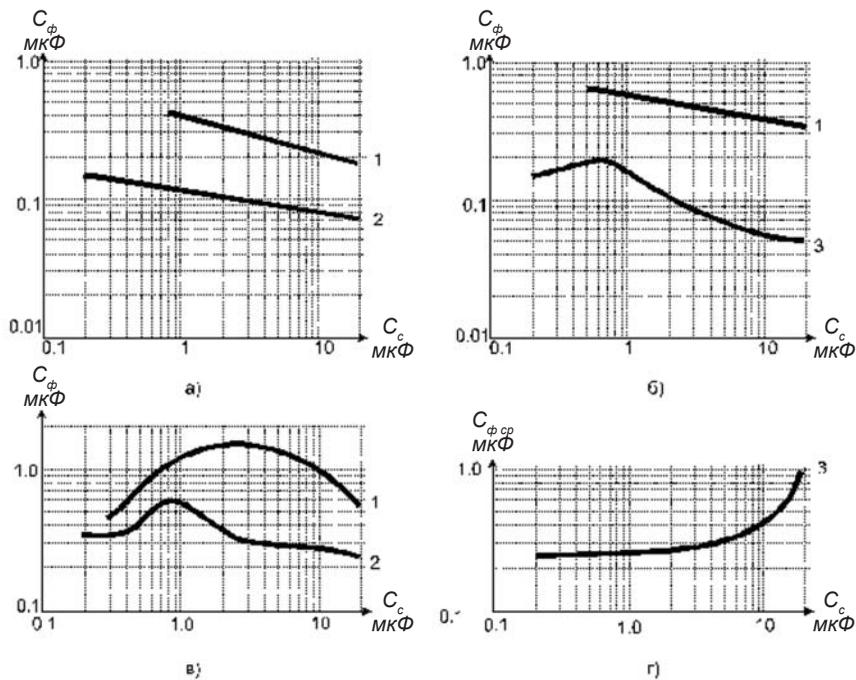


Рис. 8

Зависимость допустимых значений емкости фаз в защищаемой УЗО зоне сети C_{ϕ} от емкостей фаз сети C_c для различных уровней несимметрии емкости фаз относительно земли K_{nc} .

Кривая 1 – $K_{nc} = 10\%$; кривая 2 – $K_{nc} = 30\%$; кривая 3 – $K_{nc} = 40\%$.

- а) в трехфазной сети 380 В, $I_{\Delta n} = 10$ мА;
- б) для трехфазной сети напряжением 220 В, $I_{\Delta n} = 10$ мА;
- в) для трехфазной сети напряжением 380 В, $I_{\Delta n} = 30$ мА;
- г) в однофазной сети 220 В, $I_{\Delta n} = 10$ мА

этом существенными являются сведения о величине емкостных проводимостей фаз судовой сети относительно корпуса судна. Пока это доступно только узкой группе специалистов. Причина – отсутствие устройства, позволяющего просто и достоверно измерять величины этих емкостных связей. Поэтому актуальной остается задача разработки и организации выпуска простого и надежного измерителя емкостей фаз сети относительно корпуса судна. Это позволило бы упростить процедуру привязки УЗО к электроустановке. Кроме того, такое устройство необходимо и для правильного выбора устройств контро-

ля сопротивления изоляции, и для оценки опасности перенапряжений в судовых сетях, и для ряда других задач.

Заключение

1. Устройство защитного отключения (УЗО) – коммутационное устройство, предназначенное для защиты персонала от поражения электрическим током и для защиты электрооборудования от возникновения пожароопасных ситуаций, обеспечивающее свои функции за счет быстрого отключения защищаемого участка сети и электроприемников от источника электрической энергии.

2. Применение устройств защитного отключения (УЗО) рекомендуется в качестве защитной меры для обеспечения условий электрической и пожарной безопасности персонала при эксплуатации нестационарных электроприемников со степенью защиты 1 и 01, не требующих высоких показателей надежности электроснабжения (допускающих перебои в своем электроснабжении) и получающих питание от сетей напряжением 127...380 В, при условии, что безопасность не может быть надежно обеспечена путем их заземления.

3. Для защиты следует использовать УЗО, предназначенные для применения в сетях, изолированных от земли (корпуса судна), и использующих в качестве информационных как минимум два сигнала, один из которых – ток НП. Выбор типа УЗО с целью достижения максимальной эффективности его применения должен производиться с учетом особенностей электрической сети.

4. Устройства защитного отключения целесообразно устанавливать в цепях питания штепсельных розеток, используемых для питания электроинструмента, санитарно – гигиенических устройств, нагревательных, отопительных приборов, медицинских и камбузных устройств и прочих электроприемников, используемых в «особо опасных» технологических помещениях, в каютах, коридорах и помещениях для пассажиров.

5. УЗО следует устанавливать в сетях из расчета защиты (с учетом коэффициента одновременности работы) не более 5 одновременно включенных электроприемников.

6. Для защиты следует применять устройства защитного отключения:

с величинами уставки срабатывания по току НП 30 мА – для обеспечения электро- и пожаробезопасности электроинструмента и передвижных (переносных) электроприемников);

с величинами уставки срабатывания по току НП 10 мА – для обеспечения электро- и пожаробезопасности переносных электроинструментов и бытовых электроприемников с классом защиты 1 и 01;

с величинами уставки срабатывания по току НП 2 и 6 мА – для обеспечения электробезопасности в ваннных комнатах, душевых помещениях, в банях и саунах, и в медицинских (процедурных) кабинетах.

7. При использовании УЗО в качестве основного средства защиты они должны соответствовать по своим характеристикам существующему в сети применения уровню емкости токоведущих частей относительно корпуса судна (на участке сети до УЗО и на участке сети после УЗО). Проверка соответствия уровней производится расчетом емкостей, а при недостатке данных – изменением на объекте.

8. Не рекомендуется устанавливать УЗО сразу же за разделительным или понижающим трансформатором. В противном случае следует осуществить дополнительные меры по обеспечению работоспособности УЗО.

9. УЗО является дополнительным средством защиты, имеющим конечную техническую надежность. Поэтому периодически, но не реже чем 1 раз в год, устройства защитного отключения должны проходить инструментальный контроль соответствия их токовременных характеристик защиты заданным, проводимый с использованием специализированных устройств проверки исправности УЗО.

10. Применение УЗО не сможет обеспечить «гарантированную» электробезопасность, но может значительно повысить уровень защищенности персонала судна.

Список литературы

1. Сирота И. М. Трансформаторы и фильтры напряжения и тока нулевой последовательности. – Киев: Наукова думка, 1983.

2. Правила классификации и постройки морских судов. Часть XI. – СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2010.

3. ГОСТ Р.50807-95 (МЭК 755-83). Устройства защитные, управляемые дифференциальным (остаточным) током. Общие требования и методы испытаний.

4. Брунав Я. П., Татьянченко Ю. Г. Судовые электрические сети. – Л.: Судостроение, 1982.

УДК 629.5.073.5:621.396.969.33:268

Н.Т. Ничипоренко, Э.М. Шацбергер, Б.Н. Сиваченко, В.Г. Яковлев

КРАТКИЙ АНАЛИЗ РАДИОЛОКАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЛЕДОКОЛЬНОГО ФЛОТА И ЕГО ВЛИЯНИЕ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ И БЕЗОПАСНОСТЬ ЛЕДОВОГО ПЛАВАНИЯ

В последнее время в публикациях о проблемах освоения Арктики обращается внимание на то, что решение задач функционирования Северного морского пути в качестве транспортного коридора «Восток – Запад» не должно происходить путем дальнейшего увеличения мощности ледоколов и ледокольно-транспортных судов, а лежит в плоскости мобилизации человеческого фактора. В этом аспекте человеческий фактор определяется тактикой плавания во льдах, которая выражается в оптимальном выборе пути, способах ледокольной проводки и приемах форсирования льда для безопасной и эффективной работы судов в ледовом плавании.

Оптимальность выбора пути зависит от качества научно-оперативного обеспечения ледового плавания. Создание в ААНИИ комплекса «АКМОН» позволяет судоводителям выполнять на судне работу научно-оперативного характера без участия в ней судовых гидрологов. Качество получаемой из Центра ледовой информации во многом зависит от верификации данных, получаемых от искусственных спутников Земли. В связи с тем, что в Арктике произошло резкое сокращение количества полярных станций и судов на трассах Северного морского пути, эта работа, в основном, стала зависеть от подготовленности судоводителей и их вооруженности техническими средствами наблюдения за ледовой обстановкой.

Эффективность и безопасность плавания находятся в тесной взаимосвязи и зависят от скорости движения. Показатель эффективности возрастает с увеличением скорости, а безопасность требует ее снижения. При плавании во льдах эта зависимость усиливается, т. к. сам лед относится к особо опасным явлениям судоходства, а условия ограниченной видимости и необходимость активного маневрирования в караване зачастую приводят к ситуациям, когда наступает дефицит времени для принятия решений. В таких случаях практика мореплавания требует повышения уровня организации вахтенной службы путем усиленного наблюдения с использованием всех имеющихся в наличии технических средств и привлечения дополнительного количества судоводителей.

Согласно положениям резолюций ИМО все суда должны быть оборудованы, как минимум, двумя независимыми радарными системами. В нашей стране РС допускает использование на судах, включая ледоколы и ледокольно-транспортные суда, радиолокационных станций 3- и 10-сантиметрового диапазона. Полярный кодекс в ст. 12.5.1 настоятельно рекомендует на судах ледового класса иметь РЛС 10-сантиметрового диапазона, однако этот диапазон из-за недостаточной разрешающей способности не может быть использован при плавании во льдах, т. к. изображение на экране РЛС получается размытым и расплывчатым. В результате РЛС 3-сантиметрового диапазона, помимо традиционного использования для обеспечения безопасности плавания, дополнительно служит целям ледового плавания.

К ним предъявляется ряд специфических требований:

- выбор оптимального пути плавания во льдах ледоколов и судов;
- контроль дистанции между судами и ледоколами в караване;
- контроль подхода к судам для взятия на буксир, околка застрявших судов;

определение кромок припайного льда, границ ледовых каналов, торосов, разводий и т. п.

Для отечественных РЛС «Океан-С», «Океан-М», «Наяда», «Вайгач» для целей ледового плавания используются только шкалы дальности до четырех морских миль. Большие шкалы дальности используются крайне редко, так достоверная максимальная дальность отображения ледовой информации на мониторе РЛС составляет 35 – 45 кбт и зависит от ледовых условий. Современные зарубежные РЛС 3-сантиметрового диапазона с используемым цифровым приемником имеют меньшую дальность обнаружения и отображения льда. Это результат дискредитации изображения при преобразовании в цифровую форму

видеосигнала и потери информации на ЖК мониторе при отображении. Эти исследования проведены на 87 судах, оборудованных современными навигационными РЛС ведущих мировых производителей в течение двух ледовых навигаций в Финском заливе.

Во время плавания атомного ледокола «Россия» в осенне-зимний период в Баренцевом и Карском морях был собран и впоследствии обработан большой статистический материал [1] по следующим направлениям:

- 1 фактические затраты времени судоводителя на определение дистанции до судна при проводке одного судна способом лидирования;
- 2 реальные затраты времени на определение места судна с помощью РЛС;
- 3 действительные затраты времени на выбор оптимального пути плавания во льдах;
- 4 достоверность радиолокационной информации на индикаторе кругового обзора РЛС 3-сантиметрового диапазона волн.

Статистический материал обработан по методу наименьших квадратов, который показал следующее (см. рис. 1).

1. Затраты времени на определение и контроль дистанции при проводке одного судна методом лидирования мало зависят от харак-

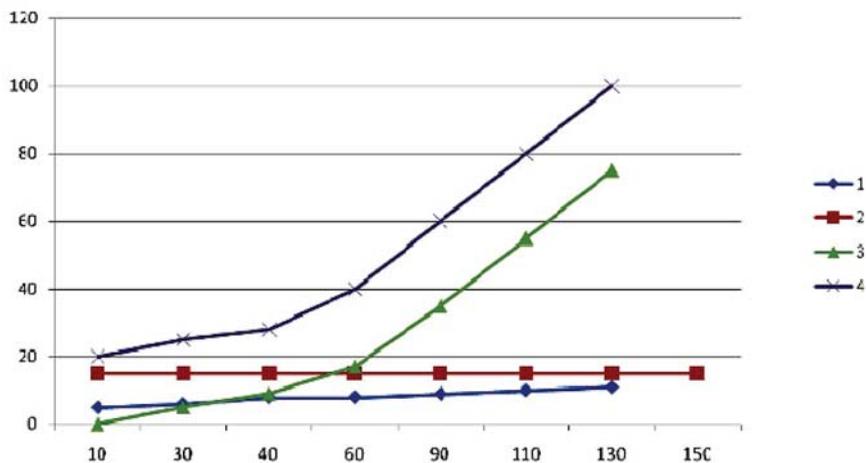


Рис. 1:
по оси X – толщина льда, см; по оси Y – время t в процентном отношении

теристик ледового покрова, в основном – от сплоченности льда и его толщины, но имеют тенденцию к увеличению с ростом толщины льда. А если проводить одновременно два или три судна методом лидирования, то затраты времени на контроль дистанции между ледоколом и судами возрастают (кривая 1).

2. Затраты времени на определение местоположения судна с помощью РЛС вообще не зависят от толщины ледовых полей. Если навигационная и ледовая обстановка позволяют определять местоположение каждые 10 мин, то в этом случае один раз в 10 мин уточняется положение судна. При необходимости этот интервал может быть увеличен или уменьшен, но судоводитель затрачивает определенное время для решения этой задачи, что видно на кривой 2.

Необходимо отметить, что при частых операциях определения места судна, контроля дистанции между судами в караване, выбора оптимального пути плавания в ледовых условиях использовать одну РЛС неудобно с точки зрения оперативности работы и удобства. Надо постоянно настраивать дальномер, варьировать ручками шкал дальности, усиления, ВАРУ, яркости. Поэтому судоводители используют одновременно две работающие РЛС 3-сантиметрового диапазона: одна РЛС 3 см используется для решения навигационных задач и контроля дистанции между судами в конвое; вторая – используется только для оптимального выбора пути плавания в ледовых условиях.

3. Кривая 3 показывает нам зависимость между затратами времени на выбор оптимального пути плавания и толщиной ледового покрова:

$$t = 0,048 h^2, \text{ коэффициент корреляции } Z = 0,70,$$

где t – затраты времени, %, к общему времени наблюдений в течение одной вахты;

h – толщина, см, сплоченного 9 – 10-бального льда. Затем, суммировав все три кривые, мы получим кривую 4, рис. 1.

То обстоятельство, что кривая 4 в результате аппроксимации достигает ординаты 100 % и теоретически может превысить ее, наталкивает на мысль о существовании некоторой предельной толщины льда, при которой судоводители вынуждены обращаться к РЛС практически постоянно. Действительно, $h = 120 - 130$ см при плавании в зимний период является такой толщиной, при которой ледокол вынужден переходить к работе ударами, скорость продвижения снижается до 2 уз. и менее. В таких условиях успех продвижения каравана всецело зависит от выбора пути плавания по более легким льдам. Практика показывает, что в случаях плавания в тяжелых льдах, на решение задачи выбо-

ра оптимального пути плавания затрачивается практически все время работы судоводителя. Возникает своеобразный «дефицит времени» работы судовой РЛС для решения других судоводительских задач.

Существование «дефицита времени» работы судовой РЛС является подтверждением необходимости к оснащению ледоколов специальной РЛС, предназначенной для решения задач выбора оптимального пути плавания во льдах в ближней зоне. В качестве такой РЛС предлагается использовать РЛС миллиметрового диапазона радиоволн, которые имеют нижеперечисленные важные преимущества по сравнению с существующими РЛС 3-сантиметрового диапазона.

1. Точностные параметры и разрешение по углу и дальности такой РЛС аналогичны БРЛС в системах СУДС при допустимых для судов ледового плавания размерах антенных систем.

В настоящее время находят широкое применение системы индикации объектов и контроля среды с обратным рассеянием. Высокая чувствительность миллиметровых волн к структуре неровностей поверхности – волнам, ряби, льду, снегу, пене на воде, растительному покрову на суше и состоянию почвы делает их эффективным средством измерения характеристик объектов.

Таблица 1.1

Длина волны, λ см	β , град	σ , м ²	G, Козф. усил.	α_r , град	$\tau_{имп}$, мкс	$\Delta\varphi_0$, град	ΔD_0 , м	δD_n , м	$\delta\varphi_n$, град
10	0,072	$1,27 \cdot 10^3$	$8,48 \cdot 10^2$	2,29	0,33	1,6	49	27,9	0,91
3,2	0,023 3,11	$1,41 \cdot 10^4$ 11,0	$2,55 \cdot 10^3$ 3,1	0,73 3,13	0,106 3,11	0,51 3,13	15,9 3,08	8,98 3,1	0,29 3,13
0,82	0,006 11,9	$1,92 \cdot 10^5$ $8,25 \cdot 10^2$	$2,36 \cdot 10^4$ 12,7	0,18 12,7	0,027 12,2	0,12 12,7	4,05 12,1	2,29 12,2	0,06 15,17
<p>Примечание. λ – длина волны РЛС; β – угол наклона диаграммы направленности антенны в вертикальной плоскости; σ – эффективная поверхность рассеяния объектов; G – коэффициент усиления антенны, α_r – ширина направленности антенны в горизонтальной плоскости; $\tau_{имп}$ – длительность зондирующего импульса; $\Delta\varphi_0$ – разрешающая способность по углу; ΔD_0 – разрешающая способность по дальности; δD_n – СКО измерения дальности; $\delta\varphi_n$ – СКО измерения направления.</p>									

В табл. 1.1 показан сравнительный анализ радиолокационных станций морской подвижной службы, данные взяты из [2], [3].

В данной таблице красным цветом показаны величины, во сколько раз данный параметр больше (лучше) этого же параметра при длине волны в 10 см.

2. Большая контрастность наблюдения ледовых образований.

Если задать технически реализуемые параметры РЛС в различных диапазонах волн, то это позволит получить количественные значения потенциальной информативности – S_n соответствующих РЛС для сравнения между собой. Положим $P_u = 50 \cdot 10^3$ Вт; $N_w = 10$; $m = 3$; $d_g = 3$ м; $d_g = 0,4$ м; $\eta = 0,9$,

где P_u – импульсная мощность передающего устройства;
 N_w – коэффициент шума приемного устройства;
 m – коэффициент различимости;
 d_g – вертикальный размер антенны;
 η – КПД антенно-волнового тракта.

Значения потенциальной емкости, полученные для РЛС различных диапазонов волн, приведены в табл. 1.2.

Таблица 1.2

λ , см	F , Гц	S_n , дв. Ед.
10	$3 \cdot 10^9$	$4,62 \cdot 10^9$
3,2	$9,375 \cdot 10^9$	$1,06 \cdot 10^{11}$
0,812	$36,6 \cdot 10^9$	$4,49 \cdot 10^{12}$

Как видно, с уменьшением длины волны (увеличением частоты заполнения импульса) количество информации, которое может выдать (извлечь) РЛС возрастает. Так, при уменьшении длины волны в 3 – 4 раза, информативность возрастает на 1 – 2 порядка.

В реальных условиях РЛС является составной частью радиолокационного канала. Следовательно, на ее реальную информационную емкость влияет ряд факторов: условия распространения радиоволн, наличие подстилающей поверхности, влияние различных метеословий, внешних помех, внутренних шумов приемного устройства, оконечные устройства. Все эти факторы вызывают потери информации в радиолокационной системе относительно информационной потенциальной емкости.

3. Дальность обнаружения ледовых образований в миллиметровом диапазоне не уступает дальности обнаружения в сантиметровом диапазоне, а по дальности обнаружения мелкобитого льда превосходит ее. Так как обнаружение объектов в миллиметровом диапазоне ведется нижним лепестком диаграммы направленности антенны (ДНА) в вертикальной плоскости (см. рис. 2),

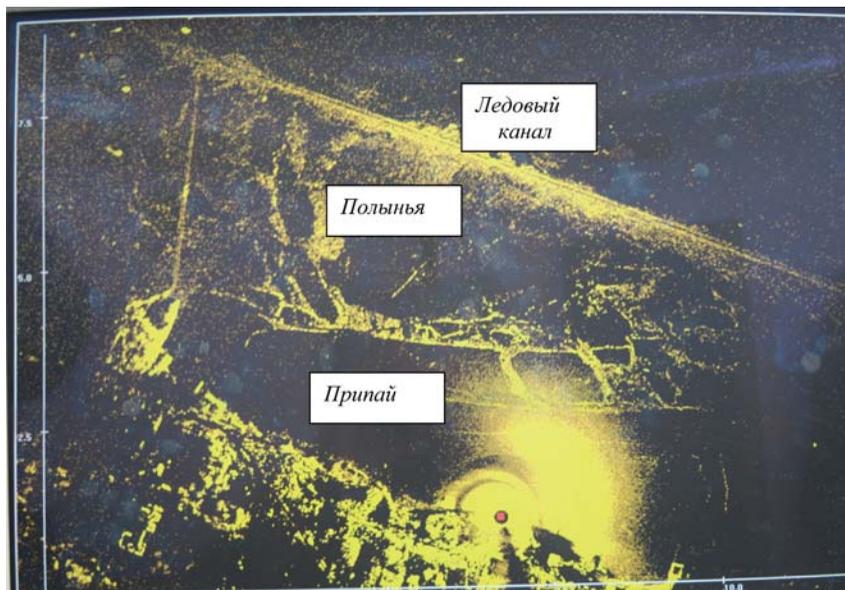


Рис. 2
РЛС «Балтика», k-band, шкала 10 км

$$\beta = \lambda / 4 h,$$

где h – высота установки антенны;
 λ – длина волны РЛС;
 β – угол наклона нижнего лепестка ДНА, рад. [2].

Таким образом, чем короче длина волны, тем лучше обнаруживаются низко расположенные объекты (мелкобитый торошенный лед).

4. Определение параметров сплоченности ледового покрова не хуже, чем при визуальном наблюдении.

В целом, информативность радиолокационного изображения в миллиметровом диапазоне на 3 порядка выше, чем в сантиметровом диапазоне. При этом имеется возможность использовать новые качественные характеристики в миллиметровом диапазоне: ракурс судна, его ширину, длину для решения задач ледового плавания.

Указанные и другие преимущества РЛС миллиметрового диапазона позволяют утверждать, что одна из существующих РЛС сантиме-

трового диапазона может быть успешно заменена на РЛС миллиметрового диапазона.

Находящиеся в настоящее время на судах и ледоколах судовые РЛС сантиметрового диапазона должны служить инструментом для решения традиционных навигационных задач плавания: контроль местоположения, оценка навигационной обстановки, ситуации расхождения судов, плавание в зонах разделения движения и др.

Однако при этом необходимо провести натурные испытания РЛС миллиметрового диапазона типа «МР-2ПВ» [4] в реальных условиях на ледоколе для исследований и уточнения ряда задач:

максимальной дальности обнаружения мощных ледовых образований;

исследований отражающих свойств ледовых образований в миллиметровом диапазоне и сравнение полученных данных с данными сантиметрового диапазона;

усовершенствование тактики ледового плавания с использованием высокоточной РЛС миллиметрового диапазона с целью повышения безопасности ледового плавания и увеличения скорости проводки;

уточнение воздействия специфических метеоусловий северных широт (полярная ночь, снег, низовые метели, парение каналов и разводий) на дальность обнаружения объектов в миллиметровом диапазоне.

Полученные материалы, в дополнение к имевшимся, позволяют подтвердить правильность и целесообразность использования в качестве ледового радара РЛС миллиметрового диапазона.

Список литературы

1. Жерлаков А.В., Ничипоренко Н.Т., Бабич Н.Г., Сиваченко Б.Н. О необходимости использования РЛС миллиметрового диапазона радиоволн при плавании ледоколов и транспортных судов во льдах // Проблемы безопасности мореплавания. – В.О. Мортехинформреклама 1987, – С. 77 – 81.

2. Ничипоренко Н.Т., Байрашевский А.М. Судовые радиолокационные системы : [учебник]. – М.: Транспорт, 1982. – 316 с.

3. Ничипоренко Н.Т. Теория, разработка и внедрение комплекса радиолокационных средств миллиметрового диапазона с целью повышения безопасности мореплавания / Диссертация на соискание ученой степени д.т.н. – Л.: ЛВИМУ, 1991.

4. Техническое описание МР-2ПВ судовой РЛС миллиметрового диапазона, ЗАО МКИС. – СПб., 2004.

5. Дмитриев В.И., Шацбергер Э.М. К вопросу об обеспечении эффективности и безопасности плавания транспортных судов в Арктике // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – Вып. 31. – 2008. – С. 31 – 41.

Ю.А. Кривцов

МОДЕРНИЗАЦИЯ АЛГОРИТМА ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ СТОЛКНОВЕНИЙ СУДОВ В СУДОВОЙ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СТАНЦИИ СО СРЕДСТВОМ АВТОМАТИЧЕСКОЙ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ ПРОКЛАДКИ

В настоящее время одним из электронных средств на борту судна, позволяющим в автоматическом режиме предупреждать судоводителя об опасном сближении является радиолокационная станция (РЛС), оснащенная средством автоматической радиолокационной прокладки (САРП).

Алгоритм предупреждения столкновения судов в существующих системах САРП базируется на использовании так называемых охранных зон, построенных вокруг собственного судна. При вхождении цели в данную охранную зону судоводителю подается сигнал об опасном сближении. Аргументом для построения охранной зоны в таком случае является дистанция от цели до собственного судна. Охранная зона на экране РЛС оснащенной САРП показана на рис. 1.

Так, при построении охранной зоны в 2 мили вокруг собственного судна, при приближении целей к судну на 2 мили и менее, САРП будет выдавать сигнал об опасном сближении. Изменяя диаметр охранной зоны, можно регулировать степень приближения целей, при которой будет выдаваться сигнал об опасном сближении.

Недостатком такого подхода, то есть выбора параметра дистанции как аргумента для построения охранной зоны, является тот момент, что он не позволяет учитывать различные скорости движения целей. Так, запас времени от входа цели в охранную зону до прихода на дистанцию кратчайшего сближения будет достаточен для выполнения маневра расхождения с целью, следующей низкой относительной скоростью сближения, но будет недостаточен для расхождения с целью, имеющей высокую относительную скорость сближения. Возможным решением данной проблемы является расширение охранной зоны, однако это вызовет пропорциональное увеличение ложных тревог от целей с малой относительной скоростью сближения.

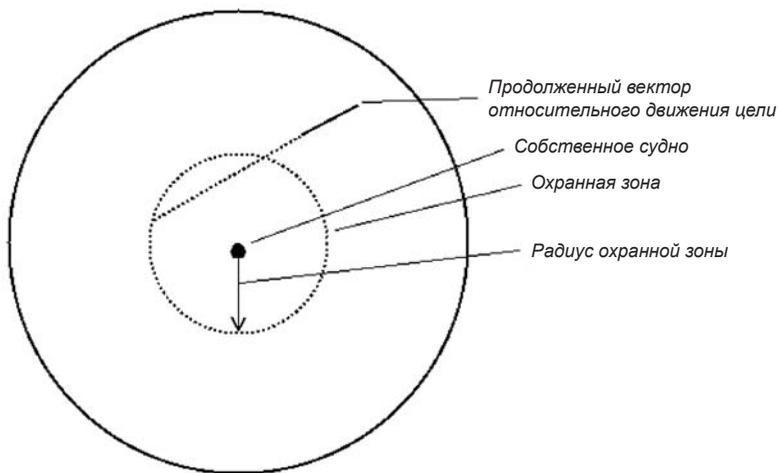


Рис. 1
Охранная зона на экране РЛС с САРП

Некоторые образцы САРП позволяют так же задавать охранную зону одновременно двумя параметрами – дистанцией кратчайшего сближения и временем до точки кратчайшего сближения. Сигнал об опасности столкновения подается одновременно, если параметры $D_{кр}$ и $T_{кр}$ цели менее заданных (рис. 2).

Использование параметра времени в данном случае позволяет компенсировать недостаток первого метода, то есть иметь фиксированный запас времени для выполнения маневра расхождения, независимо от относительной скорости сближения.

Однако недостатком такого подхода является тот факт, что сигнал тревоги подается только в том случае, если одновременно оба параметра ($D_{кр}$, $T_{кр}$) менее заданных, то есть возможны следующие ситуации:

$$D_{кр.ц.} < D_{кр.з.} \wedge T_{кр.ц.} > T_{кр.з.}; \quad (1)$$

$$D_{кр.ц.} > D_{кр.з.} \wedge T_{кр.ц.} < T_{кр.з.}; \quad (2)$$

где $D_{кр.ц.}$ – параметр дистанции кратчайшего сближения цели;

$D_{кр.з.}$ – заданная дистанция кратчайшего сближения;

$T_{кр.ц.}$ – время выхода на дистанцию кратчайшего сближения цели;

$T_{кр.з.}$ – заданное время выхода на дистанцию кратчайшего сближения.

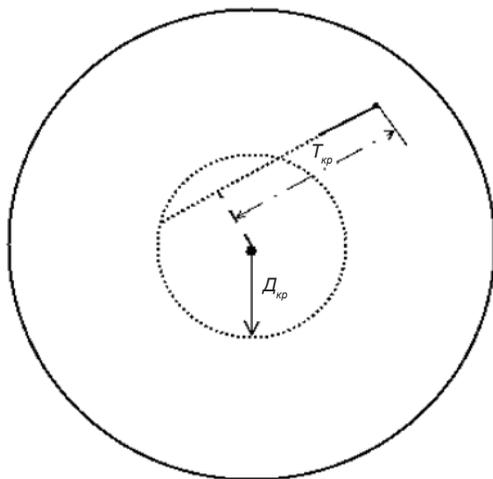


Рис. 2
Охранная зона заданная параметрами $T_{кр}$ и $D_{кр}$

Другими словами, в первом случае сигнал об опасном сближении будет подан при дистанции, возможно значительно меньше заданной, во втором случае – при дистанции, равной заданной, но запас времени будет менее заданного (возможно значительно меньше).

Изменение данного алгоритма к виду – или $D_{кр}$ менее заданного, или $T_{кр}$ менее заданного – не решит проблему, более того, усложнит классификацию целей по степени опасности.

Учитывая изложенные выше недостатки алгоритмов, рассмотрим возможность применения только параметра времени для предупреждения судоводителя об опасном сближении.

В качестве параметра для построения охранной зоны возьмем параметр τ следующего вида:

$$\tau = T_{кр} + \Delta t, \quad (3)$$

где Δt – достаточный для совершения маневра расхождения интервал времени.

Таким образом, устанавливая значение τ параметра, имеющего размерность времени, мы устанавливаем запас времени для выполнения маневра расхождения.

Рассмотрим ситуацию сближения двух судов (рис. 3), где \vec{V}_1 и \vec{V}_2 – векторы скоростей собственного судна и цели соответственно, \vec{V} – вектор относительной скорости сближения.

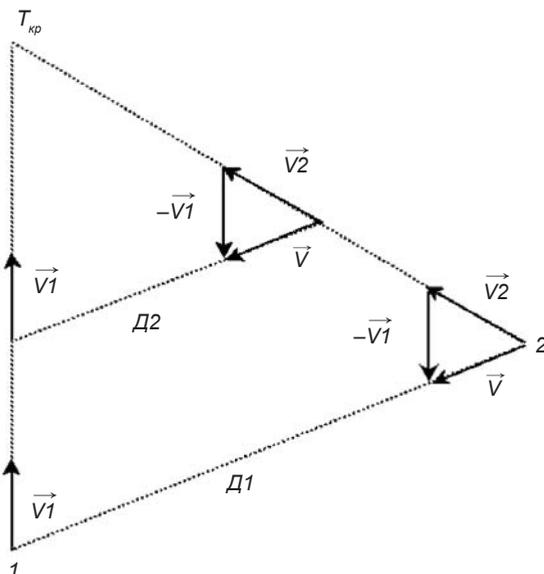


Рис. 3
Геометрия конфликтной ситуации при $D_{кр} = 0$

Для случая, когда $D_{кр}$ между судами равно нулю (рис. 3), $T_{кр}$ вычисляется по формуле

$$T_{кр} = T_{пк} = -D_1 / V, \quad (4)$$

где $T_{пк}$ – время до точки пересечения курсов собственного судна и цели.

Однако в большинстве случаев $D_{кр}$ не равно нулю, см. рис. 4, где \vec{V}_1 и \vec{V}_2 – векторы скоростей собственного судна и цели соответственно, \vec{V} – вектор относительной скорости сближения для случая $T_{кр} = 0$, \vec{V}' – вектор относительной скорости сближения для случая $T_{кр} = t$, t – длина перпендикуляра, опущенного из начала вектора скорости собственного судна на продолжение вектора \vec{V}' .

откуда соотношение между $T_{кр}$ и $T_{пк}$:

$$T_{пк} = T_{кр} + m^2 / ((V')^2 T_{кр}). \quad (10)$$

Так как $T_{кр}$ зависит от относительной скорости сближения (5), то существует опасность того, что в случаях сближения с малой относительной скоростью, установленное значение τ (время выдачи сигнала об опасном сближении) будет достигнуто на слишком малой дистанции. Такими случаями является сближение на одном курсе (следование цели в кильватере собственного судна с немного превосходящей скоростью), а так же, когда курс собственного судна и курс цели образуют очень острый угол.

Данная проблема решается введением в выражение (3) с учетом (5) порогового значения дистанции:

$$\tau_m = - (D' - D_m) / V' + \Delta t, \quad (11)$$

где τ_m – параметр построения охранной зоны, учитывающий пороговое значение сближения по дистанции;

D_m – порог сближения по дистанции.

Построим график значений дистанции выдачи предупреждения об опасном сближении для $\tau = \tau_m = 15$ мин, $D_m = 0,5$ мили (рис. 5) в зависимости от скорости сближения.

Как видно из графика, для параметра τ_m сигнал об опасном сближении будет выдан на дистанции, стремящейся к пороговой при скорости сближения, стремящейся к 0, а для параметра τ – на дистанции, стремящейся к 0 при скорости сближения, стремящейся к 0.

Таким образом, используя классический подход к анализу ситуации сближения судов и применяя в качестве аргумента для построения охранной зоны в судовой РЛС с САРП только параметр времени, мы сможем решить следующие задачи:

иметь фиксированный запас времени для выполнения маневра расхождения, независимо от относительной скорости сближения с целью;

устранить недостаток алгоритма, использующего одновременно параметры $D_{кр}$ и $T_{кр}$ в качестве параметров охранной зоны;

упростить задачу классификации целей по степени опасности для дальнейшего применения в системах предупреждения столкновения судов.

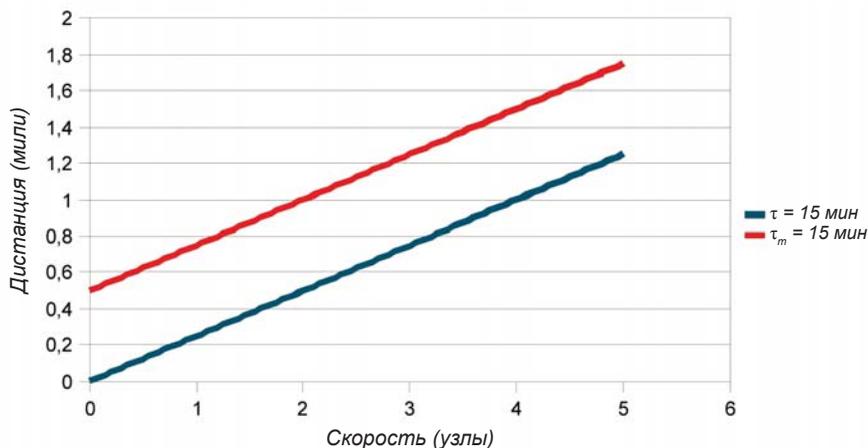


Рис. 5
Зависимость дистанции выдачи сигнала об опасном сближении для значений параметра τ и τ_m , равных 15 мин

Список литературы

1. Жерлаков А.В. и др. Радиолокационные системы предупреждения столкновения судов. – Л.: Судостроение, 1984.
2. Leveson N.G., Reese J.D. Sample TCAS intent specification. – Safeware Ingeneering corporation.
3. Introduction to TCAS II version 7 – U.S. Department of transportation, November 2000.
4. Shield R.R. Rule Optimization for Airborne Aircraft Separation, Dissertation. – Wien, Technical University.
5. Bole A.G., Dineley W.O., Wall A. Radar and ARPA Manual - Butterworth-Heinemann; 2 edition 2005.
6. Bridge Master E Radar Operating Instructions.
7. Marine radar/ARPA FAR-21x7 operator's manual.

*А.И. Кулинич, А.Н. Маринич, А.В. Припотнюк,
Ю.М. Устинов, В.П. Томсон*

ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ ОДНОДИАПАЗОННЫХ И ДВУХДИАПАЗОННЫХ СУДОВЫХ ПРИЕМНИКОВ ГЛОНАСС/GPS В СТАНДАРТНОМ РЕЖИМЕ

Второе поколение спутников ГЛОНАСС-М и третье поколение спутников GPS излучают навигационные сигналы для гражданских потребителей в двух частотных диапазонах: L1 (~1600 МГц) и L2 (~1250 МГц). Прежние поколения спутников для гражданских потребителей излучали такие сигналы только в диапазоне частот L1 (~1600 МГц). Для приема и обработки сигналов в двух диапазонах частот судовые однодиапазонные приемники ГЛОНАСС/GPS должны быть модернизированы в двухдиапазонные, где будут исключены ионосферные погрешности при измерении радионавигационных параметров: квазидальности и квазискорости.

В табл. 1 приведены составляющие среднеквадратической погрешности (СКП) измерения квазидальности и квазискорости, а также суммарные погрешности для однодиапазонного приемника.

Таблица 1

Источник погрешности	СКП квазидальности, м	СКП квазискорости, м/с
	Диапазон L1	Диапазон L1
Погрешность взаимной синхронизации спутников	2,7	$0,4 \cdot 10^{-2}$
Погрешность эфемерид	1,5	$0,1 \cdot 10^{-2}$
Ионосферная погрешность	7,0	$4 \cdot 10^{-2}$
Тропосферная погрешность	1,5	$0,1 \cdot 10^{-2}$
Погрешность многолучевости	3,0	$1 \cdot 10^{-2}$
Шумовая погрешность	2,5	$2 \cdot 10^{-2}$
Суммарная погрешность	8,7	$4,6 \cdot 10^{-2}$

Из табл. 1 следует, что ионосферные погрешности являются наибольшими.

1 Сравнение точностных характеристик однодиапазонных и двухдиапазонных судовых приемников в стандартном режиме работы

Из табл. 1 следует, что для однодиапазонного приемника суммарная СКП квазидальности $\sigma_{кд} = 8$ м, а суммарная СКП квазискорости $\sigma_{кс} = 4,6 \cdot 10^{-2}$ м/с.

Погрешность положения судна $\sigma_{пол}$ определяется с помощью выражения

$$\sigma_{пол} = \sigma_{кд} \text{HDOP},$$

а СКП линейной скорости судна $\sigma(V)$ на плоскости

$$\sigma(V) = \sigma_{кс} \text{HDOP},$$

где HDOP – геометрический фактор на плоскости.

Если HDOP = 1, то погрешности однодиапазонного приемника будут: $\sigma_{пол} = 8$ м; $\sigma(V) = 4,6 \cdot 10^{-2}$ м/с = 0,085 уз.

В двухдиапазонных судовых приемниках ионосферные погрешности исключаются путем использования простейшего алгоритма обработки результатов измерений в обоих частотных диапазонах.

Алгоритм обработки основан на том, что ионосферная погрешность в течение длительного времени (~ 15 мин) постоянна, а величина ее зависит от несущей частоты сигнала.

Справедливы соотношения:

– при измерении квазидальности

$$\begin{cases} R_0 = R_{изм1} + A / f_1^2 \\ R_0 = R_{изм2} + A / f_2^2 \end{cases}$$

где R_0 – квазидальность без ионосферной погрешности;
 $R_{изм1}$, $R_{изм2}$ – измеренные квазидальности на частотах f_1 и f_2 ;
 A – постоянный коэффициент;

– при измерении квазискорости

$$\begin{cases} V_0 = V_{ИЗМ1} + B/f_1 \\ V_0 = V_{ИЗМ2} + B/f_2 \end{cases}$$

где V_0 – квазискорость без ионосферной погрешности;
 $V_{ИЗМ1}$, $V_{ИЗМ2}$ – измеренные квазискорости на частотах f_1 и f_2 ;
 B – постоянный коэффициент.

После решения систем уравнений получим:

$$R_0 = R_{ИЗМ1} \cdot 1/(1 - m^2) - R_{ИЗМ2} \cdot m^2/(1 - m^2);$$

$$V_0 = V_{ИЗМ1} \cdot 1/(1 - m) - V_{ИЗМ2} \cdot m/(1 - m);$$

Для ГЛОНАСС и GPS $m = f_2/f_1 = 0,77$.

С учетом этого

$$R_0 = 2,53 R_{ИЗМ1} - 1,53 R_{ИЗМ2};$$

$$V_0 = 4,5 V_{ИЗМ1} - 3,5 V_{ИЗМ2}.$$

С помощью рассмотренных выше алгоритмов обработки измерений в двухдиапазонных приемниках ГЛОНАСС/GPS ионосферные погрешности исключаются, остальные квазипостоянные погрешности остаются без изменений, но возрастают случайные погрешности: погрешности многолучевости и шумовые погрешности.

Случайные погрешности многолучевости $\sigma_{млч}$ одинаковы в обоих частотных диапазонах:

– при измерении квазидальности $\sigma_{млч.1} = \sigma_{млч.2} = \sigma_{млч} = 1$ м;

– при измерении квазискорости $\sigma_{млч.1}(V) = \sigma_{млч.2}(V) = \sigma_{млч}(V) = 1 \cdot 10^{-2}$ м/с.

В результате обработки измерений СКП многолучевости при измерении квазидальности в двухчастотном приемнике представится в виде:

$$\sigma_{млч}(кд) = \sigma_{млч} \sqrt{2,53^2 + 1,53^2} = 2,59 \sigma_{млч} = 8,85 \text{ м,}$$

а СКП при измерении квазискорости –

$$\sigma_{млч}(кс) = \sigma_{млч}(V) \sqrt{4,48^2 + 3,48^2} = \sigma_{млч}(V) 5,66 = 5,66 \cdot 10^{-2} \text{ м/с.}$$

Шумовые погрешности в обоих частотных диапазонах неодинаковы, т. к. излучаемая спутниками мощность на частоте $L2$ меньше.

При измерении квазидальности $\sigma_{ш.1} = 2,5$ м; $\sigma_{ш.2} = 6,6$ м.

При измерении квазискорости $\sigma_{ш.1} (V) = 2 \cdot 10^{-2}$ м/с; $\sigma_{ш.2} (V) = 4 \cdot 10^{-2}$ м/с.

В результате обработки измерений квазидальности в двухдиапазонном приемнике шумовая СКП изменится и может быть определена с помощью выражения

$$\sigma_{ш} (к\Delta) = \sqrt{\sigma_{ш.1}^2 \cdot 2,53^2 + \sigma_{ш.2}^2 \cdot 1,53^2} = 12 \text{ м,}$$

а шумовая СКП при измерении квазискорости –

$$\sigma_{ш} (к\text{с}) = \sqrt{\sigma_{ш.1}^2 (V)^2 \cdot 4,48^2 + \sigma_{ш.2}^2 (V)^2 \cdot 3,48^2} = 16 \cdot 10^{-2} \text{ м/с.}$$

Из приведенных соотношений следует, что погрешности многолучевости и шумовые погрешности в двухдиапазонном приемнике (см. табл. 2) по сравнению с однодиапазонным при измерении квазидальности соответственно возрастают в 3 и в 4,8 раз. Те же погрешности при измерении квазискорости возрастают соответственно в 5,7 и в 8 раз.

Таблица 2

Источник погрешности	СКП квазидальности, м		СКП квазискорости, м/с	
	Однодиапазонный приемник (L1)	Двухдиапазонный приемник (L1, L2)	Однодиапазонный приемник (L1)	Двухдиапазонный приемник (L1, L2)
Погрешности взаимной синхронизации спутников	2,7	2,7	$0,4 \cdot 10^{-2}$	$0,4 \cdot 10^{-2}$
Погрешность эфемерид	1,5	1,5	$0,1 \cdot 10^{-2}$	$0,1 \cdot 10^{-2}$
Ионосферная погрешность	7,0	0,07	$4 \cdot 10^{-2}$	$0,04 \cdot 10^{-2}$
Тропосферная погрешность	1,5	1,5	$0,1 \cdot 10^{-2}$	$0,1 \cdot 10^{-2}$
Погрешность многолучевости	3,0	8,85	$1 \cdot 10^{-2}$	$5,66 \cdot 10^{-2}$
Шумовая погрешность приемника	2,5	12	$2 \cdot 10^{-2}$	$16 \cdot 10^{-2}$
Суммарная погрешность	8,7	15,4	$4,6 \cdot 10^{-2}$	$17,5 \cdot 10^{-2}$

2 Структурные схемы сглаживания отсчетов для уменьшения случайных погрешностей измерения в двухдиапазонном приемнике

Анализ погрешностей измерения в двухдиапазонном приемнике показал, что исключение ионосферных погрешностей, которые квазипостоянны во времени, сопровождается увеличением случайных погрешностей из-за явления многолучевости и шумовых погрешностей, вызванных собственным шумом приемника. Если случайные погрешности в обоих частотных диапазонах одинаковы, то на выходе двухдиапазонного приемника эти СКП увеличиваются при определении положения судна в 3 раза, а при определении скорости – в 5,7 раз.

На рис. 1 приведена структурная схема исключения ионосферной погрешности при измерении квазидальности двухдиапазонным приемником со скользящим усреднением отсчетов. Рассчитанная каждую секунду величина квазипостоянной ионосферной погрешности $A/f_1^2 = 1,53(\Delta R_{изм1} - \Delta R_{изм2})$ усредняется в течение предыдущих 400 с. Интервал усреднения выбирается в 3 раза меньше интервала стационарности ионосферы.

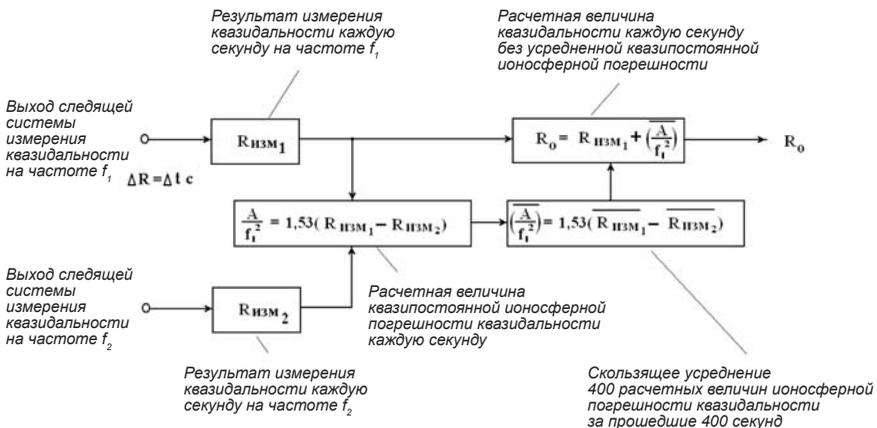


Рис. 1

В результате скользящего усреднения 400 единичных отсчетов результирующая шумовая СКП измерения квазидальности на выходе структурной схемы будет

$$\sigma_{\omega}(R) = \sigma_{\omega}(f_1) + \frac{\sqrt{1,53^2 [\sigma_{\omega}^2(f_1) + \sigma_{\omega}^2(f_2)]}}{20} = 2,5 + 0,36 = 2,86 \text{ м,}$$

а СКП многолучевости

$$\sigma_{\text{млч.о}}(R) = \sigma_{\text{млч}}(R) + \frac{\sqrt{1,53^2 + 2 \sigma_{\text{млч}}^2(R)}}{20} = 3 + 0,32 = 3,32 \text{ м.}$$

Остаточная величина ионосферной погрешности $\sigma_{\text{ион}}(R) = 0,7 \text{ м}$. Суммарная СКП измерения квазидальности на выходе двухдиапазонных приемников уменьшилась и составляет 5,55 м (см. табл. 3).

Уменьшение случайных погрешностей измерения квазискорости можно получить также путем усреднения отсчетов. Структурная схема исключения усредненной ионосферной погрешности в измеренной квазискорости на выходе двухдиапазонного приемника со скользящим усреднением отсчетов приведена на рис. 2.

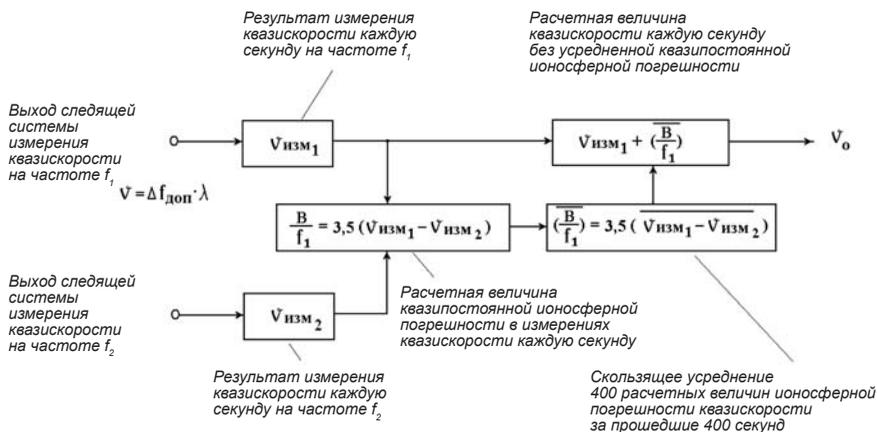


Рис. 2

СКП многолучевости при измерении квазискорости одинаковы в обоих частотных каналах $\sigma_{\text{млч}, 1}(V) = \sigma_{\text{млч}, 2}(V) = \sigma_{\text{млч}}(V) = 1 \cdot 10^{-2} \text{ м/с}$.

В результате скользящего усреднения 400 единичных отсчетов квазискорости результирующая СКП многолучевости (см. табл. 3) будет

$$\sigma_{млч,о} (V) = \sigma_{млч} (V) + \frac{\sqrt{3,5^2 \cdot 2 \sigma_{млч}^2 (V)}}{20} = 1 \cdot 10^{-2} + \frac{\sqrt{12,25 \cdot 2 \cdot 1 \cdot 10^{-4}}}{20} =$$

$$= 1,25 \cdot 10^{-2} \text{ м/с.}$$

СКП шумовая при измерении квазискорости разная в обоих частотных каналах:

$$\sigma_{ш1} (V) = 2 \cdot 10^{-2} \text{ м/с; } \sigma_{ш2} (V) = 4 \cdot 10^{-2} \text{ м/с}$$

Шумовая СКП квазискорости в результате усреднения определяется в помощью выражения

$$\sigma_{ш,о} (V) = \sigma_{ш1} (V) + \frac{\sqrt{3,5^2 \cdot [\sigma_{ш1}^2 (V) + \sigma_{ш2}^2 (V)]}}{20} =$$

$$= 2 \cdot 10^{-2} + \frac{\sqrt{12,25 \cdot [(2 \cdot 10^{-2})^2 + (4 \cdot 10^{-2})^2]}}{20} = 2,35 \cdot 10^{-2} \text{ м/с.}$$

В табл. 3 приведены составляющие погрешности квазидальности и квазискорости для трех видов приемников: однодиапазонного, двухдиапазонного и двухдиапазонного со скользящим усреднением отсчетов.

Таблица 3

Источник погрешности	СКП квазидальности $\sigma_{кд}$, м			СКП квазискорости $\sigma_{кск}$, м/с		
	Однодиапазонный приемник	Двухдиапазонный приемник	Двухдиапазонный приемник с усреднением	Однодиапазонный приемник	Двухдиапазонный приемник	Двухдиапазонный приемник с усреднением
1	2	3	4	5	6	7
Погрешность в з а и м н о й синхр. спутников	2,7	2,7	2,7	$0,4 \cdot 10^{-2}$	$0,4 \cdot 10^{-2}$	$0,4 \cdot 10^{-2}$
Погрешность эфемерид	1,5	1,5	1,5	$0,1 \cdot 10^{-2}$	$0,1 \cdot 10^{-2}$	$0,1 \cdot 10^{-2}$
Ионосферная погрешность	7,0	0,07	0,7	$4,0 \cdot 10^{-2}$	$0,04 \cdot 10^{-2}$	$0,4 \cdot 10^{-2}$
Тропосферная погрешность	1,5	1,5	1,5	$0,1 \cdot 10^{-2}$	$0,1 \cdot 10^{-2}$	$0,1 \cdot 10^{-2}$

1	2	3	4	5	6	7
Погрешность многолучевости	3,0	9,0	3,22	$1,0 \cdot 10^{-2}$	$5,7 \cdot 10^{-2}$	$1,25 \cdot 10^{-2}$
Шумовая погрешность приемника	2,5	12,0	2,86	$2,0 \cdot 10^{-2}$	$16,6 \cdot 10^{-2}$	$2,35 \cdot 10^{-2}$
Суммарная погрешность	8,7	15,4	5,55	$4,6 \cdot 10^{-2}$	$17,5 \cdot 10^{-2}$	$2,7 \cdot 10^{-2}$

Из табл. 3 следует, что двухдиапазонные приемники со скользящим усреднением отсчетов имеют наименьшую суммарную погрешность квазидальности и квазискорости.

Заключение

Двухдиапазонные судовые приемники ГЛОНАСС/GPS, в случае резкого увеличения шумовых погрешностей и погрешностей многолучевости, будут иметь преимущества перед эксплуатируемыми в настоящее время однодиапазонными приемниками при применении режима сглаживания случайных погрешностей измерений.

Список литературы

1. Концепция развития ГЛОНАСС // Материалы Третьей Международной конференции : Планирование глобальной радионавигации. – М, 2000.
2. Проект государственного стандарта РФ. Навигационные спутниковые системы. Глобальная навигационная система ГЛОНАСС (ГЛОНАСС-М). Параметры радионавигационного поля. Технические требования и методы испытаний.
3. Glonass Satellite Studus. «GPS World», 2000, V.II, № 2, p.17.
4. Бабуров В.И., Васильев Н.В., Иванцевич Н.В., Панов З.А. Совместное использование навигационных полей спутниковых радионавигационных систем и сетей псевдоспутников. – СПб.: Изд. Агентство «РДК-Принт», 2005. – 264 с.
5. Дуров А.А., Кан В.С., Мищенко И.Н., Никитенко Ю.И., Устинов Ю.М. Судовая радионавигация. Радионавигационные устройства и системы. Учебник для вузов. – М., 1998. – 205 с.

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ БЕРЕГОВЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ СУДОВ

При разработке принципов построения любой системы необходимо исходить из ее назначения и утвержденных требований, которые применительно к береговым системам регулирования движения судов на внутренних водных путях (ВВП) до настоящего времени в РФ не утверждены, поэтому разработку данной темы предлагается провести на основе следующих исходных соображений.

Учитывая, что для подобных морских систем в отечественной нормативной базе уже утвержден и широко применяется на практике термин «СУДС» (системы или службы управления движением судов), этот термин необходимо применить и к внутренним водным путям – «СУДС-ВВП». Можно ожидать, что применению термина СУДС могут быть возражения, т. к. наименование системы должно указывать на ее назначение (в данном случае – управлять движением), тогда как реальное назначение СУДС – «регулировать движение». На международном уровне утверждено наименование подобных систем «Vessel Traffic Management Systems (VTMS)», которое дословно следует перевести как «системы управления трафиком судов». Если учесть, что «управление трафиком» по-русски означает «регулирование движения», то указанный английский термин правильно следовало бы перевести на русский как «системы регулирования движения судов», однако в документах [1] и [2] Минтранса РФ термин «СУДС» уже узаконен. Исходя из изложенного, следовало бы ставить вопрос о присвоении более правильного наименования системе/службе и переработке указанных нормативных документов Минтранса РФ, при этом в настоящее время придется называть рассматриваемые системы «СУДС-ВВП» при их назначении – регулировать движение.

Изложенное позволяет получить необходимую нормативную базу для СУДС-ВВП путем распространения на них ранее утвержденных требований к морским СУДС с учетом специфики судоходства на ВВП. Указанная специфика, прежде всего, касается требований к входящим в состав системы средствам радиолокационного наблюдения – береговым радиолокационным станциям (БРЛС):

1. в связи со значительно более затрудненными условиями судоходства на отдельных участках ВВП, по сравнению с морскими прибрежными районами и акваториями морских портов, целесообразно потребовать от применяемых БРЛС более высоких разрешающей способности и точности, чем в морских СУДС даже высшей категорий [2];

2. дальность действия БРЛС в ряде районов ВВП может быть значительно снижена, в сравнении с морскими СУДС, из-за перекрытия видимости речных фарватеров берегами, деревьями и строениями;

3. с учетом предыдущего пункта требования к мощности излучения БРЛС в условиях ВВП целесообразно снизить по санитарным соображениям, т. к. они часто будут эксплуатироваться непосредственно в населенных пунктах.

Таким образом, имеется возможность рассматривать вопросы построения и функционирования морских СУДС и СУДС-ВВП с единых, уже нормативно отрегулированных в [1] и [2], позиций, с учетом некоторых различий в технических и эксплуатационных характеристиках применяемого оборудования.

В соответствии с документами [1] и [2] бассейновая СУДС-ВВП, аналогично региональной морской СУДС, должна включать в себя (рис. 1):

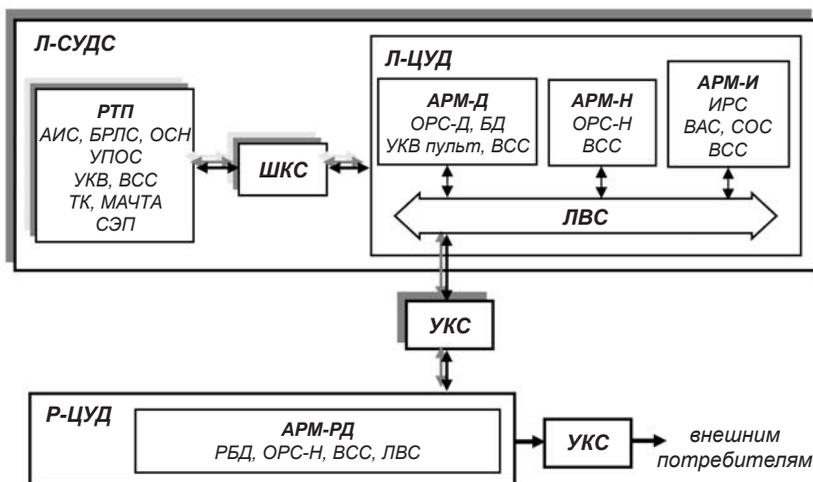


Рис. 1
Структурная схема бассейновой СУДС-ВВП и морской региональной СУДС
(расшифровка примененных сокращений приведена в тексте)

несколько локальных СУДС (Л-СУДС);
региональный/бассейновый центр СУДС (Р-ЦУД);
узкополосные каналы связи (УКС) для внутрисистемного и внешнего обмена данными.

Л-СУДС должна состоять из нескольких радиотехнических постов (РТП) и локального центра СУДС (Л-ЦУД), взаимосвязанных широкополосными каналами связи (ШКС), обеспечивающими трансляцию всей информации об окружающей обстановке из РТП в Л-ЦУД.

Для сокращения обслуживающего персонала СУДС все РТП следует выполнять необитаемыми, т. е. работающими в режиме удаленного управления/контроля из Л-ЦУД.

РТП в общем случае должен включать в себя следующее оборудование:

береговую станцию автоматической информационной системы (АИС);

БРЛС с устройством предварительной обработки сигналов (УПОС);
оптическую систему наблюдения (ОСН);

УКВ-радиостанцию связи с судами;

внутрисистемные средства связи (ВСС);

технологический контейнер (ТК) с мачтой для размещения оборудования;

систему электропитания (СЭП).

АИС следует рассматривать как основное средство сбора информации о судах во всей зоне действия СУДС-ВВП. Учитывая, что АИС работает в УКВ диапазоне, ее береговыми станциями необходимо оборудовать все РТП системы.

БРЛС устанавливаются на РТП, обслуживающих наиболее сложные судоходные участки, такие как узкие каналы и фарватеры, подходы к шлюзам и т. п.

УПОС выполняет функции квантования радиолокационных сигналов, их фильтрации от помех, обнаружения радиолокационных целей, сжатия радиолокационной информации для трансляции в Л-ЦУД через ШКС.

В Л-СУДС целесообразно применять ОСН на базе телевизионной или тепловизионной (инфракрасной) камеры, установленной на поворотной платформе, разворачиваемой на обнаруженную цель диспетчером или – автоматически по целеуказанию от БРЛС.

В качестве ВСС удобно применять IP-телефон.

В ТК монтируется оборудование, эксплуатируемое при положительных температурах окружающего воздуха, поэтому в ТК должны

быть предусмотрены системы климат-контроля и пожарно-охранная сигнализация. Учитывая, что ТК выполняется необитаемым, он также должен содержать автоматические системы мониторинга технического состояния оборудования РТП и автоматического пожаротушения.

В качестве СЭП обычно применяется резервированная электрическая линия; однако в местах отсутствия ЛЭП могут применяться дизельные, ветровые или световые источники электропитания.

Оборудование Л-ЦУД устанавливается на автоматизированных рабочих местах (АРМ) инженера (АРМ-И), диспетчера (АРМ-Д) и начальника смены (АРМ-Н), располагаемых в общем помещении для обеспечения их оперативного взаимодействия, а также часть оборудования, требующего дополнительного обдува, располагается во вспомогательных соседних помещениях.

АРМ-И включает в себя инженерную рабочую станцию (ИРС), станцию воспроизведения и архивации информации (ВАС) и станцию совместной обработки информации (СОС).

ИРС представляет собой комплексное рабочее место удаленного контроля всех технических средств Л-СУДС.

СОС объединяет и совместно обрабатывает радиолокационную и АИС информацию, поступающую от всех РТП, и выдает ее в локальную вычислительную сеть (ЛВС) для ввода во все АРМы. СОС также обеспечивает прием информации от дополнительных внешних датчиков: гидрометеостанции, системы гидроакустического наблюдения и др.

АРМ-Д оборудуется операторскими рабочими станциями диспетчера (ОРС-Д), количество которых соответствует количеству БРЛС в системе.

ОРС-Д предназначена для отображения и записи радиолокационной информации. На экране ОРС-Д отображаются:

радиолокационная (РЛ) картина соответствующей БРЛС или выбранная диспетчером часть интегральной зоны контроля Л-СУДС, поступающей от СОС через ЛВС;

электронная карта контролируемого региона;

служебная графика – курсор, визиры и т. п.;

символы и данные автосопровождаемых (АС) целей и другая информация, поступающая от СОС;

результаты решения информационно-расчетных задач по безопасности движения АС целей, сопровождаемые световой и звуковой предупредительной сигнализацией.

ВАС обеспечивает автоматический сбор и архивацию записей информации со всех ОРС-Д. Эти архивы могут быть сформированы на

компакт-дисках или съемных винчестерах для сверхдлительного хранения; фрагменты архивов также могут быть распечатаны на цветном принтере.

Компьютерная база данных (БД) накапливает, хранит и передает в региональную базу данных (РБД) все получаемые в системе данные, вводимые в нее автоматически из СОС или вручную диспетчером, а также отображает их на своем экране в табличной форме.

УКВ пульт в АРМ-Д обеспечивает удаленное управление УКВ приемо-передатчиками, установленными в РТП.

АРМ-Н включает в себя операторскую рабочую станцию начальника смены (ОПС-Н) и ВСС. ОПС-Н аналогичен ОПС-Д, но оборудуется двумя видеомониторами – настольным и настенным. На настенном видеомониторе отображается вся информация на фоне электронной карты всей зоны контроля Л-СУДС, а на настольном – отображается выбранная оператором часть картины настенного монитора.

Из Л-ЦУД вся имеющаяся в БД и СОС информация передается в Б-ЦРД через УКС.

Техническую базу Р-ЦУД составляет АРМ регионального диспетчера (АРМ-РД), включающее в себя РБД, ОПС-Н, ВСС и ЛВС.

РБД совместно с локальными БД всех Л-СУДС, объединенные цифровыми каналами связи, образуют компьютерную распределенную базу данных.

На настенном экране ОПС-Н в Р-ЦУД отображается поступающая от всех Л-СУДС информация на фоне электронной карты зоны контроля СУДС-ВВП.

В СУДС-ВВП могут применяться различные типы БРЛС Х-диапазона, удовлетворяющие требованиям к оборудованию СУДС первой и высшей категорий. Однако в случае необходимости обеспечения повышенных требований по разрешающей способности и точности, особенно при установке РТП в населенных пунктах, целесообразно применять БРЛС Ка-диапазона, обеспечивающие эти требования при малых размерах антенны (не более 2,5 м). Известен многолетний отечественный опыт применения таких РЛС производства ОАО «Экспериментальный завод» в морских СУДС, аэропортах, системах охраны государственной границы и особо важных объектов (например, президентского дворца в п. Стрельна). С 2004 года применение этих РЛС активно осваивают за рубежом, например, итальянские фирмы – в аэропортах и системах береговой охраны, а погрансилы Республики Казахстан – для охраны государственной границы.

Список литературы

1. Положение о системах управления движением судов от 01.06.02. Минтранс РФ. – М., 2002.
2. Системы управления движением судов. Техничко-эксплуатационные требования №МФ 02-22/848-70 от 01.06.02. Минтранс РФ. – М., 2002.

СОДЕРЖАНИЕ

Вопросы безопасности судов

Решетов Н.А., Блинов Э.К. Участие Российского морского регистра судоходства в арктической стратегии Российской Федерации 3

Тряскин В.Н., Дидковский А.В.,
Кутейников М.А., Грубов Д.А., Андрушин А.В.
Рекомендации по структуре Свидетельства о безопасности судна ледового плавания и нормативно-методических указаний РС для его разработки 10

Емельянов М.Д. Система компьютерного мониторинга технического состояния морских судов с оценкой рисков 23

Тогуняц А.Р. Деятельность ИМО в отношении безопасности малых рыболовных судов и ее влияние на национальное законодательство 44

Мореходные качества судов

Литонов О.Е., Папин А.Г. Уточнения к расчету инерционных усилий, действующих на груз или элементы конструкции корпуса судна в условиях качки 57

Войнаровский Ю.М. Параметрические диаграммы для оценки условий несмещаемости и расчета крепления грузов при бортовой качке судна 68

Вопросы прочности судов и плавучих сооружений

Гуминский П.Б., Нестеров А.Б. К вопросу регламентации выбора стали для корпусных конструкций арктических газовозов 82

Шхинек К.Н., Балагура С.В.,
Большев А.С., Фролов С.А. Математическое
моделирование взаимодействия ровного льда и торосов
с заякоренными плавучими сооружениями типа FPU
и платформами типа SPAR..... 93

Апполонов Е.М., Сазонов К.Е., Белов И.М.
Разработка физической модели и метода расчета параметров
низкочастотной вибрации корпуса крупнотоннажных судов
от воздействия льда 109

Материалы и сварка

Ильин А.В., Леонов В.П., Филин В.Ю.
Определение параметра трещиностойкости *CTOD*
для металла сварных соединений судокорпусных сталей
при низких климатических температурах 120

Судовые механические установки, валопроводы и двигатели

Шурпяк В.К. Сравнительный анализ требований РС
и МАКО к объему ледовых ящиков судов
ледового плавания 147

Горелик Б.А., Шурпяк В.К. Идентификация
опасностей и оценка риска судовых трубопроводов 156

Медведев В.В., Семионичев Д.С. Методические
рекомендации по прогнозу и оценке рисков при обосновании
целесообразности модернизации судовых энергетических
установок..... 171

Евенко В.И., Сергеев А.А., Андрюшин А.В.,
Тарица Г.В., Щербаков И.В., Беляшов В.А.
Современные методы отработки пропульсивных комплексов
судов ледового плавания. Ледовые нагрузки..... 182

Освоение шельфовых месторождений

Макаров В.Г., Мохов Г.В. Расширение мониторинга континентального шельфа судами сейсмической разведки после их модернизации 205

Электрооборудование и автоматизация судов

Сазонов А.Е. Нейротехнологии: настоящее и будущее 220

Павлов В.Н., Трусов А.О., Ратников В.И. Особенности применения устройств защитного отключения (УЗО) в судовых электрических сетях 235

Радио- и навигационное оборудование судов

Нечипоренко Н.Т., Шацбергер Э.М., Сиваченко Б.Н., Яковлев В.Г. Краткий анализ радиолокационного обеспечения ледокольного флота и его влияние на эффективность и безопасность ледового плавания 255

Кривцов Ю.А. Модернизация алгоритма предупреждения столкновений судов в судовой радиолокационной станции со средством автоматической радиолокационной прокладки 263

Кулинич А.И., Маринич А.Н., Припотнюк А.В., Устинов Ю.М., Томсон В.П. Особенности работы однодиапазонных и двухдиапазонных судовых приемников ГЛОНАСС/GPS в стандартном режиме 270

Солодовниченко М.Б., Зимин Н.С., Замятин А.Г. Принципы построения береговых систем управления движением судов 278

Решетов Н.А., Блинов Э.К. Участие Российского морского регистра судоходства в арктической стратегии Российской Федерации // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – Вып. 32. – 2009. – С. 3 – 9.

В статье проанализированы «Основы государственной политики Российской Федерации в Арктике на период до 2020 г. и дальнейшую перспективу» (далее – Основы) и главные направления деятельности РС в рамках обеспечения и реализации целей и задач этого документа. Данный документ формулирует основные направления деятельности РФ в Арктике для поддержания ведущих позиций России в этом наиважнейшем регионе, который является на ближайшую перспективу одним из главных источников энергоресурсов. В Основах подчеркивается стратегическая роль Северного морского пути (СМП) как основной арктической транспортной магистрали для целей разработки месторождений углеводородов, развития инфраструктуры районов Крайнего севера, а также обеспечения кратчайшего транзитного пути Европа-Америка-Япония. Эффективная поддержка и развитие СМП, осуществление морских арктических транспортных операций невозможны без современного арктического флота. Последнее предопределяет непосредственное участие Российского морского регистра судоходства в государственных программах, направленных на реализацию государственной политики РФ в Арктике. В статье рассмотрены основные направления деятельности РС в рамках решения указанных выше проблем. Основной задачей является обеспечение безопасной и эффективной эксплуатации судов в тяжелых ледовых условиях Арктики. В этой связи особую актуальность приобретает совершенствование нормативной базы РС. Поэтому в последние годы РС проводит интенсивные работы в этой области. Например, разработаны новые Требования по оборудованию судов для обеспечения длительной эксплуатации при низких температурах. РС является лидирующей организацией в области обеспечения безопасной эксплуатации арктических судов, которая должна последовательно проводить и поддерживать интересы РФ в ИМО, МАКО. В этой связи важную роль играет участие РС в работе международных организаций по формированию современной международной нормативной базы, взаимодействие с классификационными обществами стран Арктического региона (ABS, DNV). Необходимо более энергично проводить рекламную деятельность

(конференции, выставки, двусторонние встречи с судовладельцами и т. д.), направленную на поддержание приоритетности класса РС.

УДК 629.12.01

Тряскин В.Н., Дидковский А.В., Кутейников М.А., Грубов Д.А., Андриюшин А.В. Рекомендации по структуре Свидетельства о безопасности судна ледового плавания и нормативно-методических указаний РС для его разработки // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – Вып. 32. – 2009. – С. 10 – 22.

В статье приводится ретроспективный обзор работ по проблеме создания Ледового паспорта судна или Свидетельства о безопасности судна ледового плавания, а также анализируются требования ряда нормативно-технических документов, касающиеся содержания такого документа. Указывается, что представления о структуре Ледового паспорта судна у специалистов в области проектирования и эксплуатации судов ледового плавания к настоящему моменту сформировались. Для значительного числа отечественных и ряда зарубежных судов ледовые паспорта разработаны специалистами ААНИИ и ЦНИИ Морского флота и используются в практике эксплуатации. Многолетний российский опыт ледового плавания является основой их верификации.

УДК 656.61:629.067

Емельянов М.Д. Система компьютерного мониторинга технического состояния морских судов с оценкой рисков // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – Вып. 32. – 2009. – С. 23 – 43.

В статье описаны схема оценки рисков нанесения ущерба в результате аварий для основных видов опасностей и их подвидов и определение критичных элементов системы «судно-груз-человек», отказ которых имеет высокий риск нанесения ущерба, на основе применения методологии Формализованной оценки безопасности. Приведена таблица соответствия между степенью ущерба и описанием тяжести последствий, отраженных в актах о внеочередном

освидетельствовании судна в связи с аварийным случаем. Произведена оценка величины фактического риска и его допустимого значения для основных видов и подвидов опасностей. Обоснована необходимость создания и функциональные возможности системы компьютерного мониторинга технического состояния судов с оценкой рисков.

Развитие методов и технологий теории рисков и создание базы данных по техническому состоянию судов могут оказаться полезными как при осуществлении технического наблюдения за судами в эксплуатации, так и при разработке новых Правил РС или их корректировке.

УДК 341.161:331.91:639.2.06;629.5

Тогуняц А.Р. Деятельность ИМО в отношении безопасности малых рыболовных судов и ее влияние на национальное законодательство // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – Вып. 32. – 2009. – С. 44 – 56.

Настоящая статья содержит обзор общей международной ситуации в части обеспечения безопасности рыболовных судов. Показана взаимосвязь «Рекомендаций по безопасности палубных рыболовных судов длиной менее 12 м и беспалубных рыболовных судов», разрабатываемых в настоящий момент в ИМО, и других нормативных документов ИМО. В статье представлена структура разрабатываемого документа. Положения главы «Остойчивость и связанные с ней мореходные качества» сравниваются с требованиями, применяющимися в российских и аналогичных европейских нормативных документах. Продемонстрировано также и позитивное влияние рекомендаций ИМО на разработку российского национального законодательства в части безопасности малых рыболовных судов.

УДК 629.5.045

Литонов О.Е., Папин А.Г. Уточнения к расчету инерционных усилий, действующих на груз или элементы конструкции корпуса судна в условиях качки // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – Вып. 32. – 2009. – С. 57 – 67.

В статье обобщен опыт расчетов, а также опыт участия авторов в проведении морских операций по обеспечению транспортировок нестандартизированных крупногабаритных и тяжеловесных грузов, который убедительно показал необходимость некоторой корректировки существующих правил и руководств Регистра, касающихся подобных перевозок. Делается вывод о необходимости учета в расчете общего баланса сил, действующих на груз в условиях качки, не только главного вектора инерционных усилий, но и главного момента, возникающего в результате приведения всех инерционных сил к равнодействующей в одной точке. В статье предлагается методика расчета и вспомогательные материалы. В статье также делается предложение по усовершенствованию структуры правил, связанных с транспортировкой нестандартных грузов.

УДК 629.4.045:629.5.017.22

Войнаровский Ю.М. Параметрические диаграммы для оценки условий несмещаемости и расчета крепления грузов при бортовой качке судна // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – Вып. 32. – 2009. – С. 68 – 81.

Предлагается методика расчета сил, действующих на груз при резонансной бортовой качке судна на регулярном синусоидальном волнении. Рассмотрены условия несмещаемости груза, удерживаемого только силой трения, а также предложена методика определения поперечной сдвигающей силы. Полученные результаты представлены графически в форме параметрических диаграмм, которые могут использоваться для оперативной оценки размещения и крепления груза на судне.

УДК 629.12

Гуминский П.Б., Нестеров А.Б. К вопросу регламентации выбора стали для корпусных конструкций арктических газовозов // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – Вып. 32. – 2009. – С. 82 – 92.

В данной статье рассмотрены вопросы проектирования газозовозов с различными типами грузовых емкостей для использования в арктических морях в части выбора категории стали для элементов конструкции корпуса.

В статье приводятся разработка требований для обеспечения достаточной хладостойкости корпусных конструкций арктических газозовозов, позволяющих упорядочить и упростить этот процесс на этапе проектирования.

В результате выполненных исследований предложены инженерные зависимости для вычисления расчетных температур, необходимых для определения категорий стали корпусных конструкций, в зависимости от ледовой категории и типа грузовых емкостей газозовоза.

УДК 629.563.2:624.042.43:001.573

Шхинек К.Н., Балагура С.В., Большев А.С., Фролов С.А. Математическое моделирование взаимодействия ровного льда и торосов с заякоренными плавучими сооружениями типа FPU и платформами типа SPAR // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – Вып. 32. – 2009. – С. 93 – 108.

Воздействие торосов на заякоренные плавучие сооружения типа FPU, как правило, изучается при проектировании заякоренных объектов, используемых в акваториях, покрытых льдом. Заякоренные сооружения в отличие от стационарных обладают существенной податливостью, и поэтому силовое воздействие на них со стороны торосов зависит от реакции сооружений. Тем не менее, нередко априорная оценка ледовых нагрузок выполняется с учетом только глубины внедрения сооружения в торос без учета динамических аспектов этого взаимодействия.

В настоящей статье рассматриваются динамические аспекты взаимодействия торосов с заякоренным сооружением. Для этого используется специализированный программный комплекс «Anchored Structures». Указанная программа позволяет во временной области моделировать взаимодействия сооружения с торосом на основе решения уравнений движения.

Рассматриваются два типа заякоренных объектов: плавучее сооружение типа FPU и платформа типа SPAR. Анализируются динамические аспекты их поведения при взаимодействии с торосами.

УДК 629.5.035.55.017:629.561.5

Апполонов Е.М., Сазонов К.Е., Белов И.М. Разработка физической модели и метода расчета параметров низкочастотной ледовой вибрации корпуса крупнотоннажных судов от воздействия моря // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – Вып. 32. – 2009. – С. 109 – 119.

В работе предложена физическая модель взаимодействия корпуса крупнотоннажного судна активного ледового плавания со сплошным ледяным полем и ледяным каналом, проложенным ледоколом. На основании разработанной физической модели предложен метод расчета низкочастотной ходовой вибрации корпуса судна при движении его в ледовых условиях. Разработанный метод применен к анализу ходовой вибрации перспективного крупнотоннажного судна ледового плавания категории **Arc4**. Полученные результаты свидетельствуют о возможности широкого применения метода при проектных вибрационных расчетах.

УДК 627.747.33.034:621.791.053.08

Ильин А.В., Леонов В.П., Филин В.Ю. Определение параметра трещиностойкости *CTOD* для металла сварных соединений судокорпусных сталей при низких климатических температурах // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – Вып. 32. – 2009. – С. 120 – 146.

Требования к величине *CTOD* металла сварных соединений включены в ряд стандартов, определяющих выбор материалов для изготовления сварных металлоконструкций ответственного назначения. Однако методики проведения испытаний и способы интерпретации их результатов в отдельных нормативных документах различны. Эти различия оказываются принципиальными при температурах испытаний ниже $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$, соответствующих температурам вязко-хрупкого перехода отдельных структурных составляющих сварных соединений даже для наиболее хладостойких сталей и сварочных материалов. В этих случаях наблюдается большой разброс данных, зависимость результатов испытаний от выбора положения надреза («целевой структуры» при испытании) и ориентации направления распространения

разрушения. Исследования факторов, влияющих на результаты испытаний, позволяют уточнить методику их проведения в зависимости от решаемой задачи: контроль свариваемости стали, квалификация технологического процесса сварки или же определение исходной информации для проверочных расчетов прочности по отношению к хрупким разрушениям.

УДК 629.12.06-71

Шурпяк В.К. Сравнительный анализ требований РС и МАКО к объему ледовых ящиков судов ледового плавания // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – Вып. 32. – 2009. – С. 147 – 155.

В статье рассмотрены существующие требования к конструкциям ледовых ящиков и выполнен анализ требований к минимальному объему ледовых ящиков судов ледового плавания, проведен сравнительный анализ требований МАКО, Регистра и других отечественных нормативных документов по проектированию систем охлаждения.

УДК 629.5.062:656.085.3

Горелик Б.А. Шурпяк В.К. Идентификация опасностей и оценка риска судовых трубопроводов // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – Вып. 32. – 2009. – С. 156 – 170.

В статье собраны и проанализированы данные по авариям, причинами которых являлись отказы трубопроводов. На основе анализа аварий, связанных с отказами систем на судах авторами была произведена классификация отказов по причинам их появления и по степени потери работоспособности систем. Далее авторами было проведена идентификация опасностей, исходящих от трубопроводов и их элементов в различных помещениях судна и предложена методика количественной оценки риска, основанная на методике анализа видов, последствий и критичности отказов (АВПКО). В целом в статье проделана работа по двум первым шагам формализованной оценки безопасности судовых трубопроводов.

Медведев В.В., Семионичев Д.С. Методические рекомендации по прогнозу и оценке рисков при обосновании целесообразности модернизации судовых энергетических установок // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – Вып. 32. – 2009. – С. 171 – 181.

В настоящей статье даны рекомендации по совершенствованию процесса обоснования целесообразности выполнения модернизации судовых энергетических установок. Рассмотрены методы определения необходимости и даны критерии выбора рационального варианта компоновки судовых энергетических установок на базе оценки риска в рамках методологии формализованной оценки безопасности. Приведена последовательность действий и алгоритмы, позволяющие применить имитационное моделирование при решении этих задач.

Евенко В.И., Сергеев А.А., Андриюшин А.В., Тарица Г.В., Щербаков И.В., Беляшов В.А. Современные методы отработки пропульсивных комплексов судов ледового плавания. Ледовые нагрузки // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – Вып. 32. – 2009. – С. 182 – 204.

Обеспечение безопасной и эффективной эксплуатации пропульсивных комплексов ледокольных судов является одной из актуальных проблем арктического судостроения. Для решения этой задачи на современном уровне необходима разработка объединенных требований к пропульсивной мощности и прочности элементов механической установки. Действующие нормативы к пропульсивной мощности и к прочности элементов механической установки носят эмпирический характер и не в полной мере соответствуют современным требованиям судостроительной промышленности. Поэтому требуется разработка новых требований (нормативов) включающих современные методы отработки пропульсивных комплексов ледокольных судов. Научно-обоснованный подход к решению этой проблемы определяет необходимость ее рассмотрения в рамках общей концепции обеспечения безопасной и эффективной эксплуатации судов ледового плавания. В

тяжелых арктических условиях проводка транспортных судов за ледоколом является наиболее эффективным и безопасным способом поддержания транспортных путей в арктических водах. Соответствующая концепция является основой для разработки современных правил Российского морского регистра судоходства, включающих классификацию, требования к прочности корпуса, механическим установкам и пропульсивной мощности ледокольных судов.

В последние годы на базе указанного подхода Регистром, а также проектными и научными организациями проводятся интенсивные исследования по решению указанных проблем. В настоящее время Регистром разработаны проекты новых требований к пропульсивной мощности судов ледового плавания, к прочности основных элементов пропульсивной установки (лопасти гребных винтов, элементы крепления лопастей к ступице, элементы ВРШ и т. д.). В статье представлены основные положения указанных документов. Новые требования РС включают современные вычислительные и экспериментальные методы, позволяющие назначать пропульсивную мощность и обеспечивать эксплуатационную прочность элементов механической установки с точностью, необходимой для современной практики проектирования и эксплуатации. Например, назначение пропульсивной мощности рекомендуется выполнять на основе модельных испытаний в ледовых опытовых бассейнах по методикам, согласованным и одобренным РС. Большое внимание отводится расчетным и экспериментальным методам прогнозирования ледовых нагрузок на элементы пропульсивного комплекса. Представлены основные положения уточненных методов обеспечения пирамидальной и усталостной прочности элементов механической установки. Разработанные проекты требований верифицированы ведущими проектантами-изготовителями пропульсивных комплексов в процессе реального проектирования и готовятся к внедрению в действующие требования Регистра.

УДК 629.5.014:629.564.7

Макаров В.Г., Мохов Г.В. Расширение мониторинга континентального шельфа судами сейсмической разведки после их модернизации // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – Вып. 32. – 2009. – С. 205 – 219.

Предлагается методика модернизации судов сейсмической разведки, проводимой в соответствии с нормативами требований Реги-

стра, позволяющая увеличить площади и объемы помещений судов для размещения дополнительного исследовательского оборудования, отвечающего современным техническим требованиям, а также продлить автономность плавания.

Модернизированные суда сейсморазведки позволяют расширить площади и повысить качество мониторинга континентального шельфа.

УДК 517.977:517.938:629.5.067

Сазонов А.Е. Нейротехнологии: настоящее и будущее // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – Вып. 32. – 2009. – С. 220 – 234.

В статье кратко излагаются основные принципы построения систем управления с использованием нейротехнологий. Делается заключение о настоящем и будущем этих систем. Приводятся примеры использования их в судовых системах автоматизации в настоящее время, и прогнозируется их использование в последующие годы. Дается оценка их возможного влияния на безопасность судна. Целью публикуемой статьи является ознакомление специалистов в области автоматизации судовых технологических процессов с этим новым направлением в области теории управления.

УДК 621.316.9: 331.45

Павлов В.Н., Трусов А.О., Ратников В.И. Особенности применения устройств защитного отключения (УЗО) в судовых электрических сетях // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – Вып. 32. – 2009. – С. 235 – 254.

В работе проведен анализ технической реализуемости устройства защитного отключения (УЗО) для судовых электрических установок с изолированным от земли режимом нейтрали источника электрической энергии.

Устройство предназначено для обеспечения электробезопасности персонала в тех системах электроснабжения, где иные защитные мероприятия оказываются недостаточно эффективными или надежными.

ми, а отключение (обесточивание) защищаемого участка сети и защищаемой группы потребителей является возможным по требованиям бесперебойности электроснабжения.

Вторым назначением УЗО является обеспечение пожарной безопасности режима однофазного замыкания (или локального однофазного снижения величины сопротивления изоляции).

В статье анализируется один из возможных вариантов построения УЗО, основанный на многоканальном принципе выявления факта протекания через тело человека опасных для него токов. Сформулированы базовые принципы обеспечения работоспособности УЗО в сетях рассматриваемого вида.

Приводятся результаты математического моделирования наиболее неблагоприятных (по соотношению величин сопротивлений изоляции и емкостей фаз) режимов системы электроснабжения и сформулированы рекомендации по построению систем электроснабжения типа IT, в которых возможно обеспечить электробезопасность за счет применения УЗО такой архитектуры.

Даются рекомендации по группам потребителей судовой электроэнергетической системы, для защиты которых необходимо применять устройства защитного отключения.

УДК 629.5.073.5:621.396.969.33:268

Ничипоренко Н.Т., Шацбергер Э.М., Сиваченко Б.Н., Яковлев В.Г. Краткий анализ радиолокационного обеспечения ледокольного флота и его влияние на эффективность и безопасность ледового плавания // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – Вып. 32. – 2009. – С. 255 – 262.

Требования ИМО по обеспечению безопасности мореплавания предусматривают оборудование судов как минимум двумя независимыми радарными системами. Традиционно в нашей стране для решения этих задач используются станции 3- и 10-сантиметрового диапазона. Полярный кодекс продублировал эту практику для ледоколов и ледокольно-транспортных судов, однако РЛС 10-сантиметрового диапазона не используются при плавании во льдах из-за недостаточной разрешающей способности. По этой причине РЛС 3-сантиметрового диапазона, помимо целей обеспечения безопасности мореплавания, служат целям ледового плавания для выбора оптимального

пути следования во льдах. В этой статье на основе материалов натурных испытаний в Арктике и на Балтике показаны причины возникновения «дефицита радарного времени» в ледовом плавании и, вследствие этого, обосновывается необходимость наличия на судах активного ледового плавания РЛС ближней зоны действия. В качестве альтернативы к рассмотрению предлагается РЛС миллиметрового диапазона.

УДК 621.396.932

Кривцов Ю.А. Модернизация алгоритма предупреждения столкновений судов в судовой радиолокационной станции со средством автоматической радиолокационной прокладки // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – 2009. – Вып. 32. – С. 263 – 269.

В статье рассмотрены существующие алгоритмы построения охранных зон в судовых радиолокационных станциях со средством автоматической радиолокационной прокладки и их недостатки. Предложен алгоритм построения охранной зоны с использованием только параметра времени.

УДК 621.396.932

Кулинич А.И., Маринич А.Н., Припотнюк А.В., Устинов Ю.М., Томсон В.П. Особенности работы однодиапазонных и двухдиапазонных судовых приемников ГЛОНАСС/GPS в стандартном режиме // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – 2009. – Вып. 32. – С. 270 – 277.

В статье показано, что в двухдиапазонных приемниках ГЛОНАСС/GPS исключение квазипостоянных ионосферных погрешностей сопровождается резким увеличением случайных шумовых и многолучевых погрешностей, которые при определении положения судна возрастают в 3...4 раза, а при определении скорости – в 5...8 раз.

Для уменьшения случайных погрешностей предлагаются структурные схемы с усреднением отсчетов.

Солодовниченко М.Б., Зимин Н.С., Замятин А.Г. Принципы построения береговых систем управления движением судов // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – 2009. – Вып. 32. – С. 278 – 283.

В статье рассматриваются принципы построения и структура береговых систем управления движением судов. Показано, что в общем случае система должна включать в себя следующее оборудование:

- автоматическую информационную систему;
- береговую радиолокационную станцию;
- оптическую систему наблюдения;
- УКВ-радиостанцию связи с судами;
- внутрисистемные средства связи;
- технологический контейнер с мачтой для размещения оборудования;
- систему электропитания.

N.A. Reshetov, E.K. Blinov. Participation of Russian Maritime Register of Shipping in the Arctic Strategy of the Russian Federation // Transactions of Russian Maritime Register of Shipping. – Issue 32. – 2009. – P. 3 – 9.

The article analyzes the Principles of State Policy of the Russian Federation in the Arctic until 2020 and beyond (hereafter, the Principles) and the key areas of the Russian Maritime Register of Shipping (RS) activity within the framework of the realization of the goals and objectives of this document. The document formulates the main areas of the RF activities in the Arctic, aimed at maintaining the leading position of Russia in this region of prime importance, which is, in the near term, to be one of the basic reservoirs of energy resources. The Principles stress the strategic role of the Northern Sea Route (NSR) as the major traffic artery in the Arctic when developing hydrocarbon fields and the infrastructure of the High North regions as well as providing the shortest transit route between Europe, America and Japan. Neither efficient support or development of NSR, nor sea transport operations in the Arctic would be possible without a modern Arctic fleet. The latter circumstance predetermines the direct involvement of Russian Maritime Register of Shipping in state programs aimed at the implementation of the RF state policy in the Arctic. The article considers the principal areas of the RS activity aimed at solving the above problems. The main task is to ensure a safe and efficient ship operation in the harsh ice conditions of the Arctic. In this connection, the elaboration of the RS normative documentation becomes particularly important. Therefore, RS takes active measures in this direction. For instance, new Requirements for Ship Equipment have been developed to ensure long-term operation at low temperatures. RS is a leading organization in the sphere of providing safe operation of arctic ships, and which shall consistently advance and support the RF interests at IMO and IACS. In this regard, the RS participation in the work of international bodies engaged in the development of an up-to-date international regulatory system and interaction with the classification societies of Arctic Region countries (ABS, DNV) is of great importance. Advertising activity (conferences, exhibitions, bilateral meetings with shipowners, etc.) aimed at maintaining the priority of the RS class should be intensified.

UDC 629.12.01

V.N. Tryaskin, A.V. Didkovsky, M.A. Kuteinikov, D.A. Grubov, A.V. Andryushin. Recommendations on Structure of Ice Ship Safety Certificate and RS Methodological Instructive Regulations on Its Development // Transactions of Russian Maritime Register of Shipping. – Issue 32. – 2009. – P. 10 – 22.

The article contains a retrospective performance review on the development of Ice Ship Safety Certificate (Ice Passport), as well as the analysis of regulating and technical documents requirements for the content of such document. It is noted that the concept of the Ice Passport structure has been formed among the ice ship design and operation experts. For the majority of domestic ships and a number of foreign ships, the ice passports have been developed by the experts of the Arctic and Antarctic Research Institute (AARI) and the Central Marine Research & Design Institute (CNIMF), and which are used for the ship operation practice. The ice navigation experience is the basis for the verification.

UDC 656.61:629.067

M.D. Yemelyanov. Computer-Based System for Risk Assessment and Monitoring of Sea-Going Ship Technical Condition // Transactions of Russian Maritime Register of Shipping. – Issue 32. – 2009. – P. 23 – 43.

The article describes the scheme for evaluating, on the basis of formal safety assessment (FSA), the damage risks incurred as a result of an accident for the main types of hazards and their subtypes, as well as the procedure for determining the critical elements of the 'ship-cargo-man' system, the failure of which is associated with high damage risk. A correspondence table between the level of damage and the severity of described consequences included in reports on occasional survey of the ship in connection with the accident is given. The actual risk level and its permissible value is assessed for the main types and subtypes of hazards. The need for creation of a computer-based system for risk assessment and monitoring of ship technical condition and its functionality are substantiated.

The development of risk theory methods and technology and creation of ship technical condition database may prove useful both for technical

supervision of ships in service and for the development of the new RS Rules or improvement thereof.

UDC 341.161:331.91:639.2.06;629.5

A.R. Togunjac. IMO Activities with Regard to the Safety of Small-Scale Fishing Vessels and its Impact on National Legislations // Transactions of Russian Maritime Register of Shipping. – Issue 32. – 2009. – P. 44 – 56.

The present article contains an overview of the general situation with the safety of small-scale fishing vessels in the world. The interrelation of “Safety recommendations for deck fishing vessels of less than 12 m in length and undecked fishing vessels” being developed presently by IMO with other IMO instruments issued for fishing vessels has been shown. The structure of the document under development is presented in the article. The provisions of the “Stability and associated seaworthiness” chapter have been compared with requirements applied by Russian legislative acts and similar European normative documentation. The positive influence of IMO recommendations on the development of Russian national legislation in the field of small-scale fishing vessels safety has been shown as well.

UDC 629.5.045

O.E. Litonov, A.G. Papin. Refinement of the Calculation of Inertia Forces Acting on the Cargo or Hull Structural Members Resulting from the Ship Motions // Transactions of Russian Maritime Register of Shipping. – Issue 32. – 2009. – P. 57 – 67.

The article generalizes the experience of calculations and the authors' experience of participation in maritime operations on transportation of non-standardized, bulky and heavy cargoes. This experience has convincingly demonstrated the necessity for certain amendments to the existing RS Rules and Guidelines concerning such kind of transportations. It is concluded that, when calculating the total balance of forces acting on the cargo at motions, not only the resultant inertia forces vector should be considered, but the principal moment due to reduction of all the inertia forces to a resultant force at a single point. The article offers a calculation procedure and supporting

materials. It also contains a suggestion for the improvement of the structure of the Rules related to transportation of non-standardized cargoes.

UDC 629.4.045:629.5.017.22

Yu. M. Voynarovskiy. Parametric Diagrams for Cargo Non-Shiftability Assessment and Cargo Securing Calculation at Rolling // Transactions of Russian Maritime Register of Shipping. – Issue 32. – 2009. – P. 68 – 81.

A procedure for calculation of forces acting on the cargo at resonant rolling in regular sinusoidal waves is suggested. The non-shiftability conditions for cargo kept in place by friction force alone are considered and a procedure for determination of the shear force is recommended. The calculated results are represented graphically in the form of parametric diagrams which may be used for operational evaluation of cargo arrangement and securing on board.

UDC 629.12

P.B. Guminsky, A.B. Nesterov. To Regulations for the Selection of Steel for Hull Structures of Arctic Gas Carriers // Transactions of Russian Maritime Register of Shipping. – Issue 32. – 2009. – P. 82 – 92.

The article considers the issues related to the design of gas carriers with different types of cargo tanks to operate in the arctic seas with regard to steel grade selection for hull structures.

The article presents requirements developed to ensure sufficient cold resistance of hull structures of Arctic gas carriers, which enable harmonization and simplification of the process on the design stage.

On the basis of performed research, engineering dependences are suggested for calculating the design temperatures necessary to determine the hull-structural steel grades proceeding from the ice category and the cargo tank type of the gas carrier.

UDC 629.563.2:624.042.43:001.573

K.N. Shkhinek, S.V. Balagura, A.S. Bolshev, S.A. Frolov. Mathematic Simulation of Level Ice and Ridge Interaction with Anchored Floating

Structures such as FPU and Spar Platforms // Transactions of Russian Maritime Register of Shipping. – Issue 32. – 2009. – P. 93 – 108.

Ridge effects on anchored floating structures of FPU type are usually studied in the process of designing anchored structures to be operated in ice-covered water areas. Unlike fixed structures, anchored structures possess a substantial mobility and, therefore, the force effect of ridge thereon will depend on the structure response. However, a priori ice load estimation is often performed considering only the depth of the structure penetration into ridge, and disregarding the dynamic aspects of such interaction.

The present article considers the dynamic aspects of interaction of ridge with the anchored structure. For this purpose, a specialized software package 'Anchored Structures' is used. This program makes it possible to simulate the structure-ridge interaction in the time domain on the basis of solving motion equations.

Two types of anchored structures are considered: the FPU and the Spar platform. Dynamic aspects of their behaviour during interaction with ridge are analysed.

UDC 629.5.035.55.017:629.561.5

E.M. Apollonov, K.E. Sazonov, I.M. Belov. Development of Physical Model and Calculation Method for the Parameters of Low Frequency Ice-Induced Vibration of the Supership Hull // Transactions of Russian Maritime Register of Shipping. – Issue 32. – 2009. – P. 109 – 119.

The article offers a physical model of interaction of the hull of an ice class supership with a compact ice and a broken channel made by an icebreaker. Proceeding from the physical model thus developed, a method for calculating the low frequency vibration of a ship operating in ice conditions is suggested. This method is applied to vibration analysis of a prospective supership of ice category **Arc4**. The results obtained indicate the possibility of wide application of the method for design vibration analysis.

UDC 627.747.33.034:621.791.053.08

A.V. Ilyin, V.P. Leonov, V.Yu. Filin. Determination of the Crack Resistance Parameter *CTOD* for the Metal of Welded Joints of Hull-

Structural Steels at Low Ambient Temperatures // Transactions of Russian Maritime Register of Shipping. – Issue 32. – 2009. – P. 120 – 146.

CTOD requirements for the metal of welded joints are among the standards based on which the materials for essential welded metal structures are selected. However, the test procedures and relevant interpretation techniques to be found in particular normative documents differ from each other. The differences prove to be vital for test temperatures below $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$, which correspond to the ductile-brittle transition temperatures for particular structural components of welded joints even where the most cold-resistant steels and welding consumables are concerned. In such cases, considerable data scatter as well as test results dependence on the selection of the notch position (the target structure for testing) and the direction in which the fracture propagates are observed. Research of the factors affecting test results enables to specify the test procedure depending on the problem being solved: steel weldability monitoring, welding procedure qualification or basic data specification for checking strength calculations of brittle fracture.

UDC 629.12.06-71

V.K. Shurpyak. Comparative Analysis of RS and IACS Requirements for Ice Box Capacity of Ice Class Ships // Transactions of Russian Maritime Register of Shipping. – Issue 32. – 2009. – P. 147 – 155.

The article considers current requirements for ice box design and analyses the requirements for minimum ice box capacity of ice class ships as well as makes a comparative analysis of the requirements of IACS, the Register and the requirements to be found in other national normative documents on cooling system design.

UDC 629.5.062:656.085.3

B.A. Gorelik, V.K. Shurpyak. Hazards Identification and Risk Assessment of Ship Piping // Transactions of Russian Maritime Register of Shipping. – Issue 32. – 2009. – P. 156 – 170.

In this article data on accidents caused by failure of piping are collected and analysed. Proceeding from the analysis of accidents caused by ship system failure, the authors classified the failures by their reasons and by the degree of system failure. Further, the authors identified the hazards from piping and its elements in different ship spaces and suggested a procedure for quantitative assessment of risk, based on the failure mode, effects and criticality analysis (FMECA). On the whole, the authors made a breakthrough in respect of the first two steps in formal safety assessment of ship piping.

UDC 621.43

V.V. Medvedev, D.S. Semionichev. Methodological Recommendations on Risk Assumption and Assessment When Substantiating the Expediency of Ship Propulsion Plant Modernization // Transactions of Russian Maritime Register of Shipping. – Issue 32. – 2009. – P. 171 – 181.

This article contains recommendations on improving the procedure of substantiating the expediency of ship propulsion plant modernization. Methods of determining the need for selecting a rational variant of ship propulsion plant arrangement on the basis of risk assessment as part of formal safety assessment methodology are considered, and relevant selection criteria are given. The sequence of operations, as well as algorithms, are described to enable the application of simulation technique for solving the above tasks.

UDC 629.129.791:629.12.037

V.I. Evenko, A.A. Sergeev, A.V. Andryushin, G.V. Taritsa, I.V. Shcherbakov, V.A. Belyashov. Up-to-date Methods of Propulsion Complex Handling in Ice Ships. Ice Loads // Transactions of Russian Maritime Register of Shipping. – Issue 32. – 2009. – P. 182 – 204.

Ensuring safe and efficient operation of propulsion complexes in ice ships is one of the urgent problems of arctic shipbuilding. To solve this problem on a modern level it would be necessary to develop unified requirements for the propulsion power and strength of the machinery installation components. Actual standards for propulsion power and

machinery plant component strength are empirical in nature and do not fully correspond to up-to-date requirements of the shipbuilding industry. Therefore, it is necessary to develop new requirements (standards) which would include the up-to-date requirements for propulsion plants handling in ice ships. A scientifically based approach to solving this problem would make it necessary to consider it within the framework of the general concept of safe and efficient ice ship operation. In harsh conditions of the Arctic, the icebreaker escort of transport ships is the most efficient and safe way of transport route maintenance in ice-covered waters. A relevant concept provides the basis for the development of the new rules of Russian Maritime Register of Shipping, which cover classification, requirements for hull strength, machinery installations and propulsion power of ice-going vessels.

Over the last few years, the Register together with design bureaus and scientific organizations have been carrying out intensive research aimed at solving the above problems. Presently, the Register has developed new draft requirements for the propulsion power of ice ships, strength of main propulsion plant components (propeller blades, blade-to-hub fastening components, controllable pitch propeller (CPP) elements, etc.). The article presents basic provisions of the above documents. New Register requirements include up-to-date computational and experimental approaches which allow to assign propulsion power and to provide operational strength (reliability) of machinery installation components with an accuracy implied by the present-day design and operational practice. For instance, it is recommended to assign propulsion power on the basis of model tests in ice model basins agreed and approved by the Register. Much attention is given to computational and experimental methods of forecasting the ice-loads acting on propulsion complex components. Basic provisions of qualified methods for pyramid and fatigue strength of machinery installation components are presented. The elaborated draft requirements are verified by the leading propulsion complex designers/manufacturers during practical design and are being prepared for implementation in the current requirements of the Register.

UDC 629.5.014:629.564.7

V.G. Makarov, G.V. Mokhov. Extension of Continental Shelf Monitoring by Seismic Survey Ships after Their Modernization // Transactions of Russian Maritime Register of Shipping. – Issue 32. – 2009. – P. 205 – 219.

Seismic survey ship modernization technique is suggested, which is to be carried out in compliance with the Register regulating requirements, and which enables extending the area and volume of ship spaces intended for additional research equipment which meets current technical requirements, as well as the endurance.

Modern seismic survey ships make it possible to extend the areas covered by the continental shelf and improve the quality of its monitoring.

UDC 517.977:517.938:629.5.067

A.E. Sazonov. Neurotechnology: the Present and the Future // Transactions of Russian Maritime Register of Shipping. – Issue 32. – 2009. – P. 220 – 234.

The article contains a brief summary of the main principles of management systems integration using neurotechnology. A conclusion is made concerning the present and the future of these systems. Examples are given of their current application in ship automation systems, and a forecast is made concerning their use in subsequent years. An assessment is made of their possible influence on ship safety. The aim of publishing the article is to familiarize experts in the field of shipping process automation with this new approach in management science.

UDC 621.316.9:331.45

V.N. Pavlov, A.O. Trusov, V.I. Ratnikov. Peculiarities of Residual Current Devices (RCD) Application in Ships' Electrical Power Network // Transactions of Russian Maritime Register of Shipping. – Issue 32. – 2009. – P. 235 – 254.

The article analyses the technical feasibility of residual current device (RCD) application for electrical installations in ships with isolated neutral of the electrical power source.

The device is intended to ensure the electrical safety of personnel in those power supply systems where other protective measures proved to be insufficient or unreliable, and the disconnection (de-energizing) of protected circuit section or protected group of consumers is possible in compliance with uninterruptible power supply requirements.

The second purpose of the RCD is to ensure fire safety in case of a single-phase earth fault (or the local single-phase reduction of insulation resistance).

The article analyses one of the possible variants of RCD integration based on the multiline principle of finding out the fact of dangerous currents flowing through the human body. Basic principles of RCD serviceability in circuits of the type under consideration are formulated.

Results of mathematic simulation of the most unfavourable (by the values of insulation resistance-to-phase capacity ratio) regimes of the power supply system are given and recommendations are formulated for IT type supply system integration where electrical safety can be ensured by using RCD having the relevant configuration.

Recommendations on the groups of electrical power consumers, for whose protection the residual current devices shall be used are set forward.

UDC 629.5.073.5:621.396,969.33:268

N.T. Nichiporenko, E.M. Shatsberger, B.N. Sivachenko, V.G. Yakovlev. Brief Review of Radar Support to Icebreaker Fleet and Its Influence on the Efficiency and Safety of Ice Navigation // Transactions of Russian Maritime Register of Shipping. – Issue 32. – 2009. – P. 255 – 262.

IMO requirements for navigation safety provide for at least two independent radar systems to be installed on board the ships. In our country, X-band (3 cm) and S-band (10 cm) radars are traditionally used. Polar Code has adopted similar provisions for icebreakers and icebreaking-transport vessels. However, S-band radars are not used for ice navigation due to their insufficient resolution characteristics. Therefore, X-band radars along with ensuring safety of navigation, serve the purpose of selecting the optimal ice navigation route. Based on sea trial data obtained in the Arctic and the Baltic, this article shows the reasons for 'radar time shortage' during ice navigation, proceeding from which the need for short-range radars on board the ships of active ice navigation is substantiated. As an alternative, a millimeter-wave radar is offered for consideration.

UDC 621.396.932

Yu.A. Krivtsov. Modernization of Ship Collision Prevention Algorithm in the Ship Radar with Automatic Radar Plotting Aids // Transactions of Russian Maritime Register of Shipping. – Issue 32. – 2009. – P. 263 – 269.

Existing algorithms of guard zones construction in ship radar with automatic radar plotting aids and their deficiencies are considered. The algorithm of a guard zone construction with use only time parametre is offered.

UDC 621.396.932

A.I. Kulinich, A.N. Marinich, A.V. Pripotnjuk, Yu.M. Ustinov, V.P. Tomson. Reformance Characteristics of One-Band and Two-Band Ship Receivers GLONASS/GPS in the Standard Operating Mode // Transactions of Russian Maritime Register of Shipping. – 2009. – Issue 32. – P. 270 – 277.

It is shown that in two-band receivers GLONASS/GPS the exception of quasiconstant ionosphere errors is accompanied by sharp increase of noise and multibeam errors which at definition of position of a vessel increase in 3 ... 4 times and at definition of speed – in 5 ... 8 times.

To reduce of errors the block diagrams with averaging of readout are offered.

UDC 621.396.9

M.B. Solodovnichenko, N.S. Zimin, A.G. Zamyatin. Design Principles of Shore-Based Vessel Traffic Management Systems // Transactions of Russian Maritime Register of Shipping. – 2009. – Issue 32. – P. 278 – 283.

In this article the design principles and structure of shore-band vessel traffic management systems are considered. It is shown that generally the system should include the following equipment:

- automatic information system;
- shore-band radar;
- optical surveillance system;

VHF radio station;
internal means of communication;
technology container with a mast for equipment arrangement;
electric power supply system.

Российский морской регистр судоходства

Научно-технический сборник, вып. 32

Редакционная коллегия Российского морского регистра судоходства

Ответственный за выпуск *Е. Б. Мюллер*

Главный редактор *М. Ф. Ковзова*

Редактор *И. В. Сабина*

Компьютерная верстка *Д. Г. Иванова*

Подписано в печать 27.11.09. Формат 60 × 84/16. Гарнитура Гельветика.

Усл. печ. л.: 18. Уч.-изд. л.: 16,5. Тираж 250. Заказ 2392.

Российский морской регистр судоходства
191186, Санкт-Петербург, Дворцовая набережная, 8

Тел.: (812) 312-89-59

Факс: (812) 312-89-86