

РОССИЙСКИЙ МОРСКОЙ



РЕГИСТР СУДОХОДСТВА

НАУЧНО- ТЕХНИЧЕСКИЙ СБОРНИК

ВЫПУСК

31

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ

2008

Редакционная коллегия Российского морского регистра судоходства:
Н.А. Решетов, (председатель) В.И. Евенко, В.П. Карпенко, С.С. Кощий
(заместители председателя), А.Е. Сазонов, С.А. Быстров, А.А. Захаров,
С.В. Кириллов, М.Ф. Ковзова, И.Н. Копилец, М.Н. Кринская, М.А. Кутейников,
В.Б. Мачульский, Е.Б. Мюллер, А.А. Сергеев, В.А. Хоботов, В.Г. Чернов.

В этом году Российский морской регистр судоходства (РС) отмечает девяносто пять лет со дня образования. Пять лет назад в год девяностолетия мы подводили итоги деятельности РС. Что изменилось за прошедшие пять лет? Прежде всего, значительно выросла интенсивность деятельности организации. Это объясняется вступлением в силу новых требований международного морского законодательства, развитием новых технологий в строительстве и эксплуатации судов, появлением новых видов грузов и новых технологий их перевозки.

Основная цель деятельности классификационных обществ – это обеспечение безопасности человеческой жизни на море, защита окружающей среды и сохранность перевозимых грузов. Совсем недавно Генеральный секретарь ИМО Э. Митропулос в своем обращении к Подкомитету по внедрению требований государств флага достаточно жестко напомнил участникам судоходной индустрии, что ни при каких обстоятельствах коммерческие интересы не должны ставиться выше вопросов безопасности человеческой жизни на море. Этот тезис лежит в основе деятельности ИМО и МАКО.

В 2004 году под эгидой ИМО началась разработка целевых стандартов проектирования и постройки новых судов, которые должны обеспечить применение единых международных требований к конструкции судов при проектировании и постройке.

Классификационные общества использовали основные идеи целевых стандартов в Общих правилах МАКО по конструкции и прочности навалочных судов и нефтеналивных судов с двойными бортами. С 1 апреля 2006 года Общие правила вступили в силу и внедрены во всех классификационных обществах-членах МАКО. Ассоциацией начата работа по их совершенствованию и актуализации на основе предложений, поступающих от ассоциаций судовладельцев и судостроителей. РС также вовлечен в работу над Общими правилами в рамках специальных рабочих органов МАКО.

В 2004 году вступил в силу Международный кодекс по охране судов и портовых средств. РС принимает активное участие в проведении этого Кодекса в жизнь. Для этого был образован Сектор по освидетельствованию охраны судов.

В феврале 2006 года была принята Международная конвенция о труде в морском судоходстве. Эту Конвенцию, вступление которой в силу ожидается к 2012 году, называют биллем о правах моряков. Специалисты РС приняли непосредственное участие в ее разра-

ботке. В РС был создан Сектор по освидетельствованиям на соответствие требованиям МОТ.

Кроме работы по линии ИМО и МАКО РС ведет активную международную деятельность по другим направлениям. За последние пять лет перезаключены соглашения о сотрудничестве и взаимном замещении при освидетельствованиях судов с большинством классификационных обществ-членов МАКО, а также с рядом других обществ. На сегодняшний день РС имеет соглашения о сотрудничестве с 20 классификационными обществами. Подписанием этих соглашений мы привели свои отношения со всеми обществами-членами МАКО в полное соответствие с современными тенденциями сотрудничества.

Впервые в истории РС установлены и закреплены двусторонними соглашениями, расширяющими наши возможности в сфере предоставления классификационных услуг, партнерские взаимоотношения с Турецким Ллойдом и классификационным обществом Ирана.

Продолжается активное участие специалистов РС в деятельности рабочих органов различных международных организаций (МОТ, Европейской экономической комиссии ООН, Дунайской комиссии и др.). РС является ассоциированным членом Международной ассоциации независимых владельцев танкеров (ИНТЕРТАНКО), Международной ассоциации владельцев сухогрузных судов (ИНТЕРКАРГО), Балтийского и международного морского совета (БИМКО), членом Объединенного форума по конструкции танкеров (TSCF).

В мае 2006 года на совещании специальной рабочей группы Европейской экономической комиссии ООН с положительными результатами рассмотрено ходатайство РС о его признании в рамках Европейского соглашения о международной перевозке опасных грузов по внутренним водным путям (ВОПОГ). В июне 2008 года Административный комитет этого Соглашения принял единогласное решение о признании РС в качестве классификационного общества, полностью удовлетворяющего установленным критериям для выполнения соответствующих работ в рамках ВОПОГ.

Вот уже 11 лет РС продолжает практику проведения международных семинаров для судовладельцев и заинтересованных сторон. На эти семинары традиционно в качестве докладчиков приглашаются представители ИМО, ЕС, других международных организаций, руководители морских администраций, морских учебных заведений, представители высшего командного состава Береговой охраны

США. В октябре 2008 года был проведен XI Международный семинар на тему «Качественное судоходство: стандарт XXI века. Морская профессия – факторы престижности».

Освидетельствование судов на соответствие требованиям международных конвенций является одним из основных направлений деятельности РС. На сегодняшний день мы имеем поручения на выполнение работ по освидетельствованиям судов на соответствие требованиям международных конвенций от 55 морских администраций, 10 из которых являются членами ЕС.

В настоящее время РС продолжает вести переговоры о заключении соглашений или расширении полномочий с рядом других администраций.

Расширяется круг задач, стоящих перед организацией. Это связано с обострением борьбы за энергоресурсы, особенно за энергоресурсы Крайнего Севера. Некоторые ученые утверждают, что с потеплением климата на планете арктические льды будут таять, что облегчит добычу углеводородов в арктических морях. Однако это лишь прогнозы. В настоящее время добыча ведется в суровых условиях. Вокруг гипотетических запасов в арктической зоне разворачивается политическая борьба. Исход этой борьбы будет в значительной степени определяться техническими возможностями той или иной страны, которые зависят также и от наличия нормативной базы у национальных классификационных обществ.

В этой связи ведется постоянная работа по совершенствованию основных правил РС – Правил классификации и постройки морских судов. Осуществляется работа по расширению классификационных символов, отражающих в символе класса РС конструктивные и эксплуатационные особенности судов, в том числе судов, эксплуатирующихся в суровых арктических условиях. Значительную переработку претерпели Правила классификации, постройки и оборудования плавучих буровых установок и морских стационарных платформ. В новом издании 2008 года учтены унифицированные требования, интерпретации и рекомендации МАКО и соответствующие резолюции ИМО. Завершается разработка новых Правил классификации, постройки и оборудования плавучих нефтехранилищ.

Большой вклад в развитие и совершенствование нормативной базы РС вносит Научно-технический совет (НТС). В значительной степени правила корректируются по результатам научно-исследо-

вательских работ, выполняемых по заказам РС. Необходимость совершенствования правил обусловлена как практикой, так и развивающимся международным морским законодательством. С каждым годом растет объем финансирования научно-исследовательских работ. Вместе с тем НТС претерпевает и качественные изменения. За последние годы организованы новые секции: «Проблемы человеческого фактора», «Безопасность мореплавания», подсекция «Общие правила МАКО по танкерам и навалочным судам». В рамках НТС создана и успешно работает межсекционная группа по проблемам судов ледового плавания. Ведется научно-исследовательская работа по созданию Правил классификации и постройки газозовов арктического плавания для перевозки сжиженного природного газа (СПГ). Перед НТС ставится задача по разработке правил по строительству плавучих атомных энергоблоков и приливных электростанций.

РС осуществляет большой объем работ по техническому наблюдению за проектированием и постройкой объектов, связанных с добычей нефти и газа на шельфе морей и их транспортировкой. В ходе проектирования и строительства стационарного морского ледостойкого отгрузочного причала (СМЛОП) для Варандейского нефтяного терминала в Печорском море РС выполнил целый комплекс работ, связанных с техническим наблюдением не только на соответствие требованиям правил РС, но и на соответствие требованиям действующей нормативной базы, в том числе, в области промышленной безопасности. Техническое наблюдение за постройкой СМЛОП осуществлялось Калининградским филиалом РС, а отдельные блоки и секции опорного основания изготавливались под наблюдением Балтийского филиала РС. После завершения заводской стадии изготовления была проведена морская операция по доставке и установке СМЛОП общим весом более 11000 т на точку эксплуатации в Баренцевом море. Техническое наблюдение на стадии монтажа и достройки СМЛОП «Варандей», по результатам которого на него были выданы классификационные документы РС, было осуществлено Архангельским филиалом РС.

В процессе обустройства месторождения им. Ю. Корчагина в Каспийском море под техническим наблюдением РС построен морской подводный трубопровод длиной 57 км и диаметром 325 мм (начиная с рассмотрения ТЭО (проекта) трубопровода и заканчивая техническим наблюдением за его прокладкой и испытаниями). Техническое наблюдение осуществляли специалисты Главного уп-

равления и Астраханского филиала РС. Для одобрения процессов сварки, материалов и изделий привлекались представительства РС в Сингапуре, ОАЭ, Азербайджане и на Кубе. По результатам этих работ впервые в практике работы РС выданы классификационные документы на подводный трубопровод, который далее, в процессе эксплуатации, будет находиться под техническим наблюдением РС.

В настоящее время РС также выступает как экспертная организация, имеющая лицензию Ростехнадзора. В этой связи был проведен большой объем работ по экспертизе промышленной безопасности на опасных производственных объектах на шельфе морей. В число этих объектов вошли морская стационарная платформа ПА-Б в составе проекта «Сахалин–2», комплекс отгрузки нефти с морского причала Варандейского терминала, газотурбинные электрогенераторы Siemens для МСПЛ «Приразломная» и другие.

РС заключил ряд договоров с компаниями группы «ЛУКОЙЛ», среди которых рамочное соглашение на сопровождение и техническое наблюдение за обустройством морского месторождения им. Ю. Корчагина, договор об оказании услуг по контролю качества при выполнении работ первого этапа реконструкции ЛСП-1 и другие.

Следует отметить, что в течение последних лет выросло количество судов, построенных на класс РС. При этом постоянно увеличивается валовая вместимость из расчета на одно построенное судно. С 2003 года она выросла более чем в два раза.

Значительно расширилась география, и выросли объемы строительства судов и морских сооружений для освоения шельфовой зоны морей. На ФГУП «ПО Севмашпредприятие» продолжалось строительство МЛСП «Приразломная», СПБУ «Арктическая», СМЛОП «Варандей». С 2005 года в Сингапуре ведется строительство судов-снабженцев буровых вышек. В 2006 году в Астрахани завершено строительство уникальной ПБУ «Исполин». На Выборгском судостроительном заводе подписан контракт на постройку двух уникальных полупогружных плавучих буровых установок (ППБУ) для освоения Штокмановского газоконденсатного месторождения.

Следует отметить наиболее значимые проекты последних лет.

В 2006 году закончено строительство серии из четырех железнодорожных паромов пр.10802-Е («МАХАЧКАЛА 1– 4») в Хорватии, на верфи Ульяник.

На верфях группы AKER построено головное контейнерное судно ледового класса пр. 14576 «Норильский никель». В настоящее время продолжается строительство еще четырех судов серии на верфях Германии.

В 2005 году начато строительство ледоколов пр.21900 на Балтийском заводе.

С 2006 года ведется строительство серии из трех танкеров ледового класса дедвейтом 70000 т на верфи SAMSUNG HEAVY INDUSTRIES в Южной Корее.

В 2007 году начато строительство головного судна серии из двух танкеров ледового класса пр. Р-70046 дедвейтом 70000 т на ФГУП «Адмиралтейские верфи».

В 2007 году на ФГУП «ПО Севмашпредприятие» начата постройка гражданского судна с атомной энергетической установкой – головного плавучего энергоблока.

Расширяется рынок судостроения на класс РС в Китае, ведется строительство судов в Турции, Вьетнаме, Италии, Казахстане.

Отвечая растущим требованиям международного законодательства и практическим потребностям в области обеспечения безопасности судоходства, РС постоянно совершенствует систему подготовки персонала. Подготовка молодых специалистов для работы в РС начинается на последних курсах специализированных учебных заведений по согласованным программам. Ведется обмен опытом с другими классификационными обществами в области подготовки инспекторов путем проведения совместных семинаров по различным направлениям деятельности. В дальнейшем полученные знания закрепляются на практике на ведущих верфях мира. РС и Американское Бюро судоходства приняли стратегическое решение о разработке совместного учебного курса по подготовке сюрвейеров обоих классификационных обществ к проведению освидетельствований судов СПГ. Организуются семинары с представителями морских администраций и портовых властей по регионам деятельности подразделений РС. Проводятся семинары для работников фирм, которые сотрудничают с нашей организацией (например, фирм, выполняющих замеры толщин). С целью повышения эффективности и увеличения числа участников устраиваются выездные семинары в филиалах и подразделениях РС. Для обучения и переподготовки широко используются современные информационные технологии.

Подводя некоторые итоги нашей работы за последнее время, можно с уверенностью сказать, что Российский морской регистр судоходства в целом отвечает самым современным требованиям мировой судоходной индустрии.

Н. А. Решетов,
генеральный директор
Российского морского регистра судоходства.

УДК 629.12.001.2

О.В. Белый, Д.А. Скороходов, А.Л. Стариченков

ПРОБЛЕМЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СЕВЕРНОГО МОРСКОГО ПУТИ

1 Введение

Поводом для очередного оживления интереса к Северному морскому пути (СМП) стало выступление в октябре 1987 г. в Мурманске президента СССР М.С. Горбачева, призвавшего к международному сотрудничеству в Арктике. Один из аспектов такого сотрудничества – открытие международного судоходства по СМП. В 1993 г. по инициативе Министерства морского флота СССР норвежский Институт Фри-тьофа Нансена совместно с ЦНИИМФ и японским Фондом морского судоходства приступили к разработке Международной программы освоения СМП – International North Sea Route Programme (INSROP).

Северный морской путь в соответствии с федеральным законом «О внутренних морских водах, территориальном море и прилежащей зоне Российской Федерации» (1998 г.) определяется как исторически сложившаяся национальная единая транспортная коммуникация Российской Федерации в Арктике. Плавание по трассам СМП, в том числе в проливах Вилькицкого, Шокальского, Дмитрия Лаптева, Санникова, осуществляется в соответствии с указанным федеральным законом, другими федеральными законами, международными договорами Российской Федерации и правилами плавания по трассам СМП, утвержденными Правительством Российской Федерации и опубликованными в «Извещениях мореплавателям». Кроме того, помимо Правил плавания по трассам СМП, Требований к конструкции, оборудованию и

снабжению судов, следующих по СМП от 14 сентября 1990 г. и перечня арктических портов, разрешенных для захода иностранных судов, необходимо пользоваться Руководством для сквозного плавания судов по СМП 1995 г. и Приказом № 322 от 26 июля 2005 г. Федеральной службы по тарифам.

2 Значение Северного морского пути

Границы СМП согласно действующим Правилам плавания по трассам СМП (1990 г.) определяются, исходя из местоположения пригодных к ледовой проводке судов трасс, расположенных во внутренних морских водах, территориальном море или экономической зоне и прилегающих к северному побережью России. Крайние пункты трасс СМП ограничиваются: на западе – западными входами в проливы Новой Земли и меридианом, проходящим на север от мыса Желания, на востоке – в Беринговом проливе параллелью 66° северной широты и меридианом 168° 58' 37" западной долготы.

СМП почти в два раза короче других морских путей из Европы на Дальний Восток: от Санкт-Петербурга до Владивостока по СМП – 14 280 км, от Санкт-Петербурга до Владивостока через Суэцкий канал – 23 200 км, а вокруг мыса Доброй Надежды – 29 400 км.

Длина основной ледовой трассы СМП от проливов Новой Земли до порта Провидения составляет 5610 км; протяженность судоходных речных путей, примыкающих к СМП, составляет около 37000 км. Однако продолжительная и суровая зима при коротком и холодном лете обуславливает большую ледовитость арктических морей, являющуюся главным препятствием для прохода судов на значительных отрезках трассы.

Наиболее трудные условия плавания складываются в районах больших скоплений тяжелых льдов, которые до конца не разрушаются даже в самые теплые месяцы (Таймырский и Айонский ледовые массивы). Проводка транспорта через эти массивы возможна только с помощью ледоколов.

Функциональная граница СМП начинается от западной части Кольского полуострова. СМП является важнейшей частью инфраструктуры экономического комплекса Крайнего Севера и связующим звеном между российским Дальним Востоком и западными районами страны. СМП объединяет в единую транспортную сеть крупнейшие речные артерии Сибири, сухопутные, воздушные и трубопроводные виды транспорта. Для некоторых районов арктической зоны – Чукотки, островов

арктических морей и ряда населенных пунктов побережья Таймырского (Долгано-Ненецкого) автономного округа – морской транспорт является единственным средством перевозок грузов и жизнеобеспечения населения. На направлении «Мурманск – Дудинка» осуществляется круглогодичная навигация в целях обеспечения деятельности Норильского горно-металлургического комбината (ГМК).

В ноябре 1999 г. в Осло состоялась международная конференция, обсудившая результаты 6-летних исследований потенциальных возможностей СМП для международного использования, проведенных в рамках INSROP. В работе конференции впервые приняли участие судовладельцы, которые также обсуждали ключевые проблемы судоходства по СМП.

Интерес иностранных судоходных и деловых кругов к СМП определяется двумя важнейшими факторами. Прежде всего, он может стать более выгодной с экономической точки зрения альтернативой осуществляемым ныне перевозкам между портами Европы, Дальнего Востока и Северной Америки. По этому пути, например, от Гамбурга до Иокогамы, всего 6 600 морских миль, тогда как через Суэцкий канал – 11 400 миль.

С другой стороны, СМП интересен для иностранцев как транспортная артерия для перевозки минерального сырья из арктических регионов России. В прилегающих к нему районах содержится 35 % мировых запасов нефти и газа. Перевозки же российского газа и нефти морским путем могут оказаться выгоднее строительства газо- и нефтепроводов. К тому же такие магистральные трубопроводы в Западную Европу могут проходить только через бывшие советские республики, политика которых не всегда предсказуема, а транспортировка через их территорию обходится достаточно дорого. В то же время ледовая обстановка в Баренцевом море и в западной части Карского моря вполне благоприятна и позволяет проходить танкерам ледового класса без сопровождения ледоколами в течение большей части года. Кроме того, по СМП можно организовать перевозку минеральных удобрений с Кольского полуострова в Восточную Азию, в Китай.

3 Состояние Северного морского пути

В процессе перехода к рыночным отношениям произошла трансформация звеньев СМП и хозяйствующих субъектов в различные формы собственности. Морские пароходства, за исключением Арктического морского пароходства, акционированы. Транспортный

флот стал собственностью этих акционерных обществ. Ледокольный, аварийно-спасательный и гидрографический флот, портовые сооружения, сеть полярных станций, средства навигационно-гидрографического и гидрометеорологического обеспечения и связи закреплены в федеральной собственности. Ледокольный флот передается в доверительное управление ОАО «Мурманское морское пароходство», ОАО «Дальневосточное морское пароходство» и ОАО «Северное морское пароходство». Арктические порты, кроме акционированного порта Певек, переданы субъектам Российской Федерации и хозяйствующим субъектам. Федеральная собственность на СМП и управление им является основой сохранения СМП как национальной единой коммуникации России в Арктике.

Проводимые реформы особенно негативно отразились на социально-экономической сфере Севера. Значительная часть производства свернута. Новые «точки» экономического возрождения арктической зоны пока не получают должной поддержки государства. Объемы перевозок грузов по СМП, сократившись в 4 раза, продолжают находиться на самом низком уровне (в 2000 г. – 1,7 млн. т). Транспортная система Севера оказалась невостребованной.

Большая часть транспортных судов с ледовыми усилениями по ресурсным показателям к 2003 г. выведена из эксплуатации. Оставшиеся 50–60 судов с ледовыми усилениями не смогут обеспечить перспективный объем перевозок грузов. Решений по строительству новых транспортных судов после 2000 г. пока нет.

Атомный ледокольный флот, с учетом ввода в эксплуатацию атомного ледокола «50 лет Победы», позволил обеспечить прогнозируемые объемы грузоперевозок только до 2005 г. К этому времени четыре ледокола (из шести) выработали ресурс ядерных энергетических установок, и если не продлить их ресурс на 10 лет, то возникнет острый дефицит ледоколов. На строительство атомного ледокола нового поколения потребуется 7–8 лет, что указывает на необходимость уже сейчас разворачивать работы по созданию новых атомных ледоколов.

Арктические порты по-прежнему являются самым слабым звеном на СМП. Из-за отсутствия средств у собственников модернизация технического оборудования портов после 1990 г. не производится. Причалные сооружения в большинстве арктических портов требуют капитального ремонта, реконструкции и дноуглубления для приема современных судов. В большинстве портов отсутствуют или находятся в критическом состоянии сооружения по приему и утилизации судовых отходов, средства ликвидации аварийных разливов нефти.

Навигационно-гидрографическое обеспечение, из-за сокращения бюджетного финансирования до 15–20 % от необходимого объема, находится на грани выживания, и его состояние не обеспечивает безопасность мореплавания в должной мере. В действие вводится только минимум требуемых средств навигационного оборудования. Гидрографический флот (21 судно) фактически прекратил систематические промерные работы. Система передачи навигационной информации и предупреждений об опасностях на трассах СМП из-за ликвидации сети радиостанций оказалось дезорганизованной.

Гидрометеорологическое обеспечение значительно сократилось как по объему, так и по качеству ледовых и метеорологических прогнозов на различные сроки. Из-за отсутствия бюджетного финансирования число полярных станций сократилось с конца 80-х гг. почти в два раза. Прекращены работы по развитию Центра ледовой и гидрометеорологической информации «Север». Но в настоящее время создан Центр, осуществляющий мониторинг ледовой обстановки и значительно улучшилось качество гидрометеорологического обеспечения.

Система радиосвязи, существовавшая в течение многих лет, фактически прекратила существование из-за ликвидации сети радиостанций Минтранса России и Росгидромета. Аварийно-спасательная служба свернута. Штаб морских операций восточного района СМП в порту Певек с 1997 г. не функционирует. Его местом дислокации стал порт Владивосток. Штаб морских операций западного района перенесен из порта Диксон в порт Мурманск. Работает он в сокращенном составе. Ответственные за формирование штабов морских операций Мурманское и Дальневосточное морские пароходства ставят вопрос о финансировании деятельности штабов морских операций. Необходимо переиздание Положения о Штабе морских операций. Потонный (ледокольный) сбор, регламентируемый Приказом Федеральной службы по тарифам, не отвечает ни интересам грузовладельцев и судовладельцев, ни интересам федеральных органов исполнительной власти. Необходима замена этого сбора оплатой за конкретные услуги, предоставляемые при плавании по трассам СМП.

Существующие тарифы, налоги и таможенные пошлины на СМП пока не способствуют экономическому развитию Арктической зоны и ее транспортному обеспечению. Действующие Соглашения о разделе продукции пока не защищают в должной мере приоритет российских перевозчиков.

Не соответствует нынешним реалиям и система управления СМП ввиду трансформации его звеньев и хозяйствующих субъектов в раз-

личные формы собственности. В целях повышения эффективности управления СМП необходимо объединение в той или иной форме усилий федеральных органов исполнительной власти, органов исполнительной власти субъектов Российской Федерации и хозяйствующих субъектов. Следует повысить роль и значимость Администрации СМП как главного государственного надзорного органа в организации арктического судоходства, в рациональном использовании СМП и обеспечении сохранности природной среды. Продолжает оставаться нерешенной острая проблема организации и осуществления завоза социально значимых грузов на Север.

Нарушена система кадрового обеспечения транспортного комплекса СМП. Отмена обязательного распределения выпускников высших учебных заведений и низкий уровень оплаты труда в государственных учреждениях отрицательным образом сказались в первую очередь на воспроизводстве специалистов по арктической гидрографии и гидрометеорологии в Государственной морской академии им. адм. С.О. Макарова, в которой (единственной) имеется арктический факультет.

На уровне судоходных компаний, обслуживающих СМП, отмечается жесткая конкуренция. Ведущую позицию занимают ОАО «Мурманское морское пароходство» и вновь созданная судоходная компания «Лукойл-Арктик-Танкер». Они расширяют зону перевозок до порта Мыс Шмидта и предлагают свои услуги в качестве операторов всего северного завоза. Другие пароходства (Дальневосточное, Приморское, Арктическое) из-за резкого сокращения грузовой базы вынуждены сворачивать свою деятельность в Арктике. Только ОАО «Мурманское морское пароходство» заключило Договор о доверительном управлении ледокольным флотом. Другие пароходства (Дальневосточное и Северное), на балансе которых находятся ледоколы, пока такие договоры не заключили. Назрела острая необходимость согласования деятельности морских пароходств по таким важнейшим вопросам транспортной деятельности в Арктике как тарифы, оплата предоставляемых при плавании по СМП услуг, управление ледокольным флотом и морскими ледовыми операциями, антимонопольные мероприятия.

На международном уровне не снижается интерес зарубежных фирм к морскому экспорту нефти и газа из месторождений Баренцева и Карского морей, а также к транзитным перевозкам грузов по СМП между портами Запада и Востока. Однако преимущества и доход от экспорта и транзита по СМП могут быть реализованы при обеспечении государством нормального функционирования трассы, отвечаю-

щего всем требованиям отечественной нормативно-правовой базы и нормам международного морского права по безопасности мореплавания.

В области национальной безопасности СМП является важнейшим фактором обеспечения обороноспособности России на наиболее труднодоступном и слабозащищенном участке границы. Необходимо осуществить комплекс военно-организационных, военно-экономических и военно-технических мероприятий по усилению функционирования сил ВМФ и пограничной службы в Арктическом регионе, обеспечению надежной защиты государственной границы, охраны внутренних вод, территориального моря, исключительной экономической зоны континентального шельфа и природных ресурсов Российской Федерации в Арктике.

4 Развитие Северного морского пути

Принципы нового подхода к комплексному развитию СМП исходят из того, что развитие судоходства и транспортных технологий в бассейне Северного Ледовитого океана является одной из важнейших общегосударственных задач Российской Федерации, и состоят в следующем.

Государство обеспечивает устойчивое и безопасное функционирование СМП; определяет и поддерживает приоритетные отрасли экономики Севера, способные в наиболее короткие сроки увеличить грузопотоки; создает благоприятные законодательно-правовые и финансово-экономические условия для деятельности отечественных коммерческих предприятий, привлечения российских и иностранных инвестиций (Соглашения о разделе продукции); развивает федеральную транспортную инфраструктуру (ледоколы, гидрографический и спасательный флот, средства навигации, гидрометеорологии, связи, спасания, охраны окружающей среды) как основу единой национальной транспортной коммуникации России в Арктике; способствует развитию учебных заведений, являющихся основными центрами по подготовке специалистов, обеспечивающих жизнедеятельность СМП.

Коммерческие предприятия и субъекты Российской Федерации по мере развития экономической деятельности и роста грузовой базы строят ледокольно-транспортный флот с участием государственной поддержки или пользуются услугами судоходных компаний, развивают портовое хозяйство и принимают долевое участие в развитии инфраструктуры СМП, обеспечивающей деятельность этих субъектов.

В процессе оживления экономики арктической зоны и комплексного развития СМП создается самоокупаемая арктическая морская транспортная система под контролем государства. В соответствии с новыми экономическими условиями поэтапно организуются новые формы управления СМП, удовлетворяющие интересам федеральных и региональных органов управления и коммерческих структур.

Вместе с вопросами освоения природных ресурсов Арктики встают вопросы транспортного обеспечения осваивающих ее предприятий. Если, к примеру, руду Полярного Урала еще можно доставить потребителю по обходным маршрутам с большими транспортными затратами, то руду Якутии или Чукотки доставить потребителю можно только по СМП. Так как железных дорог на севере Сибири нет, а Транссибирская магистраль расположена на юге, далеко от северных регионов и Западной, и Восточной Сибири.

Помимо освоения рудных запасов Заполярья на одно из первых мест выходит индустриальное освоение месторождений нефти и природного газа Российской Арктики. Здесь запасы углеводородов только на Российском шельфе Ледовитого океана оцениваются примерно в 100 млрд. т нефтяного эквивалента!

В Ямало-Ненецком округе, ведущем энергодобывающем регионе страны, добыча углеводородов смещается на Север: в районы полуостровов Ямал, Гыдан, в акваторию Обской губы и на шельф Карского моря. По оценке экспертов, запасы только жидких углеводородов на севере Ямала, Гыдана, в Обской и Тазовской губах, на шельфе Карского моря в районе автономного округа составляют около 7 млрд. т!

Обустройство месторождений этой зоны по планам Федеральной энергетической программы обеспечит углеводородами потребности страны. В этом случае СМП приобретает особое значение. По его трассе углеводороды можно транспортировать из зоны Ямало-Ненецкого округа в страны Арктического, а также Азиатско-Тихоокеанского региона.

5 Направления комплексного развития Северного морского пути

Динамика роста числа ледоколов и транспортных судов, развитие портовых транспортно-технологических комплексов и систем обеспечения безопасности мореплавания будут определяться темпами развития экономической деятельности в Арктической зоне и ростом грузовой базы для СМП.

Перспективные объемы перевозок по СМП будут связаны с освоением нефтегазовых месторождений на полуострове Ямал, в бассейнах рек Обь и Енисей, а также в примыкающих к СМП районах Баренцева моря (Тимано-Печорская нефтегазоносная провинция, Штокмановское газоконденсатное и Приразломное нефтяное месторождения и др.) и развитием морского экспорта нефти и газа из этих месторождений в Европу. Несколько оживится экспорт цветных металлов, производимых Норильским ГМК. Возможно появление новой арктической судоходной трассы «губа Белушья – порт Мурманск», связанной с освоением крупного полиметаллического месторождения (с геологическими запасами в 10 млн. т. по металлу) и залежей марганцевых руд (3 млрд. т) на островах Новая Земля.

Стимулом развития судоходства в восточной части СМП может явиться экспорт в страны Азиатско-Тихоокеанского региона редких земель и апатитов из арктического месторождения Томтор в Республике Саха (Якутия) и полиметаллов из месторождений на Чукотке. При непосредственной государственной поддержке смогут развиваться коммерческие предприятия лесопереработки в бассейнах рек Енисей и Лена и возобновится экспорт лесных грузов по СМП. Имеется реальная возможность увеличить объем транзитных перевозок по СМП за счет экспорта черных металлов и минеральных удобрений, производимых предприятиями-экспортерами в европейской части России. По мере оживления экономики арктической зоны увеличатся объемы каботажных перевозок по СМП.

По предварительной оценке общий объем перевозок по СМП в 2015 г. достигнет 14–15 млн. т, в том числе: экспорт нефти, сжиженных газов и газового конденсата из Тимано-Печорских и Обь-Енисейских месторождений увеличится до 8–10 млн. т; транзитные перевозки грузов – до 2,5 млн. т, включая экспорт российских удобрений и металлов; экспорт лесных грузов из бассейнов рек Енисей и Лена – до 1 млн. т; увеличатся также объемы каботажных перевозок и северного завоза.

Совершенствование арктической морской транспортной системы имеет целью обеспечение гарантированной и экономически эффективной перевозки возрастающих объемов грузов в минимальные сроки, с учетом социальных, природоохранных, оборонных и других национальных требований.

6 Способы решения поставленных задач

Комплексное развитие СМП является сложной межотраслевой, межрегиональной и многодисциплинарной задачей, ее решение пла-

нируется на длительную перспективу по этапам, предусмотренным федеральной целевой программой «Мировой океан».

Цель начального этапа (2000–2002 гг.) развития СМП заключалась в приостановке процесса спада и в стабилизации основных параметров работы арктической морской транспортной системы. Достигнуто это путем реализации первоочередных мер по обеспечению устойчивого и безопасного функционирования СМП.

Цель среднесрочного этапа (2003–2007 гг.) развития СМП при возрастании грузопотока по СМП до 5–7 млн. т сводится к созданию финансово-экономико-правовых условий для устойчивого развития СМП. Реализация целей данного этапа осуществлялась в рамках Программы комплексного развития СМП и его использования на коммерческой основе.

Цель долгосрочного этапа (2008–2015 гг.) развития СМП при увеличении объема перевозок грузов по СМП до 14–15 млн. т заключается в переходе к коммерческому использованию СМП, которое осуществляется в рамках Программы комплексного развития СМП и его использования на коммерческой основе.

7 Заключение

На протяжении последних нескольких лет успешно реализуется программа продления ресурса действующих ядерных энергетических установок на атомоходах до 150000 часов и срока службы ледоколов до 30 – 32 лет. Это позволяет обеспечить безопасную эксплуатацию атомного ледокольного флота еще в течение 10 – 12 лет. Ведущая роль в данном направлении принадлежит Российскому морскому регистру судоходства. Реализация такой программы – единственный приемлемый путь обеспечения судоходства на трассах СМП в ближайшие 10 – 15 лет, а также создания необходимого резерва времени для проектирования и строительства нового поколения атомных ледоколов, которые придут на смену действующим.

На сегодняшний день работы по продлению ресурса атомной паропроизводящей установки успешно выполнены на трех атомных ледоколах: «Арктика», «Таймыр», «Вайгач». В соответствии с межотраслевой целевой комплексной программой продления ресурса атомных установок в плановом режиме выполняются работы на а/л «Россия», а/л «Советский Союз» и атомном лихтеровозе «Севморпуть».

На данный момент парохозяйства Северо-Запада России не только полностью удовлетворяют потребность в перевозках по СМП, но и

готовы обеспечить транспортировку больших объемов грузов. Арктическая транспортная система представляет собой сложную организационную структуру, которую необходимо постоянно поддерживать, и на дальнейшее развитие которой потребуется немало сил и средств.

Наряду с уникальными работами по продлению ресурса в рамках международных экологических программ реализован ряд важнейших проектов, связанных с созданием системы физической защиты и ядерной и радиационной безопасности на судах атомного флота, утилизацией плавтехбазы «Лепсе», строительством первого в России хранилища отработанного ядерного топлива (ОЯТ) контейнерного типа.

Начиная с 2011 г. в связи с предстоящим выводом из эксплуатации действующих атомных ледоколов, остро встанет проблема, связанная с утилизацией атомных реакторов и ОЯТ.

Однако сегодня отсутствует концепция утилизации гражданских судов с ядерными энергетическими установками (ЯЭУ), судов атомно-технологического обслуживания (АТО), отсутствует инфраструктура и технология проведения работ, не определены предприятия–исполнители. Согласно ФЗ «Об использовании атомной энергии» проект утилизации должен быть подготовлен в срок не менее чем за 5 лет до начала вывода из эксплуатации объекта с ЯЭУ (а/л «Арктика» будет выведен из эксплуатации в 2008 г.). Отсрочка нормативного вывода ледоколов из эксплуатации неизбежно повлечет необоснованные существенные затраты на содержание ледоколов и создаст потенциальную радиационную опасность для региона. В этом направлении также Российский морской регистр судоходства должен играть ведущую роль.

В целях экономии бюджетных средств необходимо разработать единую концепцию утилизации для надводных кораблей с ЯЭУ ВМФ и гражданских судов с ЯЭУ. Данная работа в настоящее время проводится только для объектов ВМФ и не учитывает специфику и потребность гражданского атомного флота.

В целях обеспечения бесперебойного и безопасного функционирования СМП, а также дальнейшего успешного освоения ресурсов континентального шельфа и создания условий эффективной деятельности государства в Арктике, предлагаются следующие проекты поручений соответствующим министерствам и ведомствам:

создать федеральную структуру по управлению развитием и функционированием СМП на основе государственно-частного партнерства;

разработать концепцию федеральной целевой программы «Восстановление и развитие СМП»;

при разработке федеральной целевой программы развития морского транспорта на 2011 – 2020 гг. предусмотреть разработку концепции утилизации гражданских судов с ядерной энергетической установкой (ЯЭУ) и судов атомного флота, проекты их утилизации, подготовить предложения по источникам финансирования проектов и включению соответствующих расходов в федеральный бюджет.

Список литературы

1. Пазовский В.М. Северный морской путь: оценки зарубежных специалистов. – Дальневосточная государственная морская академия им. адм. Г.И. Невельского. – Владивосток, 2002.
2. Путин В.В. Выступление на совещании по проблемам Северного морского пути и судостроения 5 апреля 2000 г. – Мурманск, 2006.
3. Северный морской путь: дорога в будущее // Экономика. – № 236 (4199). – 2006.
4. Матюшенко Н.И. Экономическое обоснование грузовых перевозок по Северному морскому пути с целью обеспечения рейсов Мурманск – Китайская Народная Республика // Материалы второй Евро-азиатской конференции по транспорту. – СПб., 12–13 сентября 2000.
5. Предложения ЦНИИМФ по модернизации Арктической транспортной системы Северного морского пути. – СПб.: ЗАО ЦНИИМФ, 2007.
6. Краткая характеристика транспортной отрасли Архангельской области // Отчет администрации Архангельской области. – Архангельск, 2007.
7. Краткая характеристика транспортного комплекса Мурманской области // Отчет администрации Мурманской области. – Мурманск, 2007.
9. Анализ состояния транспортного комплекса Ненецкого АО // Отчет администрации Ненецкого автономного округа. – Нарьян-Мар, 2007.

КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ ОЦЕНКА БЕЗОПАСНОСТИ СУДНА ЛЕДОВОГО ПЛАВАНИЯ

Вопрос обеспечения безопасности судна как технической системы всегда будет актуальным в силу высокой стоимости этой системы и большого количества рисков, сопровождающих его эксплуатацию.

Понятие безопасности является комплексным и складывается из безопасности для судна при воздействии на него разрушающих факторов внешней среды и безопасности для внешней среды вследствие аварии судна.

Примеры разрушающих факторов показаны на рис. 1.

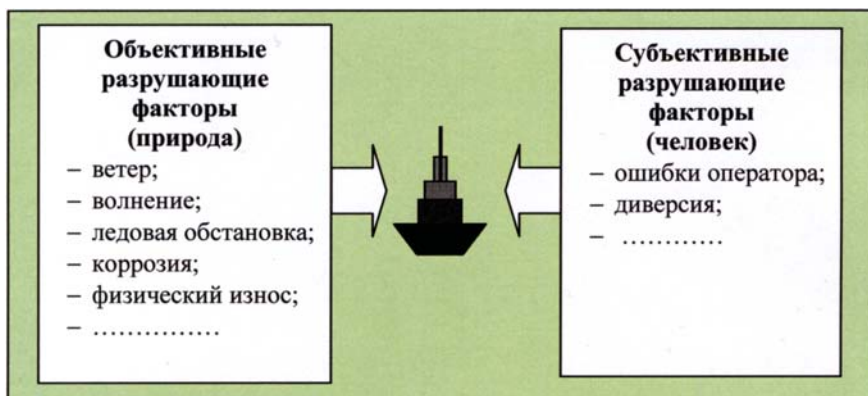


Рис. 1
Разрушающие факторы, действующие на судно

В данной статье мы будем рассматривать, в основном, безопасность самого судна. Причем безопасность, связанную с проектными и конструктивными решениями. Безопасность, зависящая от правильности действий экипажа, организации навигации, т. е. факторов, ко-

которые не могут быть обеспечены в процессе проектирования судна, требуют отдельного рассмотрения.

Безопасность судна как технической системы определяется двумя его свойствами: это защищенность и живучесть. Защищенность системы – это возможность устранения неблагоприятных факторов, предотвращение их воздействия и нечувствительность к такому воздействию. Защищенность всегда дифференцирована, поскольку степень агрессивности неблагоприятных факторов различна, как и возможность противостояния им. Абсолютной защищенности не существует.

Живучесть – это свойство, характеризующее способность системы эффективно функционировать при получении повреждений (разрушений) или восстанавливать данную способность в течение заданного времени.

Воздействие разрушающих факторов всегда комплексное и комбинации их интенсивностей, которые могут привести к аварии, бесконечны, поэтому оценка безопасности через типовые сценарии всегда будет методически недостаточной. При превышении интенсивности воздействия разрушающего фактора (или их комбинации) порога защищенности судна по этому фактору (или их комбинации) возникает аварийная ситуация.

Номенклатура аварийных ситуаций, существенно меньше, чем сценариев, приводящих к ним. Перечень аварийных ситуаций показан на рис. 2.

В судовых условиях аварийная ситуация также носит комплексный характер (как правило повреждение одного элемента (системы, подсистемы) является причиной выхода из строя других). Например, затопление отсека может наступить вследствие механического разрушения борта (столкновение) и вызвать, в свою очередь, отказы технических устройств и пожар из-за короткого замыкания.

В настоящее время Правила Регистра, предъявляя требования к судну в части его конструкции, устройств, снабжения и т. д., по существу нормируют его защищенность и живучесть по отдельным аварийным ситуациям, хотя самые тяжелые последствия наступают в результате «комплексных» аварий. Например, регламентация размера пробоины в части V «Деление на отсеки» не увязывается с требованиями местной и общей продольной прочности.

Следовательно, необходим некий комплексный показатель безопасности судна, позволяющий оценивать безопасность в «комплексных» аварийных ситуациях, рассматривая само судно как сложную

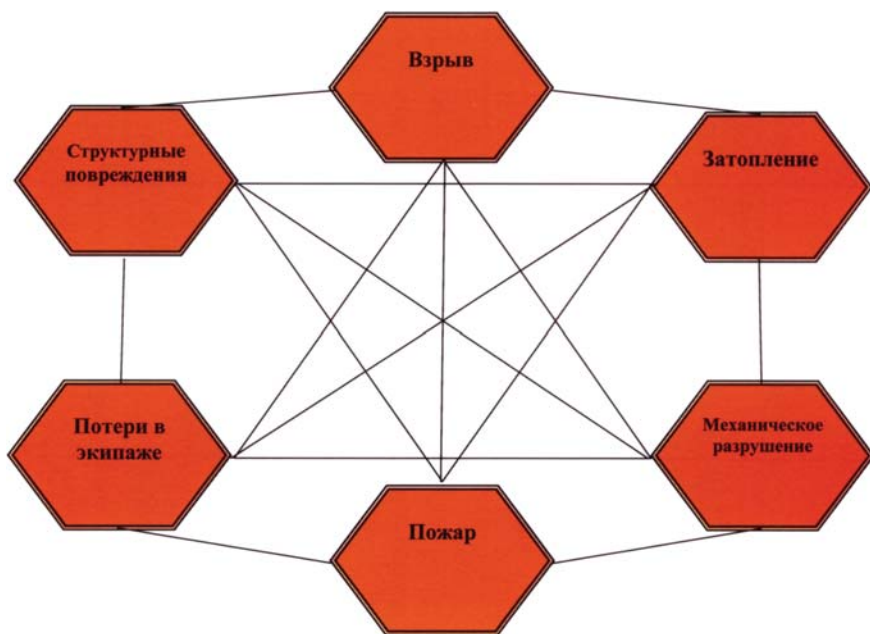


Рис. 2
Номенклатура аварийных ситуаций и их комбинаций

систему, элементы которой перенастраивают свои связи в процессе развития аварии.

В оценке комплексной безопасности судна нуждаются все стороны, участвующие в процессе строительства и эксплуатации судна: проектанты, строители, Регистр, страховые компании. Этот показатель должен иметь количественное выражение, а алгоритм его расчета должен быть согласован всеми заинтересованными сторонами.

Кроме того, желательно обеспечить применение комплексного показателя безопасности (КПБ) уже на ранних стадиях проектирования, когда принимаются принципиальные архитектурно-конструктивные решения. Это позволит улучшить качество проектов, и, следовательно, повысит их конкурентоспособность.

Общая структура КПБ может быть либо аддитивной, либо мультипликативной:

$$\text{КПБ} = \sum \lambda_i F_i; \quad (1)$$

$$\text{КПБ} = \prod F_i^{\lambda_i}, \quad (2)$$

где F_i – i -й локальный показатель безопасности;

λ_i – весовой коэффициент, учитывающий важность локального показателя в структуре КПБ.

Выбор мультипликативной структуры КПБ в виде (2) означает, что комплексная оценка безопасности будет нулевой при хотя бы одном нулевом локальном показателе.

В критериях типа (1) и (2) важно обеспечить соразмерность локальных критериев. Естественной нормировкой будет ограничение диапазонов изменения локальных показателей безопасности от 0 до 1, причем при обеспечении безопасности по данной аварийной ситуации $F_i = 1$, в противном случае $F_i = 0$.

Безопасность судна в случае затопления будет характеризоваться:

$\theta_{\text{КН}}$ – фактическим углом крена до спрямления аварийного судна;

$\theta_{\text{КК}}$ – фактическим углом крена после спрямления аварийного судна;

$h_{\text{АВ}}$ – фактической величиной поперечной метацентрической высоты до спрямления аварийного судна (расчет при отсутствии крена);

$\theta_{\text{ЗАК}}$ – фактическим углом заката диаграммы статической остойчивости поврежденного судна;

$l_{\text{АВ}}$ – фактической величиной максимального плеча диаграммы статической остойчивости поврежденного судна.

Локальный показатель безопасности по затоплению будет иметь следующий вид:

$$F_3 = 1 - \frac{\lambda_1 A_1 + \lambda_2 A_2 + \lambda_3 (1 - A_3) + \lambda_4 (1 - A_4) + \lambda_5 (1 - A_5)}{\sum_{i=1}^5 \lambda_i}, \quad (3)$$

где $\theta_{\text{КН}}^*$, $\theta_{\text{КК}}^*$, $h_{\text{АВ}}^*$, $\theta_{\text{ЗАК}}^*$, $l_{\text{АВ}}^*$ – нормируемые пределы соответствующих величин;

$$A_1 = \begin{cases} \theta_{\text{КН}} / \theta_{\text{КН}}^* & \text{при } 0 < \theta_{\text{КН}} \leq \theta_{\text{КН}}^* \\ 1 & \text{при } \theta_{\text{КН}}^* < \theta_{\text{КН}} \end{cases}$$

$$A_2 = \begin{cases} \theta_{\text{КК}} / \theta_{\text{КК}}^* & \text{при } 0 < \theta_{\text{КК}} \leq \theta_{\text{КК}}^* \\ 1 & \text{при } \theta_{\text{КК}}^* < \theta_{\text{КК}} \end{cases}$$

$$A_3 = \begin{cases} 0 & \text{при } h_{\text{АВ}} \leq 0 \\ h_{\text{АВ}} / h_{\text{АВ}}^* & \text{при } 0 < h_{\text{АВ}} \leq h_{\text{АВ}}^* \\ 1 & \text{при } h_{\text{АВ}}^* < h_{\text{АВ}} \end{cases}$$

$$A_4 = \begin{cases} \theta_{3AK} / \theta_{3AK}^* & \text{при } 0 < \theta_{3AK} \leq \theta_{3AK}^* \\ 1 & \text{при } \theta_{3AK}^* < \theta_{3AK} \end{cases}$$

$$A_5 = \begin{cases} I_{AB} / I_{AB}^* & \text{при } 0 < I_{AB} \leq I_{AB}^* \\ 1 & \text{при } I_{AB}^* < I_{AB} \end{cases}$$

$$\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5 = 1, \text{ все } \lambda_i \geq 0.$$

В выражении (3) присутствуют собственные, локальные весовые коэффициенты, учитывающие относительную важность контролируемых параметров для обеспечения безопасности судна в случае загорания.

Локальный показатель безопасности для пожара может быть представлен несколькими способами.

Возможно представление его как совокупности вероятностей невыхода из строя оборудования и технических средств, находящихся в аварийных помещениях. При этом показатель рассматривается не как вероятность, а как сумма баллов, меньшая величина которой, соответствует большей безопасности.

Вероятность может быть связана с величиной, интегрально характеризующей интенсивность разрушающего фактора «Пожар», а именно среднеобъемную температуру в аварийном помещении. Будем считать, что вероятность выхода из строя технического средства при начальной температуре в данном помещении равна 0, а при достижении некоторой предельной для этого средства температуры – 1. Тогда функция ущерба будет иметь следующий вид:

$$F_{\Pi(\tau)} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^{N_i} \lambda_{ij} P_{ij}}{K \sum_{i=1}^K N_i} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^{N_i} \lambda_{ij} (T_{i(\Phi)} - T_{Hi}) / T_{KPi j} - T_{Hi}}{K \sum_{i=1}^K N_i}, \quad (4)$$

где λ_{ij} – весовой коэффициент, учитывающий важность данного оборудования для работоспособности судна;

P_{ij} – вероятность выхода из строя i -го оборудования в j -м помещении;

$T_{i(\tau)}$ – текущая среднеобъемная температура в i -м аварийном помещении (в данном случае не может превышать соответствующую критическую температуру);

T_{Hi} – начальная температура в i -м аварийном помещении;

$T_{KPi j}$ – критическая температура для j -го оборудования в i -м аварийном помещении;

K – число помещений судна (в число «условных» помещений могут быть включены и участки открытых палуб с установленным на них оборудованием);

N_i – число единиц оборудования в i -м помещении.

Весовые коэффициенты удовлетворяют условию:

$$\sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^{N_i} \lambda_{ij} = 1; \lambda_{ij} \geq 0 \text{ для } i=1, \dots, K; j=1, \dots, N_i. \quad (5)$$

Таким образом, в случае отсутствия повреждения оборудования показатель безопасности равен 1, если повреждены все технические средства во всех помещениях судна – 0.

Локальный показатель безопасности по взрыву можно построить аналогично функции ущерба для пожара (4). Однако, учитывая, что следствием взрыва могут быть пожар и затопление, к ней должны быть добавлены соответствующие функции ущерба с учетом вероятности наступления указанных последствий:

$$F_B = 1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^{N_i} \lambda_{ij} (\Delta P_{\Phi ij} / \Delta P_{\Phi KPi j})}{K \sum_{i=1}^K N_i} + P_{BP} \cdot R_{\Pi}(\tau) \cdot P_{B3} \cdot R_3 \right), \quad (4)$$

где λ_{ij} – весовой коэффициент, учитывающий важность данного оборудования для работоспособности судна;

ΔP_{Φ} – избыточное давление во фронте ударной волны;

$\Delta P_{\Phi KPi j}$ – избыточное давление, приводящее к полному разрушению данного оборудования;

P_{BP} – вероятность возникновения пожара после взрыва;

P_{B3} – вероятность затопления соответствующих помещений;

K – число помещений судна (в число «условных» помещений могут быть включены и участки открытых палуб с установленным на них оборудованием);

N_i – число единиц оборудования в i -м помещении.

Возможный вид показателя безопасности для случая механического разрушения корпуса судна:

$$F_M = 1 - \frac{\sigma_{\Pi} - \sigma_0}{\sigma_P - \sigma_0}, \quad (7)$$

где σ_{Π} – величина напряжений в корпусе поврежденного судна;

σ_0 – величина напряжений в корпусе неповрежденного судна;

σ_P – величина напряжений, разрушающих корпус. Если разрушение корпусных конструкций повлекло за собой затопление, пожар, взрыв, то в выражение (7) должны быть добавлены дополнительные слагаемые по типу (6).

Под структурными повреждениями будем понимать повреждения, возникшие в элементе судовой подсистемы либо под действием внутренних причин (вследствие технических неисправностей судового оборудования или неправильных действий экипажа, приведших к

возникновению таких неисправностей), либо под действием разрушающих факторов, рассмотренных выше.

При возникновении структурных повреждений разрушение передается по структурным связям подсистем, от одного поврежденного элемента к другому. Приводя к частичной или полной утрате работоспособности подсистемы, подобные разрушения могут привести к разрушению и всей системы, т. е. к гибели судна.

Рассмотрим структурный граф подсистемы, который будем использовать для построения локального показателя безопасности.

Пусть k -я подсистема судна состоит из N_k элементов. Каждый элемент имеет уровень работоспособности p_s , измеряемый числом от 0 до 1 и сопоставляемый с вероятностью нахождения в работоспособном состоянии. Тогда функция структурной безопасности данного элемента будет описываться функцией:

$$F_{сэ} = p_s. \quad (8)$$

Работоспособность данного элемента, в случае структурного повреждения, будет зависеть от работоспособности смежных с ним, и родительских по отношению к нему, элементов подсистемы.

Для оценки безопасности элемента подсистемы структурного ущерба (0 – полное разрушение, 1 – полная безопасность) предлагается формула:

$$F_{сэ} = 1 - [(\sum_{m \in a_{mn} \neq 0} r_{mn}) + r_n], \quad (9)$$

где r_n – относительное разрушение, вызванное собственными причинами;
 $(\sum_{m \in a_{mn} \neq 0} r_{mn})$ – сумма разрушений, «наведенных» разрушениями других структурно связанных элементов системы. Если величина, стоящая в квадратных скобках превосходит 1, то она принимается равной единице.

Коэффициент r_{mn} определяется по формуле:

$$r_{mn} = k_{mn} r_m, \quad (10)$$

где $k_{mn} > 0$ – коэффициент передачи разрушающего воздействия по структурной связи между m -м и n -м структурными элементами;
 r_m – относительный уровень разрушения m -го элемента.

Для корректности расчета оценок по формуле (9) предполагается, что все функциональные контуры имеют начальные и конечные вершины, т. е. замкнутые кольцевые структуры отсутствуют.

Выполнение судном, как системой, своих функций зависит от работоспособности элементов, входящих в соответствующие функциональные контуры. Для оценки работоспособности j -го контура можно воспользоваться соотношением, соответствующим логике оценки по «самому слабому звену»:

$$F_j = \min_n \{F_{\text{сэп}j}\}, \quad (11)$$

где $F_{\text{сэп}}$ – оценки структурной безопасности элементов, входящих в данный функциональный контур.

Относительный уровень ущерба системы «Судно» в целом, вызванного структурными повреждениями, оценивается как:

$$F_c = 1 - \frac{\sum_{j=1}^J R_j}{J}, \quad (12)$$

где J – общее число функциональных контуров в системе «Судно».

Локальный показатель безопасности для экипажа требует специального рассмотрения. Его можно рассматривать как комбинацию вероятностей неполучения производственной травмы, ненахождения в момент возникновения аварии в аварийном отсеке и т. д. Материалом для создания локального показателя безопасности F_3 может служить отчет [1].

Весовые коэффициенты в свертках локальных показателей безопасности (1) и (2) могут назначаться либо путем экспертного опроса, либо иметь смысл вероятностей возникновения соответствующей аварийной ситуации. В последнем случае они могут быть определены на основе логико-вероятностных методов оценки безопасности сложных технических систем [2].

Предложенная концепция показателя безопасности судна базируется на нормируемых Регистром показателях, расчеты которых общеизвестны. Кроме того, предлагаемый показатель может использоваться на самых ранних стадиях проектирования.

Список литературы

1. Формализованная оценка безопасности // Отчет объединенной рабочей группы MSC/MEPC по человеческому фактору и формализованной оценке безопасности. IMO, MSC 74/WP/19, 2001.

2. Рябинин И.А. Надежность и безопасность структурно-сложных систем. – СПб.: Политехника, 2000. – 248 с.

К ВОПРОСУ ОБ ОБЕСПЕЧЕНИИ ЭФФЕКТИВНОСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ ПЛАВАНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ СУДОВ В АРКТИКЕ

Основой развития арктической экономической зоны Российской Федерации является транзитное плавание грузовых судов по Северному морскому пути (СМП), что обуславливает необходимость разработки программ по повышению эффективности и безопасности его использования в качестве транспортного коридора «Запад – Восток». В работе показано, что способ решения поставленной задачи посредством повышения мощности ледоколов исчерпан, а дальнейшее развитие мореплавания в Арктике лежит в плоскости реализации потенциала человеческого фактора и осуществимо на базе имеющихся в наличии атомных ледоколов при разработке современной тактики проводки транспортных судов во льдах.

Основными параметрами транспортной системы арктического транспортного коридора должны быть непрерывность и скорость хода во льдах при круглогодичной навигации.

Существует несколько подходов к решению этой проблемы. Самый распространенный, лежащий на поверхности, способ – технический, т. е. посредством увеличения размеров и мощности ледоколов и ледокольно-транспортных судов.

В статье «Проблемы ледокольного обеспечения в западной Арктике» [1] на основании опыта экспериментального рейса а/л «Сибирь» и д/э «Капитан Мышевский», проведенного в 1978 г., предложено увеличить мощность гребной электрической установки (ГЭУ) планируемого ледокола-лидера в 4 – 5 раз по сравнению с мощностью ГЭУ на ныне действующих атомоходах типа «Арктика».

Таким образом, мощность ГЭУ нового ледокола должна быть на уровне 200–250 МВт, чтобы обеспечить скорость непрерывной проводки транспортного судна водоизмещением 50000 т в арктических льдах толщиной 1,5 – 2,5 м со скоростью не менее 5 – 6 уз. Ледопроездимость самого ледокола будет составлять при этом не менее 3,5 м.

В монографии «Арктическая морская транспортная система: краткая история и перспективы развития» [2] говорится о том, что советский арктический флот оказался изначально нерентабельным из-за ставки разработчиков только на увеличение мощности ГЭУ.

В соответствии с концепцией развития ледокольного флота, разработанной ЦНИИМФ совместно с ЦКБ «Айсберг», для круглогодичной работы на трассах СМП предлагается проект строительства ледокола-лидера 110Я мощностью ГЭУ 110 МВт и ледопроеходимостью 3,4 – 3,5 м. С помощью математического моделирования движения судов во льдах под проводкой ледокола разработчики построили кривые, иллюстрирующие скорости проводки контейнеровоза ледового класса **Arc7** вместимостью 1500 TEU на маршруте от Карских ворот до Берингова пролива перспективным ледоколом типа ЛК-110Я. Основная задача математического моделирования – показать, что строительство атомоходов нового поколения дает возможность выровнять затраты времени на проводку судов в зимний и летний периоды и увеличить скорость проводки судов в полтора – два раза. Согласно указанным кривым ледокол типа ЛК-110Я гарантирует проводку судна ледового класса **Arc7** в период наибольшего развития ледового покрова (март) со скоростью 12 уз.

Однако, согласно Правилам Регистра, для судов ледового класса **Arc7** предельными ледовыми условиями плавания в каналах за ледоколом в сплошном льду являются: в зимне-весеннюю навигацию – толстый однолетний лед (до 2,0 м); в летне-осеннюю – двухлетний (до 3,2 м); скорость движения в канале – не более 4 уз. При экстремальных условиях навигации, повторяющихся один раз в 10 лет, эксплуатация судов ледового класса **Arc7** в морях Лаптевых, Восточно-Сибирском и Чукотском в зимне-весенний период связана с повышенным риском получения повреждений.

В монографии отмечается, что ледопроежимость перспективных ледоколов указывается только по одному техническому параметру – толщине льда. Однако, понятие «ледопроежимость» – это также способность судна продвигаться в конкретных ледовых условиях. Мерой ледопроежимости в данных ледовых условиях является скорость его движения. Ледопроежимость по толщине льда устанавливается при скорости движения ледокола 1,5 – 2 уз. Экономически же обоснованной минимальной скоростью движения судов во льдах, при обычных массовых перевозках, должна быть скорость не менее 4 – 5 уз.

Скорость движения ледокола во льду зависит не только от толщины льда. Установлено, что при неудовлетворительной видимости

скорость движения ледокола в автономном режиме уменьшается в среднем на 10 %, а при проводке транспортных судов – на 15 %. Значительное влияние на скорость движения во льдах оказывает снежный покров. При высоте снежного покрова более 10 – 12 см снег на льду учитывается как добавочный слой льда, равный высоте снежного покрова. Существенно влияет на снижение технических ледовых скоростей судов сжатие льда.

Альтернативная концепция рационального состава атомных ледоколов четвертого поколения представлена в указанном в монографии [2] докладе С.Н. Климашевского – старшего научного сотрудника ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова на научно-практическом совещании «Гидрометеорологическое обеспечение хозяйственной деятельности в Арктике и замерзающих морях» (март 2002 г.).

Согласно этой концепции, атомные ледоколы XXI века должны соответствовать следующим требованиям:

- обеспечивать проводку в круглогодичной навигации судов перспективной постройки, ширина которых в будущем может увеличиться до 40 м;

- основные характеристики ледоколов (ширина, мощность, ледопроемкость) должны обеспечить работу судов ледового плавания на глубоководных трассах СМП, на прибрежных участках шельфа и в заливах;

- должно быть обеспечено максимальное снижение стоимости атомной энергетической установки (АЭУ) за счет использования реакторов одного типа, выпускаемых серийно;

- круглогодичные транзитные проводки должны выполняться при обязательном научно-оперативном гидрометеорологическом обеспечении.

Новые принципы проектирования обводов и винто-рулевого комплекса ледоколов и ледокольно-транспортных судов, разработанные конструкторами и учеными, позволяют, по мнению автора, уменьшить ледовое сопротивление ледоколов на 25 – 30 % и увеличить на 30 % их ледопроемкость без увеличения мощности ГЭУ.

При выборе реакторов учитывается опыт эксплуатации атомных ледоколов. Он показал высокую надежность работы реакторов на ледоколах типа «Таймыр». Поскольку АЭУ является наиболее дорогостоящим элементом в строительстве и эксплуатации атомных ледоколов, предлагается устанавливать однотипные реакторы на ледоколах разных типов. В частности, на глубоководном – два. Это позволит значительно сократить стоимость строительства и эксплуатации ледоколов.

Мощность АЭУ ледоколов рассчитывалась путем оптимизации сочетания «ширина–ледопроходимость» в системе «ледокол–судно». Оптимальные параметры глубокоосидающего ледокола «Арктика XXI» вдвое большей мощности АЭУ, чем на планируемых к постройке ледоколах типа «Таймыр» оказались равными: ширина – 32 м, ледопроходимость – около 3,2 м.

Впервые за всю историю ледоколостроения обращается внимание на то, что скорость проводки судов по СМП можно повысить благодаря многократно возросшим возможностям научно-оперативного обеспечения. Предлагается не увеличивать мощность ледоколов нового поколения, а использовать научно-технические разработки и опыт эксплуатации ледоколов и за счет более рациональных параметров корпуса уменьшить ледовое сопротивление ледокола и увеличить его ледопроходимость. Однако новизна выводов данной монографии состоит в том, что на непрерывность и скорость хода по СМП основное влияние оказывает не увеличенная мощность ледокола, а выбор судоводителями оптимального пути во льдах в условиях ограниченной видимости.

Влияние работы судоводителей на эффективность и безопасность плавания относится к понятию «человеческий фактор» и определяется тактикой плавания во льдах. Обратимся к определению тактики, сформулированной Н.Г. Бабиным: «Тактика ледового плавания определяется как совокупность методов учета гидрометеорологической (ледовой) информации с целью выбора оптимального пути плавания, а также способов проводки судов и приемов форсирования льда, обеспечивающих наибольшую безопасность и эффективность работы флота при плавании во льдах» [3].

Создание в ГУ «Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт» (АНИИ) Комплекса мониторинга и прогнозирования состояния атмосферы и гидросферы для обеспечения морской деятельности в арктических и замерзающих морях России (АКМОН) позволяет вести непрерывное наблюдение за ледовой поверхностью через искусственные спутники Земли. В результате, помимо традиционного прибрежного (летнего) плавания по СМП, появилась практика плавания высокоширотными и трансарктическими (приполюсный район) маршрутами. В тактическом плане предлагаются пути следования по обширным участкам чистой воды и тонких льдов заприпайных полыней и по трещинам и каналам в ледяных массивах, которые характеризуются новым термином «нарушение сплошности ледового покрова». Применение такого тактического приема позво-

лило д/э «Академик Федоров» в 2005 г. достичь Северного полюса в свободном плавании, а д/э «Норильский никель» работать два года на порт Дудинка без помощи ледоколов. Эффективность использования данных рекомендаций неоченима. Например, в январе 2008 г. д/э «Норильский никель», используя рекомендации Центра ААНИИ, прошел от Енисейского залива до мыса Желания за 36 часов, в то время как атомоход проводил транспорт через Карский массив более трех суток. Этот факт говорит о том, что, пренебрегая тактикой оптимального выбора пути, силой, «напролом» задача дальнейшего развития СМП не решается.

Плавание под проводкой ледокола по разрывам сплошности ледового покрова и полыньям может обеспечить достаточно высокий уровень скорости хода. С точки зрения обеспечения безопасности практические наблюдения показывают, что при движении груженого судна на большой скорости мелкобитый лед под воздействием носовой волны получает вращательные движения в направлении от судна, поэтому соприкосновение со льдом происходит мягко и по касательной, что позволяет в зимнем плавании осуществлять движение на предельной достижимой скорости ледокола. Однако в таком плавании между выбранными ориентированными разрывами сплошности судам приходится пересекать поля сморози различной протяженности. Чтобы обеспечить непрерывность движения в этих льдах, ледокол должен иметь достаточную ледопроходимость, а проводимое судно – иметь возможность самостоятельного безостановочного движения по каналу. Другими словами проводимое судно не должно создавать препятствия ледоколу при прокладке канала, а в некоторых случаях даже помогать. Может ли проводимое судно увеличить ледопроходимость ледокола? Теория, подтвержденная практикой, дает положительный ответ.

На чистой воде у судна в балласте (легкого) скорость больше, чем у судна в грузу (тяжелого). Этот факт не вызывает сомнений. При следовании во льду картина обратная: груженое судно идет лучше, чем судно в балласте.

Понятие «ровный сплошной морской лед» является весьма условным. Даже припайный лед, кроме различий в толщине и прочности, имеет различную высоту снежного покрова на различных по протяженности участках пути судна. По этим причинам движение судна в реальных условиях не является установившимся в классическом смысле этого понятия, а имеет пульсации от равномерного движения к замедленному при преодолении участка с наибольшим сопротивлением, а

затем к ускоренному. Грузное судно тяжелее остановить, поэтому увеличение водоизмещения способствует стабильности движения и увеличению ледопроеходимости.

В феврале 1987 г. т/х «Кола» и т/х «Механик Желтовский», по причине дефицита ледокольной проводки и отсутствия должного количества топлива для ожидания прихода следующего каравана, были вынуждены обратиться к этой теории. Результат превзошел ожидания. Суда в сцепке «тандемом» прошли от Дудинки навстречу каравану 27 миль, прокладывая новый канал в речном льду толщиной 115 см и далее шли безостановочно по свежему каналу до Турушинского переката. На мелководье было решено не рисковать. В подобных ледовых условиях судам СА-15 требуется индивидуальная ледокольная проводка. При ледопроеходимости 1 м, как указано в паспорте судна, скорость т/х «Кола» на чистой воде должна быть 18,2 уз. На момент описываемого события по разным причинам скорость полного хода на чистой воде не превышала 17 уз., значит можно предположить, что ледопроеходимость т/х «Кола» в пресном льду была не более 90 см и в тандеме она увеличилась более чем на 20 %.

В конце 80-х гг. ученые уделили должное внимание вопросам ледопроеходимости тандема. В работе А.Д. Зимина «Оптимизация ледокольно-транспортного комплекса для арктической линии» [4] была предложена методика оценки показателей ходкости в тандеме. Рассчитанное по этой методике значение ледопроеходимости тандема, состоящего из двух ледоколов типа «Москва», оказалось близким к результатам натурных наблюдений (~2,05 м), т. е. паспортная ледопроеходимость ледокола 1,45 м в тандеме увеличилась более чем на 30 %. В книге А.П. Смирнова «Безопасность плавания во льдах» [5] отмечено, что только из-за приращения массы ледопроеходимость у крупных ледоколов увеличивается на 15 – 20 %, что равносильно увеличению мощности на 50 – 70 %. А.Д. Зимин [5] отмечает, что эффективность ледокольной проводки судов способом «тандем» очевидна, однако более широкое использование этого способа затруднено из-за несовершенства корпусных конструкций в оконечностях судов и ледоколов, ненадежности способа сочленения участников тандема, плохой приспособленности буксирного устройства для восприятия значительных нагрузок и, конечно, сложности в управлении сочлененными судами. Для создания транспортной системы ледового плавания, основанной на преимущественном использовании тандема, автор предложил проведение комплекса научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, как по конструкции самого сцепного

устройства, так и по вопросам ходкости, прочности и управляемости судов. С тех пор прошло более 20 лет. Суда проекта СА-15 состарились. В новых экономических условиях судовладельцу, в целях экономии топлива, выгоднее эти суда водить во льдах на буксире, поэтому буксировка стала основным способом ледокольной проводки. Однако буксирное устройство последнего введенного в строй ледокола и архитектура носовой части вновь построенных судов ледового плавания остались прежние. Из морской практики мы знаем, что в случаях, когда традиционное техническое решение проблемы невозможно, способен оказать влияние человеческий фактор, и судоводители в этих случаях вынуждены принимать решения за гранью общепринятого риска. Количество выполненных рискованных действий формирует индивидуальный опыт судоводителя. Длина буксира становится короче, а скорости буксировок возрастают. Если в начале 80-х гг. ледоколы типа «Капитан Сорокин» в припае Енисея водили суда серии «Дмитрий Донской» на буксире 70 м, а затем – 50 м, то в настоящее время, по имеющимся сведениям, некоторые капитаны ледоколов типа «Таймыр» проводят суда проекта СА-15 уже на дистанции 3 м. Ими замечено, что на такой дистанции касание транспортом кормового кранца ледокола происходит без инерции и ледокол не теряет управляемости, как это происходит в тандеме с судном большего, чем ледокол водоизмещения.



Проводка т/х «Кола» атомным ледоколом «Вайгач» в припае р. Енисей, 29 марта 2005 г.



Проводка т/х «Варзуга» атомным ледоколом «Вайгач» в припае р. Енисей, 6 мая 2007 г.

На рисунках хорошо видно, что в тугом канале из тертого льда этот способ ледокольной проводки будет наиболее эффективным. При проводке лидированием скорость будет меньше, остановки на поворотах потребуют частых оенок потому, что в тертом льду очень трудно разогнать судно до устойчивого движения. Увеличение длины буксира приведет к прессованию струями ледокола льда в районе скул судна (в районе перехода в цилиндрическую вставку) и значительно увеличит ледовое сопротивление. На коротком буксире ледовое сопротивление значительно уменьшается, т. к. носовая часть судна омывается струями ледокола. Уменьшение ледового сопротивления позволяет ледоколу иметь в запасе мощность на преодоление ледовых пробок.

Эффект от этого способа буксировки очевиден, но он, помимо умения и слаженности работы судоводителей двух судов, требует большого напряжения и концентрации внимания на всех параметрах совместного движения. В динамичной обстановке даже кратковременные переключения внимания на посторонние объекты и явления ведут к частичной или полной потере ориентировки и, как следствие, к ошибкам. Процесс судовождения становится более опасным. Для повышения безопасности ледокольной проводки необходимо, по возможности, максимально автоматизировать работу судоводителей, сведя ее к выполнению функций контроля и установки параметров движения.

Для рассматриваемого способа буксировки – это возможность из ходовой рубки регулировать длину буксирной линии под натяжением и автоматически удерживать проводимое судно на заданной дистанции путем его подтормаживания, т. е. задавать судну движение без инерции.

Статистика аварий устанавливает влияние человеческого фактора в 75 – 80 % всех случаев, где выбранная капитаном скорость следования является важнейшим из условий безопасного плавания. В большинстве случаев столкновений судов капитанов обвиняют в том, что заданная скорость движения была не безопасной. Фактически все сводится к умению судоводителя вовремя погасить инерцию судна. При плавании на чистой воде принято, что самый эффективный способ торможения – это дача полного заднего хода. Но даже в этом случае груженое судно среднего водоизмещения с дизельным двигателем проходит до полной остановки порядка двух километров. У дизель-электрохода время реверса меньше, а на судах с винтом регулируемого шага эффективно используют торможение без дачи заднего хода. Для уменьшения скорости на телеграфе устанавливается самый минимальный шаг. В этот момент резко ухудшается управляемость судна и рулевой старается удержать судно на курсе большими перекладками руля. Когда судно перестает реагировать на переложный на борт руль, дается толчок кратковременным увеличением шага винта, а по достижению нужной скорости устанавливается шаг, соответствующий этому ходу. В данном случае торможение осуществляется винтом и рулем одновременно.

В отличие от чистой воды лед является более эффективной средой для торможения, поэтому судоводители при плавании за ледоколом широко используют методы торможения скольжением скулой или зарезанием кромки канала. Конечно основное сопротивление движению судна будет оказывать мелкобитый лед в канале, но следует также учитывать и тормозящий эффект от струй винтов при приближении к корме ледокола.

При автоматическом учете вышеперечисленных факторов судоводитель может задавать скорость движения не манипуляцией машинным телеграфом, а назначением характера относительного перемещения судов. Использование лазерных дальномеров, цифровых радиолокаторов, приемоиндикаторов ГНСС, АИС и др. систем определения скорости позволяет с большой точностью определять параметры взаимного перемещения, а создание системы управления движительным комплексом не от режимов машинного телеграфа, а от заданной скорости, как считают специалисты, трудностей не вызывает.

Практика плавания во льдах ледокольно-транспортных судов с высокой ледопроеходимостью формировалась в 80-е гг., но по разным причинам не была обобщена. В настоящее время для получения положительного экономического эффекта судоводители вынуждены идти на риск, используя новые тактические приемы ледокольных проводок в условиях не совсем удовлетворительного технического состояния флота и отсутствия кадровой политики, связанной с неопределенностью принадлежности ледокольного флота. Сложное положение судоводителей также усугублено тем, что при использовании новых тактических приемов, их действия во многих случаях входят в противоречие с действиями, прописанными в старой, официально принятой практике. По указанным причинам опыт применения эффективных тактических приемов, представляющий собой практику работы целого поколения судоводителей в период наибольшего развития СМП, носит сугубо индивидуальный характер и может быть окончательно утерян без действенной поддержки государства.

Подводя итоги вышесказанного, приходим к выводу о том, что дальнейшее развитие СМП зависит от человеческого фактора, и для реализации его потенциала предлагается:

- разработать требования РМРС по отображению ледовой обстановки в ближней зоне на экране РЛС;

- провести исследование гидродинамического взаимодействия корпуса судна со льдом при его движении на больших скоростях;

- создать математическую модель сближения судов в ледовом канале без инерции с использованием различных способов притормаживания проводимого судна;

- автоматизировать процесс управления винто-рулевым комплексом для заданного сближения судна с ледоколом в ледовом канале;

- для скоростного прохода трасс СМП и повышения ледопроеходимости в тандеме разработать конструкцию устройства сочленения транспортного судна с ледоколом;

- усовершенствовать буксирные лебедки ледоколов в целях проводки крупнотоннажных судов на коротком буксире;

- пересмотреть действующую Практику плавания во льдах;

- на базе новой тактики плавания во льдах создать и утвердить программу (включая тренажерную) подготовки судоводителей на годность к ледовому плаванию;

- для подготовки будущих специалистов арктического флота на судоводительских факультетах морских и речных учебных заведений ввести специализацию «Плавание во льдах».

Программа реализации потенциала человеческого фактора для обеспечения эффективной и безопасной эксплуатации СМП не требует больших временных затрат, а возможность использования имеющегося флота и кадрового ресурса позволит сэкономить государству значительные финансовые средства.

Список литературы

1. Нестеров Н. Проблемы ледокольного обеспечения в западной Арктике // Морской флот. – № 5. – 2007.
2. Бенземан В.Ю., Комендантов В.Н., Шматов В.А. Арктическая морская транспортная система: краткая история и перспективы развития // Аналитический обзор / Под общ. ред. д.т.н. Шматкова В.А. – СПб.: ООО «Типография Бланк Издат», 2004. – 94 с.
3. Бабич Н.Г. Вопросы тактики плавания во льдах в западном секторе Арктики. Методические рекомендации судоводителям. – М.: ЦРИА «Морфлот», 1982. – 124 с.
4. Зимин А.Д. Оптимизация ледокольно-транспортного комплекса для арктической линии // Диссертация на к.т.н. ЦНИИ А.Н. Крылова. – 1988.
5. Смирнов А.П. и др. Безопасность плавания во льдах. – М.: Транспорт, 1993. – 335 с.
6. Цой Л.Г., Горшковский А.Г. Ледокольный флот России нуждается в обновлении // Морской вестник. – № 4 (4). – 2002.
7. Шацбергер Э.М. О тактике плавания во льдах // Сборник научных статей «Эксплуатация морского транспорта». – № 3 (49). – СПб.: ГМА им. адм. С.О. Макарова, 2007. – С. 29 – 38.
8. Шацбергер Э.М. О прибыльности Северного морского пути в транзитном плавании / Северный морской путь: состояние проблемы, перспективы // Сб. научных трудов. – СПб.: РГО, СЗНИИ Наследия, 2007. – С. 67 – 83.

В.М. Кузавков, В.П. Егоров, В.П. Рыдловский, В.В. Штайц

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА НОРМ ЛОКАЛЬНОГО КОНТРОЛЯ ГЕРМЕТИЧНОСТИ СОЕДИНЕНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ ГЕРМЕТИЧНОГО КОНТУРА ЗАЩИТНЫХ ОБОЛОЧЕК СУДОВ И ПЛАВУЧИХ СООРУЖЕНИЙ С АТОМНОЙ ПАРОПРОИЗВОДЯЩЕЙ УСТАНОВКОЙ

Защитная оболочка (ЗО) является третьим барьером безопасности, первой корпусной конструкцией атомного судна, которая предназначена при аварийных ситуациях для удержания выбросов радиоактивных веществ в смежные отсеки и окружающую среду в установленных проектной документацией пределах. В этой связи вопросы обеспечения герметичности соединений элементов герметичного контура (ЭГК) оболочки, особенно на этапах проектирования, являются актуальными и требуют постоянного совершенствования.

Герметичный контур (ГК) ЗО представляет, условно, замкнутую поверхность конструкции, на которой расположены элементы и соединения элементов, которые должны являться при эксплуатации (с учетом вероятной аварии) герметичными в пределах, заданных требованиями проекта для всей конструкции. Составляющими ЭГК ЗО являются: листы полотнищ, детали корпусного насыщения, трубопроводы, системы и их отдельные элементы (клапаны, приборы контроля, соединения и т. п.), верхнее закрытие, двери, горловины, кабельные вводы. Перечисленные элементы представляют общую локализирующую систему, предназначенную для удержания в предусмотренных проектом пределах радиоактивных веществ, образующихся в объеме оболочек при эксплуатации и при вероятных авариях.

Номенклатура соединений (уплотнений) указанных ЭГК приведена на рис. 1.

В конструкторской документации, соответственно составу этих соединений, должны быть указаны требования к их герметичности (нормы герметичности). При назначении этих требований необходимо учитывать, что разъемные (запорные) узлы арматуры и устройств (приборов), не сообщающихся с воздушным объемом оболочки, не являются элементами ее герметичного контура (по определению ГК).



Рис. 1
Номенклатура соединений ЭГК

Методика классификации соединений по принципам принадлежности к ГК может быть рассмотрена на примере схемы, приведенной на рис. 2.

В варианте (а) ГК оболочки совпадает с ГК системы трубопроводов, устройств и приборов, которая выполняет свое функциональное назначение с определенными параметрами эксплуатационной среды и является герметичной по отношению к внутреннему объему оболочки. В варианте (б) первый запорный клапан является ЭГК оболочки.

Обеспечить требуемую степень герметичности ЗО без радикальных конструктивных изменений существующих конструкций верхнего основного закрытия, дверей и групповых кабельных вводов не представляется возможным.

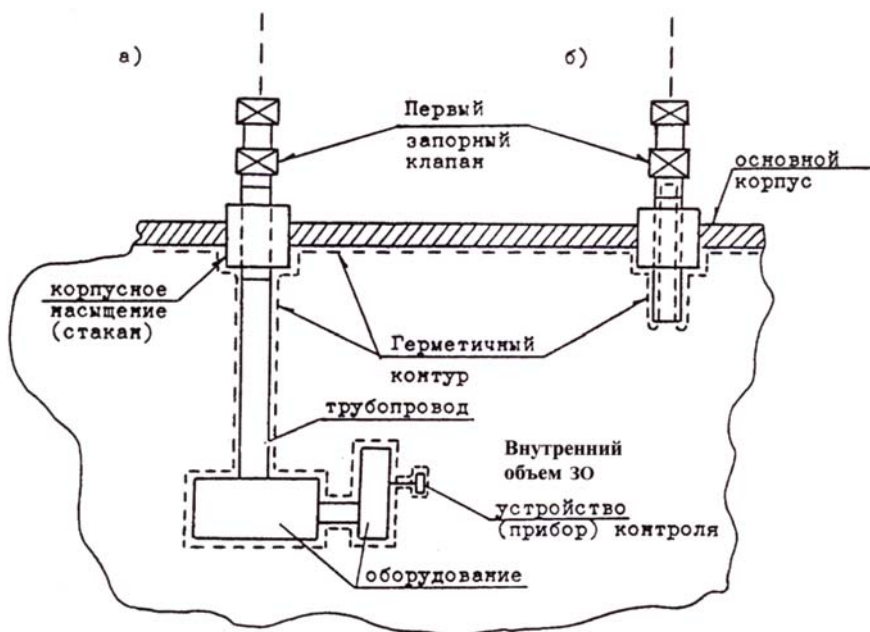


Рис. 2
Варианты ГК трубопроводов, пересекающих корпус ЗО

В связи с этим заслуживает рассмотрения принятый для ЗО атомного лихтеровоза-контейнеровоза «Севморпуть» вариант конструкции верхнего основного закрытия (рис. 3), представляющий комбинированное уплотнение (разъемное – резиновое, сварное), позволившее полностью исключить утечки воздуха из оболочки при ее интегральных испытаниях на герметичность. Использование в этом соединении контрольной полости 3 позволило вести периодический контроль герметичности закрытия при его эксплуатации.

Положительные практические результаты описанного конструктивного решения привели к тому, что в настоящее время разработаны конструкции групповых кабельных вводов, имеющих контрольные полости для проведения локального контроля герметичности уплотнения кабеля.

Применение в составе ЗО круглых переборочных дверей подводных лодок также позволит значительно повысить степень герметичности оболочек атомных судов. Для локального контроля уплотнений

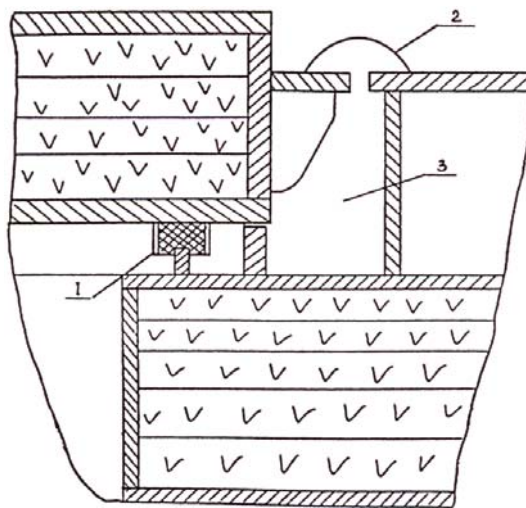


Рис. 3

Схема разъемного узла уплотнения
основного прочноплотного закрытия ЗО «Севморпуть»:

- 1 – разъемный узел герметизации; 2 – сварной узел герметизации;
3 – контрольная полость (устройство обжатия закрытия условно не приведено)

дверей можно использовать проработки ЦКБ «Балтсудопроект», в которых предусматривается контроль герметичности уплотнений с применением съемных камер. С целью осуществления этого метода по контуру двери на полотнищах защитной оболочки со стороны атмосферы устанавливались шпильки для монтажа камеры «по-штатному» (рис. 4).

Наиболее вероятными местами утечек из ЗО являются устройства прохода кабелей, которые проходят через стенку ЗО и включают рассчитанные на очень небольшую мощность коаксиальные приборные линии, проводку систем регулирования, силовые трассы для энергопитающего оборудования внутри ЗО и, в некоторых случаях, высоковольтные кабели. При передаче электроэнергии через стенку ЗО иногда возникает дополнительное требование, чтобы были сведены к минимуму индукционные токи в стальной плите или в стальной армировке ЗО.

Практика показывает, что потеря герметичности, выражающаяся в утечках через проходы электрических кабелей, может произойти через любую из перечисленных ниже неплотностей, образующихся:

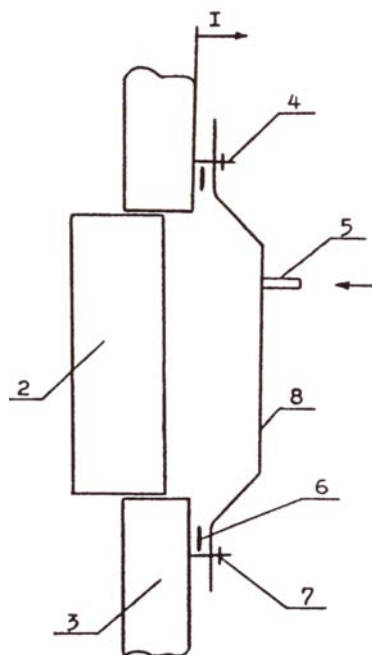


Рис. 4

Принципиальная схема локального контроля уплотнения дверей:

- 1 – внутренний объем оболочки; 2 – дверь; 3 – полотнище оболочки; 4 – шпилька;
5 – штуцер для подачи сжатого воздуха; 6 – специальная прокладка (уплотнение);
7 – гайка; 8 – съемная камера (кожух)

между жилами многожильных кабелей;

между кабелем и его изоляцией;

в изоляции или оболочке кабеля, либо между изоляцией и материалом оболочки кабеля;

между изоляцией или оболочкой и герметизирующим, уплотнительным или наполнительным материалом;

в герметизирующем, уплотнительном или наполнительном материале;

между наполнительным материалом и установленной в ЗО плитой, трубопроводом или какой-либо другой поверхностью.

Использование кабелей без поперечной герметизации, с целью ввода их в герметичный контур ЗО, недопустимо. Как показали экс-

периментальные работы на опытной конструкции одного из судостроительных заводов, применение такого кабеля, например, марки РК-75-4-22, приводит к дополнительным утечкам, величина которых составляет до 10 % от общей утечки, допускаемой для ЗО лихтеровоза-контейнеровоза «Севморпуть».

При изготовлении кабеля проверяют на стойкость к воздействию гидростатического давления. В процессе проверки допускаются протечки воды по продольному сечению кабелей. Таким образом, хотя кабель считается герметизированным в продольном направлении, он все же допускает некоторые протечки воды.

Утечки воздуха (испытательной среды для ЗО) будут еще более значительными, что требует дополнительной экспериментальной проверки. Поэтому необходимо подобрать из существующих марок кабеля, изоляция и оболочка которых сможет обеспечить их функционирование и герметичность проходов в аварийном режиме: давление 0,5 МПа, температура 135 °С – в течение 24 ч.

До последнего времени при проектировании проходов кабелей в ЗО атомных судов и плавучих сооружений применяют судовые герметизированные кабели и кабельные уплотнительные коробки, для которых в технических условиях нормируют только протечки воды (непроницаемость) и не оговаривают протечки воздуха или парогазовой смеси (герметичность). Указанные ЭГК разрабатывались для нужд оборонного комплекса и не предназначались для применения в ЗО атомных судов.

Однако, с повышением требований к герметичности ЗО атомных судов и плавучих сооружений назрела необходимость введения в нормативно-техническую документацию норм герметичности кабелей и устройств уплотнения проходов кабелей или проводников, а также стала актуальной задача разработки методов испытания на герметичность этих ЭГК в условиях максимальной проектной аварии (МПА).

Методы испытаний на герметичность должны применяться при разработке или корректировке технических условий на кабели судовые герметизированные и устройства уплотнения проходов кабелей или проводников, которые используются для прохода через ЗО АППУ судов или плавучих сооружений. Кроме того, методы испытаний могут быть использованы проектантом или судостроительным предприятием, которые хотят применить те или иные кабели и устройства их уплотнения на основе проведенных испытаний на герметичность.

При разработке методов испытаний принято, что максимальное количество кабелей, проходящих через ЗО, не должно превышать

1000 штук, а максимальное число устройств уплотнения проходов кабелей или проводников не должно превышать 15 штук.

Для установления нормы герметичности на кабели, используемые на ЗО, проведем расчеты, приняв следующие консервативные допущения:

микродефект – гладкий цилиндрический канал;

парогазовая смесь (аварийная среда) не конденсируется в канале микродефекта;

атмосферное давление постоянно во времени.

В расчете принимаем данные табл. 1, регламентирующей протечки воды в продольном направлении через кабель типа КРНГ-60 с 37 жилами см. [1].

Регламентируемая протечка через такой кабель составляет 500 см^3 за 2 ч ($G_b = 7,0 \cdot 10^{-5} \text{ кг/с}$) нагрузки при избыточном давлении $P_b = 6,0 \text{ МПа}$ (60 кгс/см^2). Считаем, что средняя длина такого кабеля $\ell_k = 15 \text{ м}$ (конструктивная) и $\ell_{\text{и}} = 2 \text{ м}$ (испытательная).

Таблица 1

Число жил	Номинальное сечение жилы, мм ²	Протечка воды за 2 часа, см ³	
		КРНГ-60	КРНЭГ-60
1	1,5 – 50	100	100
1	70 – 185	300	300
1	240 – 300	500	500
2	1,5 – 10	300	300
2	16 – 95	350	350
3	1,5 – 35	300	300
3	50 – 95	350	350
4 – 19	1,5; 2,5	300	300
24 – 33	1,5; 2,5	500	500
37	1,5; 2,5	500	500

По формуле Хагена-Пуазейля [2] определяем радиус канала микродефекта, через который регламентируется протечка воды при испытаниях:

$$r = \left(\frac{8 \cdot G_b \cdot \eta_b \cdot \ell_{\text{и}}}{\pi \cdot \rho_b \cdot P_b} \right)^{0,25} = 1,0 \cdot 10^{-4} \text{ м}, \quad (1)$$

где r – радиус канала микродефекта, м;

G_b – массовый секундный расход воды, кг/с;

η_b – динамическая вязкость воды, $\eta_b = 1,74 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$;

$\rho_{\text{в}}$ – плотность воды, $\rho_{\text{в}} = 1 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$;
 $\ell_{\text{и}}$ – длина канала микродефекта (испытательная), $\ell_{\text{и}} = 2 \text{ м}$;
 $P_{\text{в}}$ – избыточное давление гидравлических испытаний, $P_{\text{в}} = 6,0 \text{ МПа}$.

Далее определяем величину потока воздуха по каналу микродефекта ($r = 1,0 \cdot 10^{-4} \text{ м}$) длиной $\ell_{\text{к}} = 15 \text{ м}$ при давлении $P_{\text{МПА}} = 0,5 \text{ МПа}$ ($5,0 \text{ кгс/см}^2$):

$$Q_{\text{г}} = \frac{0,196 \cdot r^4 \cdot (P_{\text{МПА}}^2 - P_{\text{А}}^2)}{\eta_{\text{г}} \cdot \ell_{\text{к}}} = 1,7 \cdot 10^{-2} \text{ Вт}, \quad (2)$$

где $Q_{\text{г}}$ – поток воздуха по каналу, Вт;
 $P_{\text{МПА}}$ – давление воздуха при МПА, Па;
 $P_{\text{А}}$ – атмосферное давление, $P_{\text{А}} = \text{const} = 1 \cdot 10^5 \text{ Па}$;
 $\eta_{\text{г}}$ – динамическая вязкость воздуха, $\eta_{\text{г}} = 1,81 \cdot 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{с}$;
 $\ell_{\text{к}}$ – длина канала микродефекта (конструктивная), $\ell_{\text{к}} = 15 \text{ м}$.

Норма герметичности для такого кабеля определяется из следующего выражения:

$$\epsilon = Q_{\text{г}} \cdot \frac{P_{\text{а}}^2}{(P_{\text{МПА}}^2 - P_{\text{А}}^2)} = 1,7 \cdot 10^{-4} \text{ Вт}. \quad (3)$$

Согласно классификации по [3] величина $\epsilon = 1,7 \cdot 10^{-4} \text{ Вт}$ относится к V классу герметичности.

Величину потока воздуха через кабель при стендовых испытаниях на параметры МПА определяем из следующего выражения:

$$Q_{\text{г}}^{\text{с}} = \frac{0,196 \cdot r^4 \cdot (P_{\text{МПА}}^2 - P_{\text{А}}^2)}{\eta_{\text{г}} \cdot \ell_{\text{и}}} = 1,3 \text{ Вт}. \quad (4)$$

Допустим, что свободный объем станда $V, \text{ м}^3$, тогда за $\tau = 15 \text{ мин}$ контроля давление в стенде уменьшится из-за утечки воздуха через канал дефекта с $r = 1,0 \cdot 10^{-4} \text{ м}$ и $\ell_{\text{и}} = 2 \text{ м}$ на величину:

$$\Delta P = (Q_{\text{г}}^{\text{с}} \cdot \tau) / V = 117 / V \text{ Па}, \quad (5)$$

тогда масса воздуха, прошедшего через сечение кабеля:

$$\Delta m = (\Delta P \cdot \mu) / (R \cdot T) = 1,0 \cdot 10^{-3} \text{ кг}, \quad (6)$$

где Δm – масса воздуха, прошедшего через сечение кабеля, кг;
 μ – молярная масса воздуха, $\mu = 29$ кг/кмоль;
 R – универсальная газовая постоянная, $R = 8314$ Дж/кмоль·К;
 T – температура воздуха при МПА, $T = 408$ К.

Количество воздуха, прошедшего через сечение кабеля, в объемных единицах составит величину:

$$\Delta V = \Delta m / \rho = 0,8 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 = 800 \text{ см}^3, \quad (7)$$

следовательно, если кабель опущен в воду, на его торце будут образовываться воздушные пузыри.

Определим, какой вклад в суммарный допустимый поток на весь ГК ЗО вносят утечки через 1000 таких кабелей:

$$Q_r^k = Q_r \cdot 1000 = 17 \text{ Вт}. \quad (8)$$

Для ЗО ПЭБ пр. 20870 – это 43 % от общего допустимого потока на весь ГК, поэтому считаем необходимым на два порядка снизить норму герметичности на кабели, используемые на конструкциях ГК ЗО.

С учетом формулы (3) и [3] принимаем норму герметичности на кабель $\epsilon = 10^{-6}$ Вт, продолжительность наблюдения за образованием пузырька – 15 мин. Тогда с учетом формул (5)–(7) в течение контроля на наружном торце кабеля будет постепенно образовываться воздушный пузырек и к концу 15 мин наблюдения его объем составит величину $\Delta V = 0,14 \text{ см}^3$, и он (пузырек) не всплывет. Это условие должно быть принято как условие достаточной герметичности испытываемого кабеля. Способ контроля показан на рис. 5.

Расчеты показали, что утечек аварийной среды по кабелям с нормой герметичности 10^{-6} Вт практически не ожидается. Этот вывод подтверждается следующими расчетами.

Поток воздуха через кабель с нормой герметичности $\epsilon = 10^{-6}$ Вт при давлении $P_{\text{МПА}}$ согласно формуле (3), составит величину:

$$Q_r = \epsilon \cdot \frac{P_{\text{МПА}}^2 - P_A^2}{P_A^2} = 2,4 \cdot 10^{-5} \text{ Вт}. \quad (9)$$

Изменение давления в ЗО из-за утечки воздуха за 24 ч аварии через кабель, с учетом формулы (5), составит:

$$\Delta P = (Q_r^c \cdot \tau) / V = \frac{0,21 \cdot 10^{-3}}{V} \text{ Па/м}^3. \quad (10)$$

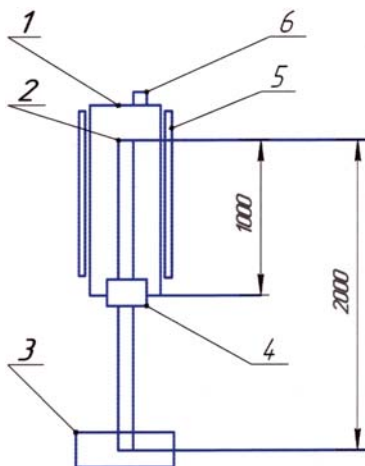


Рис. 5

Схема испытания на продольную герметичность судовых герметизированных кабелей:

- 1 – устройство для создания повышенного давления воздуха; 2 – кабель;
- 3 – емкость с водой; 4 – уплотнительная система кабеля в устройстве;
- 5 – нагревательный элемент; 6 – штуцер для подвода рабочей среды

Масса воздуха, вышедшего за пределы ЗО, объемом V , с учетом (6), составит:

$$\Delta m = (\Delta P \cdot V \cdot \mu) / (V \cdot R \cdot T) = 1,8 \cdot 10^{-9} \text{ кг}. \quad (11)$$

Тогда ΔV с учетом формулы (7) составит величину $1,4 \cdot 10^{-3} \text{ см}^3$ воздуха через один кабель. Утечка за 24 ч через 1000 шт. кабелей $\Delta V = 1,4 \text{ см}^3$.

Поток воздуха через 1000 таких кабелей составляет:

$$Q_k^r = Q_r \cdot 1000 = 2,4 \cdot 10^{-2} \text{ Вт}. \quad (12)$$

Для ЗО ПЭБ пр. 20870 – это 0,1 % от общего допускаемого потока на весь ГК.

Расчет нормы герметичности устройств проходов кабелей или проводников проведем с учетом указанных выше допущений. За пороговую чувствительность средств контроля герметичности устройств проходов кабелей или проводников принимаем величину $\epsilon = 4,6 \cdot 10^{-3}$ Вт. Тогда поток газа через одно устройство при давлении МПА составит:

$$Q_r = \epsilon \cdot \frac{P_{\text{МПА}}^2 - P_A^2}{P_A^2}. \quad (13)$$

Примем для дальнейших расчетов $P_{\text{МПА}} = 0,5$ МПа и $P_A = 0,1$ МПа, тогда $Q_r = 0,11$ Вт. Используя выражения (5)–(7), определяем объемный расход воздуха в минуту через устройство $\Delta V = 43$ см³/мин при температуре на входе в канале микродефекта 135 °С.

Для контроля на стенде необходимо принять более жесткие требования к герметичности устройства, так как условия работы на штатном месте монтажа устройств значительно сложнее. Принимая во внимание возможность образования протечек из-за прогрева уплотнений, необходимо поставить условие недопустимости образования всплывающих воздушных пузырей за 15 мин контроля, когда устройство находится под давлением $P_{\text{МПА}}$ при температуре атмосферного воздуха. На последней минуте 24-часовой выдержки устройства в условиях, имитирующих МПА, необходимо допустить образование до 15 пузырей воздуха в минуту из следующих соображений. Принимая объем всплывающего пузыря $V_n = 0,3$ см³, определяем допустимое количество пузырей воздуха, если $\Delta V = 43$ см³/мин:

$$n = \Delta V / V_n = 143 \text{ шт/мин}. \quad (14)$$

С десятикратным запасом в безопасную сторону следует принять $n_d \leq 15$ шт/мин.

Эта величина коррелируется с ранее предложенной [7] нормой утечки $\Delta V = 0,5$ л/сут на устройство кабельных вводов.

Способ контроля герметичности устройств проходов кабелей или проводников показан на рис. 6.

С учетом эксплуатационного назначения к конструкции ЗО предъявляют требования, ограничивающие проникновение аварийной среды за пределы ее ГК. В настоящее время в судостроении и атомной энергетике таким ограничительным параметром является допускае-

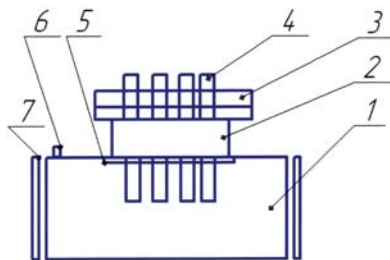


Рис. 6

Схема испытания на герметичность

устройств уплотнения прохода кабелей и проводников:

- 1 – камера для создания повышенного давления и температуры воздуха;
 2 – устройство уплотнения прохода кабелей или проводников; 3 – обечайка с водой;
 4 – кабели или проводники; 5 – уплотнительная система; 6 – штуцер для подвода рабочей среды, 7 – нагревательные элементы

мая относительная скорость утечки воздуха – L , %/сут, которая определяется выражением:

$$L = \frac{24}{\tau} \cdot \frac{m_0 - m_1}{m_0} \cdot 100, \quad (15)$$

где m_0 – начальная масса воздуха внутри конструкции, кг;

m_1 – масса воздуха в конструкции по прошествии времени τ , кг;

τ – продолжительность контроля, ч;

24 – коэффициент, определяющий суточную величину расхода воздуха;

100 – нормировочный множитель для перевода в проценты.

Так как параметры m_0 и m_1 не измеряют, относительная скорость утечки может быть представлена через измеряемые параметры: абсолютное давление в конструкции, температура воздуха и продолжительность контроля:

$$L = \frac{24 \cdot 10^3}{\tau} \left(1 - \frac{P_1 T_0}{P_0 T_1} \right), \quad (16)$$

где P_0 и P_1 – давление в начале и в конце испытаний, Па;

T_0 и T_1 – температура воздуха в начале и в конце испытаний, К;

τ – продолжительность контроля, ч.

Если $L = L_d$, $P_0 = P_{\text{МПА}}$, $\tau = 24$ ч – заданные в проекте величины, допускаемое изменение давления в ЗО при испытаниях можно с учетом (16) определить из следующих выражений:

$$P_1 = \frac{P_{\text{МПА}} \cdot T_1 (2,4 \cdot 10^3 - L_d \tau)}{2,4 \cdot 10^3 \cdot T_0}; \quad (17)$$

$$\Delta P_d = P_{\text{МПА}} - P_1, \quad (18)$$

где ΔP_d – допускаемое изменение давления в ЗО за заданное время, Па.

Для изделий и конструкций с требованиями, допускающими газовые перетоки через течи, суммарную степень герметичности принято определять потоком проникающего через ГК воздуха по [3], в нашем случае:

$$Q_d = (\Delta P_d \cdot V) / \tau, \quad (19)$$

где Q_d – суммарный допускаемый поток воздуха через (микродефекты) ГК ЗО, м³Па/с (Вт);

ΔP_d – допускаемое изменение давления в ЗО за заданное время, Па;

V – объем ЗО, м³;

τ – время, в течение которого изменяется давление на величину ΔP , с.

Нормой герметичности для ЗО будет являться величина течи, определяемая потоком воздуха в стандартных условиях:

$$\epsilon_\Sigma = Q_d \cdot \frac{P_A^2}{P_{\text{МПА}}^2 - P_A^2}, \quad (20)$$

где ϵ_Σ – величина суммарной течи (норма герметичности), Вт;

$P_{\text{МПА}}$ – абсолютное, заданное в проекте, давление воздуха, по величине равное давлению при МПА, Па;

P_A – атмосферное давление, Па ($P_A = \text{const}$).

В документах [5] и [6] указано, что в проектной документации на каждый ЭГК должны быть указаны допускаемые утечки (потоки) при расчетном давлении. Такого требования в Правилах РМРС [7] нет. Хорошим примером численного задания норм герметичности по ЭГК является конструкторская документация на тамбур-шлюзы ПЭБ пр. 20870 [8], где для каждого элемента указана величина допускаемой

утечки, как в единицах потока $\text{м}^3\text{Па/с}$ (Вт), так и в единицах объемной утечки л/сут.

Считаем, что норму герметичности следует задавать не по допускаемому потоку воздуха при расчетном давлении ($P_{\text{МПА}}$), а по потоку воздуха в стандартных условиях по формуле (20), что позволит определять поток воздуха через ЭГК при заданных в технологическом процессе на испытания элемента величинах давления $P_{\text{и}}$:

$$Q_i = \epsilon_i \cdot \frac{P_{\text{и}}^2 - P_{\text{А}}^2}{P_{\text{А}}^2}, \quad (21)$$

где Q_i – поток воздуха через ЭГК при давлении испытаний $P_{\text{и}}$, Вт;

ϵ_i – норма герметичности на ЭГК, Вт;

$P_{\text{и}}$ – абсолютное давление испытаний, Па.

С учетом номенклатуры соединений ЭГК (рис. 1), принимаем следующие экспертные соотношения в распределении нормы герметичности ϵ_{Σ} по соединениям и количеству ЭГК:

сварные соединения – $0,05 \epsilon_{\Sigma}$;

разъемные соединения – $0,32 \epsilon_{\Sigma}$;

фланцевые соединения – $0,18 \epsilon_{\Sigma}$;

запорная арматура трубопроводов, сообщающихся с испытываемым воздушным объемом и являющаяся узлом герметизации ГК – $0,19 \epsilon_{\Sigma}$;

устройства уплотнения кабельных вводов – $0,21 \epsilon_{\Sigma}$;

продольное сечение кабелей – $0,05 \epsilon_{\Sigma}$.

Зная протяженность сварных соединений ГК ЗО ($\ell_{\text{св}}$), разъемных соединений ($\ell_{\text{рс}}$), фланцевых соединений ($\ell_{\text{фс}}$), количество запорной арматуры на трубопроводах, сообщающихся с воздушным объемом ЗО ($n_{\text{ЗА}}$), количество устройств уплотнения кабельных вводов ($n_{\text{КВ}}$) и количество кабелей ($n_{\text{КК}}$), можно задать норму герметичности на ЭГК:

$$\epsilon_{\text{св}} = 0,058 \epsilon_{\Sigma} / \ell_{\text{св}}; \quad \epsilon_{\text{рс}} = 0,32 \epsilon_{\Sigma} / \ell_{\text{рс}}; \quad \epsilon_{\text{фк}} = 0,19 \epsilon_{\Sigma} / \ell_{\text{фс}};$$

$$\epsilon_{\text{ЗА}} = 0,18 \epsilon_{\Sigma} / n_{\text{ЗА}}; \quad \epsilon_{\text{КВ}} = 0,21 \epsilon_{\Sigma} / n_{\text{КВ}}; \quad \epsilon_{\text{КК}} = 0,05 \epsilon_{\Sigma} / n_{\text{КК}}$$

с размерностью, соответственно, Вт/м; Вт/м; Вт/м; Вт/ед; Вт/ед; Вт/ед.

На отдельные элементы, имеющие разъемные и фланцевые соединения, норма герметичности устанавливается из выражений:

$$\epsilon_i = \ell_i \cdot \epsilon_{pc} \quad (23)$$

$$\epsilon_j = \ell_j \cdot \epsilon_{фс} \quad (23)$$

где ϵ_i – норма герметичности на ЭГК, Вт;
 ℓ_i – периметр соединения в ЭГК, м;
 ϵ_{pc} и $\epsilon_{фс}$ – норма герметичности на 1 м разъемного и фланцевого соединения, Вт/м.

Численное задание норм герметичности в конструкторской документации на каждый ЭГК позволяет при проведении стендовых испытаний и локальном контроле герметичности при эксплуатации ЗО АППУ устанавливать нормы испытаний на каждый элемент.

В качестве примера приведен расчет норм испытаний на герметичность клапана затопления (запорная арматура) и верхнего закрытия (разъемное соединение). Считаем, что эти испытания проводятся до монтажа этих элементов на защитной оболочке (стендовые или предварительные испытания).

Герметичность клапана затопления контролируется на стенде с объемом V надувом воздухом. Начальное абсолютное давление воздуха – $P_{и}$. Продолжительность выдержки клапана под давлением $\tau = 1$ ч. Допускаемое изменение начального давления рассчитывают в следующей последовательности:

определяют допускаемый поток воздуха через возможные микродефекты соединений клапана при давлении $P_{и}$, с учетом формул (21) и (22):

$$Q_{кз} = \epsilon_{зА} \cdot \frac{P_{и}^2 - P_{А}^2}{P_{А}^2}; \quad (25)$$

определяют допускаемое изменение давления в объеме стенда:

$$\Delta P = (Q_{кз} \cdot \tau) / V. \quad (26)$$

Герметичность верхнего люкового закрытия контролируется на стенде объемом V . Длина разъемного соединения – $\ell_{зс}$. Начальное абсолютное давление испытаний – $P_{и}$. Продолжительность выдержки под давлением – τ . Допускаемое изменение начального давления рассчитывают в следующей последовательности:

определяют норму герметичности закрытия, с учетом формул (22) и (23):

$$\epsilon_3 = \ell_{pc} \cdot \epsilon_{pc}; \quad (27)$$

определяют допускаемый поток воздуха через возможные микро-дефекты соединений закрытия, с учетом формулы (21):

$$Q_3 = \epsilon_3 \cdot \frac{P_{\text{И}}^2 - P_{\text{А}}^2}{P_{\text{А}}^2}; \quad (28)$$

определяют допускаемое изменение давления в объеме стенда:

$$\Delta P = (Q_3 \cdot \tau) / V. \quad (29)$$

Заключение

В отечественном и зарубежном производстве применяют конструкции, герметичность которых является определяющей для обеспечения их надежности и экологической безопасности. Примером таких конструкций являются ЗО АППУ.

Параметрами, определяющими норму герметичности на ГК ЗО и на отдельные ЭГК, являются допускаемая относительная скорость утечки « $L_{\text{д}}$ » и величина абсолютного давления аварийной среды при МПА « $P_{\text{МПА}}$ ».

В статье приведен расчетный переход от указанных проектных параметров к численно задаваемым норме герметичности на ГК ЗО « ϵ_{Σ} » и норме герметичности на отдельных ЭГК « $\epsilon_{\text{г}}$ ». Нормы герметичности определены величиной допускаемого потока в стандартных условиях – поток воздуха из атмосферы в вакуум в единицах $\text{м}^3\text{Па/с}$ (Вт). Величина потока определяет размер допускаемого микродефекта и является для данной конструкции постоянной величиной в диапазонах возможных давлений испытания.

Накопленный опыт проектирования, строительства и эксплуатации конструкций ЗО по вопросам их герметичности позволяет задать экспертные соотношения в распределении нормы герметичности « ϵ_{Σ} » по соединениям и количеству ЭГК. При проектировании на базе предложенной методики расчета норм герметичности необходимо проводить численное задание норм герметичности для каждого ЭГК и вносить эти нормы в технические требования конструкторской документации.

При разработке проходов кабелей в ЗО атомных судов и плавучих сооружений применяют судовые герметизированные кабели и

устройства их уплотнения, для которых в технических условиях нормируют только протечки воды и не оговаривают протечки воздуха или парогазовой смеси. Существует необходимость использования в конструкциях ЗО кабелей и устройств их уплотнения, испытанных на герметичность на параметры аварийной среды, и установления нормы герметичности для этих ЭГК, а также предложены способы испытаний кабелей и устройств уплотнения проходов кабелей или проводников.

Список литературы

1. ТУ 16.К71-106-90. Кабели и провода силовые и контрольные судовые герметизированные.
2. Л о й ц я н с к и й Л. Г. Механика жидкости и газа. – М.: Наука, 1987.
3. ОСТ5Р.0170-80 Контроль неразрушающий. Металлические конструкции. Газовые и жидкостные методы контроля герметичности.
4. ЛКИБ.3210-235-2006. Разработка предложений по уточнению и дополнению нормативных документов Российского морского регистра судоходства в части требований к герметичности защитных оболочек АППУ // Отчет о НИР. – 2006.
5. Правила устройства и эксплуатации локализирующих систем безопасности атомных станций. ПНАЭГ-10-021-90 (утратили силу с 1999 г.)
6. Правила устройства и эксплуатации локализирующих систем безопасности атомных станций НП-010-98 // Госатомнадзор РФ.
7. Правила классификации и постройки атомных судов и плавучих сооружений. – СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2004.
8. Плавучий энергоблок (Проект 20870). Тамбур-шлюзы. Расчет утечек через неподвижные уплотнения. № АНЦШ 455.00.00.00.000 РР1 // ОАО «ВНИИАМ», 2007.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ РИСКА К АНАЛИЗУ ЭКСПЛУАТАЦИИ СУДОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР

Введение

В настоящее время широкое распространение получили методы управления проектными рисками. Интерес к этой проблематике появляется в разных областях промышленности и бизнеса. Процесс управления проектными рисками позволяет учитывать влияние различных факторов, которые могут негативно воздействовать на текущие ситуации в проектах. Так, например, в бизнесе с рисками ассоциируют неожиданные изменения на финансовых рынках и политические решения правительства, негативно влияющие на экономическую конъюнктуру. Как финансовые, так и проектные риски могут привести не только к непредвиденным расходам и существенно снизить планируемую прибыль, но могут повлечь за собой необратимые последствия катастрофического характера. В литературе по управлению рисками имеется целый ряд серьезных научных публикаций, из которых укажем фундаментальные работы [1 – 3].

Методы управления проектными рисками нашли применение и в судостроении в связи с необходимостью эксплуатации судов в экстремальных условиях [4 – 6]. Сложность рассматриваемой проблемы связана, кроме всего прочего, с недостатком статистической информации об отказах устройств и оборудования судна, а также их элементов, вследствие воздействия низких температур. В связи с дефицитом статистической информации, за рубежом получила распространение методика оценки рисков, которая носит название Formal Safety Assessment (FSA). Суть этой методики заключается в том, что оценка рисков и последующее управление ими осуществляется на основе экспертной информации. Методы анализа экспертной информации на протяжении многих десятилетий служат основой принятия управленческих решений во многих задачах, возникающих в различных облас-

тях промышленности. Существует обширная литература, посвященная анализу экспертной информации, из которой отметим публикации [7 – 10].

В большинстве работ на эту тему предполагается, что эксперты задают некоторое упорядочение объектов в соответствии со степенью выраженности некоторого свойства [11]. Подобное предположение позволяет применить статистические методы анализа ранговых данных, включая коэффициенты ранговой корреляции, коэффициент конкордации и т. д. Однако следует отметить, что экспертная информация, получаемая по методике FSA, носит принципиально другой характер. В результате работы эксперты назначают определенные баллы, а не определяют упорядочение объектов. В связи с этим, традиционные методы ранговой статистики не подходят для анализа такого рода экспертной информации. В рамках методики FSA предложена некоторая общая схема, позволяющая определить коэффициенты рисков для устройств судна, эксплуатируемого в экстремальных условиях.

В нашей работе предлагается конкретная модификация методики FSA для решения задачи оценки рисков и управления рисками при разработке требований для присвоения судну дополнительных символов класса **WINTERIZATION(–40)** и **WINTERIZATION(–50)**.

Опыт технического наблюдения РС за разработкой проекта арктического челночного танкера проекта P-70046, строящегося на ФГУП «Адмиралтейские Верфи» на совместный класс РС и LR, показал, что наибольшее значение для обеспечения безопасной эксплуатации судна при низких температурах имеет правильный выбор материалов. При этом если для корпусных конструкций в Правилах РС имеются необходимые и конкретные указания, то для компонентов оборудования, устройств и механизмов, устанавливаемых на открытых палубах, такие требования, в большинстве случаев, отсутствуют, или являются недостаточно конкретными.

В частности, для поковок и отливок ответственного назначения, работающих при температурах $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ и ниже, в Правилах имеются указания (см. 3.5.3.2 и 3.5.4.2 части XIII «Материалы») относительно права Регистра потребовать подтверждения отсутствия склонности кованой и литой стали к хрупким разрушениям путем проведения соответствующих испытаний. При этом вопрос, какие компоненты относятся к ответственным, остается открытым и является предметом специального рассмотрения. Такая ситуация существенно затрудняет для судостроителя процедуру выбора пос-

тавщика судового оборудования, а также техническое наблюдение со стороны Классификационного общества за его изготовлением и испытаниями.

Следует также отметить, что на настоящий момент подавляющее большинство поставщиков судового оборудования не имеют на свои изделия каких-либо сертификатов, подтверждающих работоспособность при температурах – 40 °С и ниже (определенное исключение составляет только оборудование средств навигации и связи, которое должно испытываться на работоспособность при температуре – 40 °С). При этом отсутствие в правилах Классификационных обществ конкретных требований по данному вопросу не позволяет осуществлять работу с поставщиками оборудования и судостроительными верфями на основе единой нормативной базы.

Исходя из изложенного, представляется необходимым конкретизировать требования к материалам для изготовления компонентов оборудования, устройств и механизмов, устанавливаемых на открытых палубах, а также к объему их испытаний на предприятии-изготовителе и на судостроительном заводе. При этом объем дополнительных требований не должен быть чрезмерным, в противном случае применение дополнительных символов класса **WINTERISATION** может повлечь за собой неоправданные затраты как судовладельца, так и судостроителя.

В данной работе предлагается использовать для определения номенклатуры объектов технического наблюдения, наиболее подверженных риску повреждения под воздействием низких температур, метода, основанного на Принципе разумно осуществимого уровня риска, определенного в части XV «Оценка безопасности ПБУ/МСП» Правил классификации, постройки и оборудования ПБУ и МСП. Суть метода состоит в построении для каждого объекта матрицы риска на основе классификации последствий возможной опасности и частоты ее возникновения. Ниже изложен предлагаемый подход к построению матрицы риска применительно к рассматриваемой проблеме.

Анализ экспертной информации

Основными этапами применения теории рисков согласно методике FSA к анализу эксплуатации судов в рамках развития требований РС к судам, предназначенным для длительной эксплуатации в условиях низких температур, являются:

определение возможных опасностей при работе судна при температурах – 40 °С и ниже;

анализ собранных экспертных оценок по специально разработанным анкетам с целью определения коэффициента риска для каждого устройства судна, подвергнутого экспертному оцениванию;

определение устройств повышенного риска и способов управления рисками для них;

стоимостный анализ мероприятий по уменьшению риска для устройств повышенного риска;

рекомендации для принятия решений по управлению рисками.

Далее изложим описание работ, проведение которых необходимо по каждому из этапов, сформулированных выше.

1 Определение возможных опасностей при работе судна при температурах – 40 °С и ниже

Степень риска выхода из строя компонентов судового оборудования предлагается оценить путем простановки экспертами соответствующих баллов по двум критериям.

1.1 Вероятность выхода из строя компонента под воздействием низких температур (табл. 1):

Таблица 1

Частота	Краткая характеристика	Балл
Крайне маловероятная	Выход из строя компонента под воздействием низких температур возможен только вследствие исключительных обстоятельств (как правило, вследствие грубых нарушений технологии или качества его изготовления)	1
Маловероятная	Компонент, если он не изготовлен из специальных материалов, соответствующим образом испытанных и сертифицированных, как правило, не выходит из строя при воздействии низких температур	2
Умеренно вероятная	Компонент, если он не изготовлен из специальных материалов, соответствующим образом испытанных и сертифицированных, изредка выходит из строя при воздействии низких температур	3
Высокая	Компонент, если он не изготовлен из специальных материалов, соответствующим образом испытанных и сертифицированных, как правило, выходит из строя при воздействии низких температур	4

1.2 Последствия выхода из строя компонента (табл. 2):

Таблица 2

Последствия	Краткая характеристика	Балл
Несущественные	При выходе из строя компонента повреждение легко и своевременно идентифицируется и может быть быстро устранено путем замены соответствующего компонента из ЗИП или ремонта в судовых условиях без снижения безопасности эксплуатации судна и его использования по основному назначению	1
Малозначительные	При выходе из строя компонента повреждение может быть идентифицировано только при его использовании, но может быть достаточно быстро устранено в судовых условиях без длительного снижения безопасности эксплуатации судна и его использования по основному назначению	2
Значительные	При выходе из строя компонента повреждение может быть идентифицировано только при его использовании и не может быть устранено в судовых условиях без вывода судна из эксплуатации; для ликвидации аварийной ситуации могут быть предприняты своевременные меры обеспечения безопасности	3
Катастрофические	При выходе из строя компонента повреждение может быть идентифицировано только при его использовании, при этом за короткий промежуток времени возникает реальная опасность аварии судна или экологической катастрофы	4

При этом может быть применена разбивка объектов, подвергающихся воздействию низких температур, на отдельные компоненты согласно Приложению I к части I «Общие положения по техническому наблюдению» Правил технического наблюдения за постройкой судов и изготовлением материалов и изделий для судов.

2 Анализ собранных экспертных оценок по специально разработанным анкетам с целью определения коэффициента риска для каждого устройства судна, подвергнутого экспертному анализу

Второй этап включает в себя обработку анкетных данных, полученных от экспертов на первом этапе. Результатом обработки анкет должны стать вероятности, характеризующие частоту возникновения отказа изучаемого устройства, а также вероятности тяжести последствий отказа каждого устройства по трем характеристикам влияния на окружающую среду и судно.

На данном этапе могут быть использованы различные методики получения необходимой информации. Представляется целесообразной реализация нескольких методик для получения альтернативных результатов и последующего выбора наиболее подходящей методики. Работа этого этапа может быть в свою очередь разделена на несколько составляющих.

2.1 Определение коэффициентов риска для устройств и оборудования судна, подверженного воздействию низких температур.

Основная задача, решаемая в рамках второго этапа, заключается в агрегировании вероятностей (относительных частот), появляющихся в результате анализа экспертной информации, в коэффициент риска отказа каждого рассматриваемого устройства. Здесь возможны различные подходы к агрегированию, практическая реализация каждого из них позволит выбрать наиболее подходящий подход. Например, можно умножать относительные частоты на соответствующие им баллы и производить суммирование. Фактически речь идет о вычислении доли набранных баллов по отношению к максимально возможному количеству баллов. Вычисленную характеристику можно рассматривать как вероятность P_i отказа i -го устройства $P_i (i = 1, \dots, m)$, если анализируются данные о возможной частоте отказов или как вероятность C_i тяжести последствий отказа устройства. С математической точки зрения данная процедура означает вычисление математического ожидания специальным образом выбранной случайной величины, значения которой представляют собой относительные баллы: 1/4; 2/4; 3/4; 4/4. Разумеется, могут быть выбраны другие варианты задания относительных баллов, что приведет к другим значениям коэффициентов P_i и C_i , сохраняя относительный порядок величин. Окончательный выбор того или иного варианта возможен в процессе анализа экспертной информации.

Кроме того, возможны различные способы агрегирования вычисленных коэффициентов в коэффициент риска устройства:

а) коэффициент риска i -го устройства $R_i (i = 1, \dots, m)$ может определяться по формуле:

$$R_i = P_i \cdot C_i$$

где P_i – вероятность отказа i -го устройства судна;
 C_i – вероятность тяжести последствий.

б) коэффициент риска для i -го устройства $R_i (i = 1, \dots, m)$ может определяться по формуле:

$$R_i = P_i + C_i - P_i \cdot C_i$$

где R_i – вероятность отказа i -го устройства судна;
 C_i – вероятность тяжести последствий.

Обе формулы для расчета коэффициентов риска могут быть применены на практике, но они имеют важное содержательное различие. При использовании первой формулы, коэффициент риска может получиться большим (близким к единице) только в том случае, когда и вероятность отказа устройства и вероятность тяжести последствий близки к единице. С математической точки зрения первая формула соответствует вероятности совместного осуществления двух независимых событий. Если один из множителей в формуле близок к единице, а второй близок к нулю, то коэффициент риска окажется небольшим, то есть, устройство не будет рассматриваться как устройство высокой степени риска. В этом случае может произойти потеря, возможно, важной информации.

Вторая формула позволяет учесть отмеченный недостаток первой. С математической точки зрения вторая формула соответствует вероятности объединения двух независимых событий. Используя вторую формулу можно получить довольно высокий коэффициент риска, если вероятность отказа устройства большая или вероятность тяжести последствий высока даже при условии, что другая вероятность близка к нулю, тем более коэффициент риска окажется большим, если обе вероятности велики. Однако, если одна из двух вероятностей, в результате анализа экспертной информации окажется равной единице, то коэффициент риска примет максимально возможное значение равное единице независимо от значения другой вероятности, что тоже вызывает сомнения с точки зрения правильности оценки рисков. Возможно, будет целесообразно использовать разные формулы для различных устройств, выбор формулы для расчета коэффициента риска для конкретного устройства может обсуждаться с экспертами.

Можно определить целое семейство коэффициентов риска для i -го устройства по формуле:

$$R_i = \alpha_i R_i^1 + (1 - \alpha_i) R_i^2$$

где $\alpha_i \in [0, 1]$ – некоторый параметр;
 R_i^1 – коэффициент риска i -го устройства, вычисленный по первой формуле;
 R_i^2 – коэффициент риска i -го устройства, вычисленный по второй формуле.

Если $\alpha_i = 0$, то коэффициент риска i -го устройства R_i совпадает с коэффициентом риска R_p^2 , вычисленным по второй формуле. Если $\alpha_i = 1$, то коэффициент риска i -го устройства R_i совпадает с коэффициентом риска R_p^1 , вычисленным по первой формуле. Вопрос о правиле выбора значения весового параметра α_i может быть решен в процессе обработки результатов анкетирования специалистов.

2.2 Определение обобщенной оценки вероятностей отказа устройств судна и величины тяжести последствий отказа устройств по трем характеристикам влияния на окружающую среду и судно.

Возможны также разные подходы, связанные с тем, что последствия отказа могут оцениваться по разным характеристикам влияния. Целесообразно, по-видимому, вначале построить три коэффициента риска для каждой из характеристик влияния для каждого устройства в отдельности, а далее рассмотреть вопрос о возможности построения обобщенного коэффициента риска для каждого из устройств. На данном этапе работы может быть проверена согласованность мнений экспертов одним из методов кластерного анализа с последующим разделением экспертов на группы согласованности.

После нахождения коэффициентов риска и определения матрицы рисков возникает возможность ранжирования изучаемых устройств по степени опасности с возможностью оценки степени доминирования рисков одних устройств над рисками других с точки зрения их опасности. Полученные результаты нуждаются в экспертном анализе для проверки адекватности проведенного анализа в целом, экспертный анализ может быть проведен более узким кругом специалистов, в результате чего возможна вторая итерация анализа исходной экспертной информации с целью получения лучше интерпретируемых данных.

3 Определение устройств повышенного риска и способов управления рисками устройств повышенного риска

Устройства судна, попавшие в область повышенного риска, нуждаются в дальнейшем изучении. Группа экспертов должна определить стратегии (мероприятия) по уменьшению рисков устройств, попавших в зону повышенного риска.

4 Стоимостный анализ мероприятий по уменьшению риска устройств повышенного риска

Четвертый этап предполагает анализ всех ранее полученных данных с целью нахождения наиболее рациональных путей снижения рисков с учетом экономических возможностей. В принципе, предпоч-

тения заслуживают такие варианты управления рисками, которые при относительно небольших затратах приводят к заметному уменьшению коэффициентов рисков устройств.

После определения мероприятий по уменьшению риска устройств повышенного риска, необходимо определить их стоимость. Например, i -ое устройство имеет коэффициент R_i , который находится в зоне повышенного риска. Стоимость мероприятий по устранению риска, определенную экспертами, обозначим через ΔS_i . После проведения мероприятий необходимо пересчитать коэффициент риска. Обозначим коэффициент риска этого устройства судна после проведения мероприятий как R'_i . Обозначим $\Delta R_i = R_i - R'_i$ величину, на которую уменьшился коэффициент риска.

Мерой целесообразности, выбранного экспертами мероприятия по уменьшению риска i -го устройства судна, могут служить два различных коэффициента:

а) коэффициент $GCAF$ (Gross Cost of Averting a Fatality), который вычисляется по формуле:

$$GCAF_i = \Delta S_i / \Delta R_i;$$

б) коэффициент $NCAF$ (Net Cost of Averting a Fatality), который вычисляется по формуле:

$$NCAF_i = (\Delta S_i - \Delta E_i) / \Delta R_i = GCAF_i - \Delta E_i / \Delta R_i,$$

где ΔE_i – прибыль, полученная при устранении риска (например, стоимость устраненного загрязнения).

Выбор коэффициента зависит от мнения экспертов. Если следовать методологии FSA, то в каждой отрасли принимается некоторое верхнее пороговое значение для коэффициентов $GCAF$ и $NCAF$. Если рассчитанное значение коэффициента $GCAF$ или $NCAF$ для некоторого устройства меньше порогового значения, то мероприятие по уменьшению риска принимается. В противном случае – не принимается.

5 Рекомендации для принятия решений по управлению рисками

Пятый этап работы включает составление отчета о проделанной работе и перечислению возможных мероприятий по уменьшению рисков устройств судна.

Заключение

В работе предложен подход к анализу экспертной информации в рамках развития требований РС к судам, предназначенным для длительной эксплуатации при воздействии низких температур. Подробно обсуждаются этапы выполнения предлагаемой программы, выявляются моменты, допускающие различные подходы к обработке информации, предлагаются возможные решения.

Список литературы

1. Dale F. Cooper, Stephen Grey, Geoffrey Raymond, Phil Walker. Project Risk Management Guidelines Managing Risk in Large Projects and Complex Procurements, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2005.
2. Cooper, D. F. and Chapman, C. B. Risk Analysis for Large Projects: Models, Methods and Cases. Chichester, UK: John Wiley & Sons, 1987.
3. Guide for Risk Evaluations for the Classification of Marine-related Facilities, New York, 2003.
4. Решетов Н.А., Захаров А.А. Формализованная оценка безопасности (ФОВ) и ее влияние на судоходную индустрию // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – 2004. – Вып. 27. С. 7. –13.
5. IACS FSA Training Course, Management Module, Formal Safety Assessment, Prepared by: IACS PT/FSA Training Course, Authors: Peter Securius (GL), Rolf Skjong (DNV), 2000.
6. Ayyub B.M., Beach J.E., Sarcam S., Assakkaf I.A. Risk Analysis and Management for Marine Systems, Naval Engineers Journal, Volume 114, Number 2, Spring 2002, pp. 181 – 206(26).
7. Литвак Б.Г. Экспертная информация. Методы получения и анализа. – М.: Радио и связь, 1982.
8. Литвак Б.Г. Экспертные технологии в управлении. – М.: Дело, 2004.
9. Павлов А.Н., Соколов Б.В. Методы обработки экспертной информации. – СПб.: Изд-во ГУАП, 2005.
10. Бешелев С.Д., Гурвич Ф.Г. Математико-статистические методы экспертных оценок. – М.: Статистика, 1980.
11. Евенко В.И., Захаров А.А., Литонов О.Е. Оценка эффективности метода Делфи в комплексной системе безопасности при освоении континентального шельфа // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – 2005. – Вып. 28. – С. 20 – 31.

В.И. Евенко, Д.А. Грубов, В.Н. Тряскин

РАЗВИТИЕ ТРЕБОВАНИЙ РОССИЙСКОГО МОРСКОГО РЕГИСТРА СУДОХОДСТВА К СУДАМ, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫМ ДЛЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ В УСЛОВИЯХ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР

Введение

В последнее десятилетие ИМО, МАКО и ведущие Классификационные общества проявляют большую активность в разработке и совершенствовании Правил и руководств для судов, предназначенных для эксплуатации в полярных водах Арктики и Антарктики. Такая активность объясняется двумя группами факторов: развитием освоения морских месторождений углеводородов в районе Сахалина и в Баренцевом море, а также вовлечением в сферу полярного судоходства новых судоходных и судостроительных компаний. На втором факторе следует остановиться более подробно.

Еще двадцать лет назад строительство судов, предназначенных для эксплуатации в ледовых условиях, было сосредоточено, в основном, в трех регионах: Советский Союз, Европа (в первую очередь Финляндия) и, в меньшей степени, Канада. Построенные суда эксплуатировались ограниченным числом судоходных компаний, которые, наравне с судостроителями, накопили громадный опыт в области проектирования, строительства, наблюдения и эксплуатации применительно к судам ледового плавания. В таких условиях действовавшие Правила Классификационных обществ содержали достаточный объем требований для обеспечения технического наблюдения.

Ситуация кардинально изменилась, когда центр транспортного судостроения начал перемещаться в Южную Корею и Китай. Судостроительные компании этих стран не имели (и часто не имеют до сих пор) опыта проектирования и строительства судов полярных классов. Кроме того, в борьбу за рынки перевозок углеводородов и обслуживания морских нефтепромыслов в районах Сахалина и Арктики включились крупнейшие судоходные компании, которые ранее эксплуатацией судов ледового плавания не занимались. Таким образом, возникла объективная необходимость обобщения и передачи накопленного опыта

в области полярного судоходства и судостроения путем разработки интегрированных «прозрачных» требований к таким судам [1].

Первым шагом на пути разработки таких требований стало принятие Руководства для судов, эксплуатирующихся в покрытых льдом водах (Руководство) [2].

Руководство имеет рекомендательный статус и состоит из 16 глав, объединенных в 4 части:

часть А «Конструктивное обеспечение» – содержит требования к конструкции корпуса, остойчивости и непотопляемости, расположению помещений и путей эвакуации, рулевым и подруливающим устройствам, якорному и буксирному устройствам, главным двигателям, вспомогательным механизмам и электрическому оборудованию;

часть В «Оборудование» – содержит требования к противопожарной защите, спасательным средствам и навигационному оборудованию;

часть С «Эксплуатация» – содержит требования по наличию на судне соответствующих руководств для подготовки экипажа и аварийному снабжению;

часть D «Защита окружающей среды и контроль повреждений».

Таким образом, Руководство является интегрированным документом, объединяющим требования, как к конструкции судна, так и к обеспечению его безопасной эксплуатации. При этом требования Руководства распространяются только на Арктический район, в который не входит, в частности, значительная часть Баренцева моря к западу от полуострова Канин, а также Белое море.

В 2004 г. на XXVII Консультативной встрече участников Конвенции об Антарктике (ATCM) в Кейптауне была предпринята попытка распространить действие Руководства на антарктические воды, однако, вследствие «деликатного статуса суверенитета Антарктики» [3] и связанных с этим юридических проблем, эта попытка не удалась, и формально требования Руководства до сих пор распространяются только на арктические воды.

Несмотря на то, что Руководство не стало и, скорее всего, не станет обязательным инструментом ИМО, большинство членов МАКО приступили к разработке и актуализации собственных Правил и Руководств, содержащих требования к судам, эксплуатирующимся в условиях низких температур, и дополняющих Унифицированные требования МАКО к судам полярных классов I1, I2 и I3. В этот период в судостроительную практику вошел английский термин «**Winterisation**», дословно означающий «подготовка (оборудования) к эксплуатации в зимних условиях». В дальнейшем этот термин будет нами применяться

ся для обозначения комплекса конструктивных и эксплуатационных мероприятий, обеспечивающих возможность эксплуатации судна в условиях низких температур.

Правила и Руководства классификационных обществ по «**Winterisation**» включают, помимо собственных требований, многие положения Руководства с присвоением судну, удовлетворяющему требованиям, соответствующего символа класса. При этом Lloyd's Register в своих правилах фактически придал Руководству статус обязательного инструмента [4], введя в них требование об удовлетворении применимых требований Руководства с выдачей соответствующего письменного подтверждения.

В настоящее время разработаны и вступили в силу следующие правила и руководства:

American Bureau of Shipping. Guide for vessels operating in low temperature environments, 2006. Символы класса **CCO-HR(TEMP)**, **CCO-HR(TEMP)+**;

Det Norske Veritas. Rules for Classification of Ships, 2008, Pt.5 Ch.1 Sec.6. Символы класса **WINTERIZED BASIC**, **WINTERIZED COLD (t1, t2)**, **WINTERIZED ARCTIC (t1, t2)**;

Lloyd's Register of Shipping. Provisional Rules for the Winterisation of Ships, 2006. Символы класса **Winterization H(T)**; **Winterization A(T)** или **B(T)**, или **C(T)**; **Winterization D(T)**;

Bureau Veritas. Rules for the Classification of Steel Ships, 2008, Pt.E, Ch.10, Sec. 11. Символ класса **COLD (H t_{DH}, E t_{DE})**.

При этом до настоящего времени отсутствуют построенные суда, на которых требования вышеуказанных символов класса выполнялись бы в полном объеме, то есть опыт практического применения правил отсутствует или незначителен. Не исключено, что танкер P-70046, который строится согласно требованиям LR для дополнительного символа класса **Winterization D(-40)**, будет первым судном с документально подтвержденным классом по «**Winterisation**».

Анализ действующих правил и руководств иностранных Классификационных обществ по «**Winterisation**», а также опыт технического наблюдения за проектированием и постройкой арктического челночного танкера проекта P-70046, строящегося на совместный класс РС и LR с дополнительным символом класса LR **Winterization D(-40)**, показали, что объем требований к судам ледового плавания, содержащихся в действующих Правилах Регистра, является недостаточным и не охватывает все аспекты приспособленности судна к длительной эксплуатации при низких температурах.

Поэтому планом работ по расширению классификационной символики Регистра, утвержденным 1 февраля 2008 г., предусмотрена разработка дополнительных требований Регистра по «**Winterisation**» с введением соответствующих дополнительных символов класса.

Общий подход Регистра к разработке требований по «Winterisation»

В результате анализа, выполненного членами Рабочей группы по расширению классификационной символики, требования «**Winterisation**» было предложено разделить на два блока:

- требования к оборудованию судна средствами для защиты от обледенения;

- требования к конструкции судна и его оборудованию и системам для обеспечения длительной эксплуатации при низких температурах.

Такое разделение было принято, исходя из того, что обледенению подвергаются и суда, не имеющие ледового класса и не предназначенные для эксплуатации в Арктике и Антарктике, поэтому защита от обледенения является самостоятельной частью проблемы «**Winterisation**». Аналогичный подход применен Det Norske Veritas, предъявляющем отдельные требования к средствам борьбы с обледенением (знаки группы **DEICE**) и собственно к «**Winterisation**» (знаки группы **WINTERIZED**).

При разработке концепции требований по «**Winterisation**» Регистр исходил из следующих базовых принципов обеспечения конкурентоспособности правил и их привлекательности для заказчика:

- реализация требований по «**Winterisation**» не должна приводить к чрезмерному увеличению строительной стоимости судна;

- требования должны давать судовладельцу и судостроителю определенную свободу способов их реализации, исходя из особенностей эксплуатации судна и финансовых возможностей заказчика;

- требования Регистра должны обеспечивать эквивалентную (или большую) безопасность эксплуатации судна по сравнению с аналогичными требованиями других Классификационных обществ;

- требования Регистра должны содержать только конкретные требования к конструкции судна и его оборудованию, выполнение которых может быть проверено при одобрении документации, а также при осуществлении технического наблюдения за постройкой судна и изготовлением материалов и оборудования для него;

правила Регистра должны включать минимальный объем эксплуатационных требований к судну, необходимых проектанту или строителю для разработки соответствующих руководств по эксплуатации.

Технические требования по оборудованию судов на соответствие знаку **ANTI-ICE** в символе класса, содержащие требования к средствам для защиты от обледенения, разработаны Регистром и включены в Правила классификации и постройки морских судов изд. 2008 г. в виде самостоятельного раздела части XIX «Дополнительные знаки символа класса и словесные характеристики, определяющие конструктивные или эксплуатационные особенности судна».

Разработка технических требований по оборудованию судов для обеспечения их эксплуатации в условиях низких температур (знак **WINTERIZATION(DAT)** в символе класса) потребовала выполнения научно-исследовательской работы, которая должна быть завершена до конца года.

Ниже приводятся состав и краткое описание разработанных и разрабатываемых технических требований.

Технические требования по оборудованию судов средствами для защиты от обледенения

При разработке Требований учитывались:

требования документов ИМО: Циркуляра MSC/Circ.1056/MEPC/Circ.399 от 23 декабря 2002 г. и Кодекса безопасности рыбаков и рыболовных судов [5];

требования Правил и Руководств ABS, DNV, LR и BV;

опыт эксплуатации судов и применения указанных правил, изложенный в технической и справочной литературе [6, 7, 8];

опыт технического наблюдения за проектированием и постройкой арктических челночных танкеров пр. Р-70046.

Построение требований основано на трех базовых определениях.

1. Предотвращение обледенения – исключение образования льда на судовых конструкциях и оборудовании. Для предотвращения обледенения могут использоваться обогрев или применение постоянных или съемных защитных укрытий.

2. Борьба с обледенением – удаление льда, выросшего на корпусе судна, судовых конструкциях и оборудовании. Для борьбы с обледенением, кроме обогрева, могут использоваться размыв и растапливание льда, применение противообледенительных жидкостей или ручных механических средств.

3. Защита от обледенения – комплекс конструктивных и организационных мероприятий, направленных на уменьшение обледенения и снижение трудозатрат, связанных с удалением льда в процессе эксплуатации судна. Таким образом, защита от обледенения включает в себя не только два предыдущих понятия, но и определенные эксплуатационные мероприятия, в частности наличие на судне одобренного Руководства по защите от обледенения.

Разработанные Требования состоят из четырех глав, содержащих дополнительные требования к:

- архитектурно-конструктивному типу судна;
- составу технической документации судна в постройке, представляемой на одобрение;
- конструкции наружных трапов, площадок, наружных дверей, иллюминаторов, лацпортов и иных закрытий;
- конструкции и/или размещению палубных механизмов и спасательных средств;
- аварийному снабжению;
- конструкции сточных, вентиляционных, противопожарных, систем; приведена номенклатура арматуры и измерительных устройств, подлежащих обогреву при их установке на открытых палубах;
- конструкции электрического оборудования, сигнальных средств, радио и навигационного оборудования;
- испытаниям средств защиты от обледенения и составу отчетной документации.

Судну в постройке или эксплуатации, удовлетворяющему Требованиям, может быть присвоен дополнительный знак **ANTI-ICE** в символе класса.

Требования к конструкции судна и его оборудованию и системам для обеспечения длительной эксплуатации при низких температурах

Указанные требования находятся в стадии разработки, поэтому ниже приводятся краткие результаты первого этапа НИР.

Анализ действующих Правил Регистра в отношении «**Winterisation**» показал, что они, в большинстве случаев, составлены, исходя из обеспечения длительной работы оборудования при температуре –25 °С (см. в частности 2.3 части VII «Механические установки»; 2.1.1 части XI «Электрическое оборудование»; 2.1.1 части XV «Автоматизация» Правил классификации и постройки морских судов) [9]. Для спа-

сательных средств регламентируется требование к обеспечению их хранения при температуре $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ (см. 6.1.1.2 части II «Спасательные средства» Правил по оборудованию морских судов), но ничего не сказано об обеспечении их работоспособности при указанной температуре. Для грузоподъемных средств имеются только общие положения относительно выбора категории стали для их конструкций в зависимости от температуры окружающей среды. Лишь для радио- и навигационного оборудования введено указание относительно обеспечения его работоспособности при температуре $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ (см. 5.1.20 части IV «Радиооборудование» и 5.1.2 части V «Навигационное оборудование» Правил по оборудованию морских судов). При этом, согласно Правилам, испытания электрооборудования, устанавливаемого на открытых палубах, должны выполняться при температуре $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$, а испытания оборудования автоматизации и кабельных изделий – при $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ (разд. 10 и 12 части IV «Техническое наблюдение за изготовлением изделий» Правил технического наблюдения за постройкой судов и изготовлением материалов и изделий для судов).

Определение расчетной температуры воздуха для выбора материалов и оборудования может базироваться на различных подходах. Правила иностранных классификационных обществ, за исключением ABS, предусматривают возможность назначения различных расчетных температур для корпуса и оборудования.

Так, по правилам LR для выбора материалов корпуса в качестве расчетной температуры должна использоваться «*lowest mean daily average air temperature*» для предполагаемого района эксплуатации, при этом «*lowest*» означает минимальную температуру в течение года, «*mean*» означает среднюю температуру не менее, чем за 20 лет наблюдений, «*average*» означает среднесуточную температуру. Это определение соответствует определению «*design temperature t_D* » согласно УТ МАКО S6.

В качестве расчетной температуры для оборудования по правилам LR используется другая величина: «*lowest mean daily lowest air temperature*», то есть не осредненная за сутки, а минимальная в течение суток. По данным LR эта температура приблизительно на $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ниже, чем осредненная за сутки.

Таким образом, для самого высокого класса «**Winterisation**» по правилам LR для материала корпуса должна приниматься расчетная температура $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ и ниже, а для оборудования $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$ и ниже.

В правилах ABS для корпуса и оборудования принимается одинаковая расчетная эксплуатационная температура (*design service*

temperature), определение которой аналогично примененному в УТ МАКО S6.

В Правилах Регистра при выборе материала корпуса используется «минимальная среднесуточная температура воздуха, отмеченная за пятилетний период эксплуатации в наиболее неблагоприятных по условиям охлаждения акваториях» (1.2.2.2 части II «Корпус» Правил классификации и постройки морских судов). Это понятие приблизительно соответствует (за исключением требуемого периода наблюдений) определению «*design temperature*» согласно УТ МАКО S6. Вместе с тем, согласно следующему пункту тех же Правил (1.2.2.3 части II «Корпус») для судов арктических ледовых категорий (**Arc4**) минимальная расчетная температура воздуха не может быть принята выше $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Таким образом, для корпуса судна с наивысшим по правилам LR классом **Winterisation H(–26)A(–46)** для ширстрек в средней части судна (корпусная конструкция 3 класса) толщиной 20 мм допускается использование стали обычной прочности категории E. Аналогичный результат будет получен и при применении УТ МАКО S6. Для судна класса **Arc5** по Правилам Регистра (минимальная расчетная температура воздуха $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$) для такой конструкции должна быть принята сталь категории F, что свидетельствует о более высоких требованиях Правил Регистра к корпусным конструкциям судов, предназначенным для эксплуатации при низких температурах.

Исходя из накопленного опыта применения Правил Регистра при разработке требований по «**Winterisation**» было признано целесообразным сохранить подход к назначению расчетных температур конструкций, изложенных в 1.2.3.2 – 1.2.3.6 части II «Корпус» Правил классификации и постройки морских судов и распространить его на расчетные температуры для оборудования, механизмов и систем, подверженных воздействию низких температур.

Предлагается ввести дополнительный символ класса для судов, предназначенных для длительной эксплуатации при низких температурах: **WINTERIZATION(DAT)**. В скобках указывается расчетная температура наружного воздуха в градусах Цельсия (**Design Ambient Temperature, DAT**), принятая при выборе материалов конструкций, оборудования, механизмов и систем, например: **WINTERIZATION(–40)**.

При этом предлагается разделить требования по «**Winterisation**» на три группы, исходя из расчетной температуры наружного воздуха: $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$:

символ класса **WINTERIZATION(–30)** может быть присвоен судам «балтийского» ледового класса **Arc4**, предназначенным для эксплу-

атации в допустимых ледовых условиях в Баренцевом море в условиях зимней навигации, а также «балтийским» ледоколам класса **Icebreaker6**;

символ класса **WINTERIZATION(–40)** может быть присвоен судам «арктических» ледовых классов **Arc5** и выше и ледоколам **Icebreaker6** и выше, предназначенным для эксплуатации преимущественно в Западном секторе Арктики без захода в устья северных рек;

символ класса **WINTERIZATION(–50)** может быть присвоен судам «арктических» ледовых классов и ледоколам, предназначенным для эксплуатации на Северном морском пути без ограничений.

Предложенная градация, по мнению разработчиков правил, охватывает наиболее типичные районы эксплуатации судов в условиях низких температур. Вводить, подобно некоторым Классификационным обществам, требования по «**Winterisation**» для температур выше –30 °С на данном этапе признано нецелесообразным. По желанию судовладельца символ класса **WINTERIZATION(xxx)** может быть введен для судов с ледовым классом ниже **Arc4**, при этом объем применимых к ним требований будет являться предметом специального рассмотрения Регистром. Температуры ниже –50 °С также будут являться предметом специального рассмотрения Регистром.

Кроме того, необходимым условием для присвоения дополнительного знака **WINTERIZATION** должно являться наличие дополнительного знака **ANTI-ICE**. Целесообразно также, по примеру DNV, включить обязательное наличие знака экологической безопасности не ниже **ECO**.

Предложенная на основании выполненных исследований структура Требований по оборудованию судов на соответствие знаку **WINTERIZATION(DAT)** в символе класса, которые планируется включить в Правила классификации и постройки морских судов в виде самостоятельного раздела части XIX «Дополнительные знаки символа класса и словесные характеристики, определяющие конструктивные или эксплуатационные особенности судна», должна состоять из 11 глав, содержащих требования к:

составу технической документации судна в постройке, представляемой на одобрение;

принципиальной конструкции судна, в том числе расположению грузовых, топливных и балластных танков, компоновке ходового мостика, обеспечению работы с ледоколом;

назначению расчетных температур конструкций;

материалам для изготовления корпусных конструкций (в первую очередь фундаментов), отливкам и поковкам (в том числе для изготовления якорных и швартовых цепей и крепежных изделий), материалам стальных труб, неметаллическим материалам (стеклопластик, прокладки, уплотнения и т. п.), а также покрытиям подводной части корпуса и покрытиям, подверженным воздействию низких температур;

конструкции якорного, швартового и буксирного устройств и других палубных механизмов, грузовым устройствам и средствам крепления грузов;

конструкции спасательных средств (особенно спасательных и дежурных шлюпок), составу индивидуального и группового комплектов для выживания;

«оживлению» механической установки судна в условиях экстремально низких температур, обеспечению работы аварийных источников энергии и обогреву машинных помещений на стоянке судна;

конструкции судовых систем и трубопроводов, расположенных на открытых палубах, включая арматуру;

смазочным маслам, гидравлическим жидкостям, пенообразователю и другим жидким компонентам, которые должны сохранять свои свойства при низких температурах;

кабельным изделиям, электрическому, радио- и навигационному оборудованию, устанавливаемому на открытых палубах;

электрическому обогреву от аварийного источника энергии жизненно важных помещений судна.

При этом необходимо остановиться на составе дополнительных требований к судовому оборудованию. Как было отмечено выше, применение разрабатываемых правил не должно вести к применению в конструкции механизмов и оборудования, работающего при низких температурах, излишней номенклатуры относительно дорогостоящих материалов (например, стальных отливок вместо чугунных, нержавеющей стали вместо углеродистой и т. п.), а также к чрезмерному увеличению объемов испытаний при приемке оборудования.

Большинство Классификационных обществ в своих правилах по «**Winterisation**» не оговаривают конкретный объем дополнительных требований (сверх стандартных для судов неограниченного района плавания) для подтверждения работоспособности оборудования при низких температурах. Вместе с тем, опыт разработки проекта челночного танкера пр. P-70046 и практического применения соответствующих правил Lloyd's Register показал, что правила, разрабатываемые

Регистром, должны содержать прозрачные и конкретные требования к оборудованию и его изготовителю, выполнение которых должно проверяться в ходе технического наблюдения. В противном случае:

невозможно на стадиях подготовки судостроительного контракта и проведения тендера на поставку оборудования оценить влияние требований «**Winterisation**» на стоимость оборудования, что может в дальнейшем повлечь за собой серьезные финансовые проблемы, в первую очередь для судостроителя;

наличие в правилах общих или декларативных требований (например, требование об обеспечении работоспособности оборудования без указания порядка ее подтверждения путем проведения соответствующих испытаний, исследований и т. п.) открывает возможность для их вольной трактовки судовладельцем, поставщиком и верфью, что негативно сказывается как на процессе закупки оборудования, так и на строительстве судна в целом.

Следует также принимать во внимание, что выход из строя оборудования оказывает различное влияние на безопасность судна, экологию и возможность работы судна по прямому назначению. Например, выход из строя компонента якорного механизма может повлечь за собой катастрофические последствия и даже потерю судна, в то время как выход из строя грузового насоса танкера влечет за собой лишь временную частичную потерю работоспособности судна.

Кроме того, выход из строя отдельных элементов оборудования по-разному сказывается на его работоспособности. Наконец, вероятность выхода из строя элементов оборудования по причине воздействия низких температур также различна.

Поэтому в рамках разработки правил Регистра по «**Winterisation**» представляется целесообразным предпринять попытку дифференцировать требования к судовому оборудованию, подверженному действию низких температур, а также к его отдельным компонентам. Сложность вопроса заключается, однако, в отсутствии достаточного объема статистической информации по отказам оборудования, происшедшим исключительно (или преимущественно) от воздействия холода.

Вариантом решения задачи может явиться применение методов Формализованной оценки безопасности (FSA) [10]. Предлагаемый подход к применению методов FSA к рассматриваемой проблеме изложен в статье В.М. Буре, Д.А. Грубова, Е.М.Парилиной и В.Н.Тряскина «Применение методов оценки риска к анализу эксплуатации судового оборудования при воздействии низких температур», помещенной в настоящем Сборнике (см. стр. 59).

В заключение следует отметить, что разрабатываемые требования Регистра по обеспечению эксплуатации судна в условиях низких температур могут быть распространены не только на морские суда, но и на плавучие буровые платформы и другие морские сооружения для работы в Арктике.

Список литературы

1. Lloyd's Register of Shipping. Technical Background for Provisional Rules for the Winterisation of Ships, 2006.
2. MSC/Circ.1056/MEPC/Circ.399 от 23.12 2002 «The IMO Guidelines for Ships Operating in Arctic Ice-covered Waters».
3. Ø. J e n s e n . The IMO Guidelines for Ships Operating in Arctic Ice-covered Waters. From Voluntary to Mandatory Tool for Navigation Safety and Environmental Protection? – The Fridtjof Nansen Institute, Report, 2007.
4. Lloyd's Register of Shipping. Provisional Rules for the Winterisation of Ships, Notice No. 1, 2008, 1.2.6.
5. Кодекс безопасности рыбаков и рыболовных судов, п. 3.8.3 гл. 3 «Остойчивость и связанные с ней мореходные качества» и 2.4 добавления 10 к Приложению к части А. – ИМО, 2006.
6. Подволоцкий Н.М. Опыт эксплуатации танкеров ледового плавания. – Российский морской регистр судоходства, 2004.
7. Вейхман В.В. Обледенение судов и борьба с ним. http://www.sea-safety.ru/article/opereiting_safety/icing.htm.
8. Материалы Интернет-сайта <http://www.deicing.ru>, посвященного защите воздушных судов от обледенения.
9. Правила классификации и постройки морских судов. Т. 1, 2. – СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2007.
10. Циркуляр ИМО MSC/Circ.1023/MEPC/Circ.392 от 05.04.2002 «Guidelines for Formal Safety Assessment (FSA) for Use in the IMO Rule-Making Process».

УДК 629.12

*В.И. Евенко, М.А. Кутейников, А.В. Дидковский, Е.М. Анполонов,
Ю.А. Симонов, Р.Ю. Романов*

ПРОЕКТИРОВАНИЕ АРКТИЧЕСКИХ ГАЗОВОЗОВ

Введение

Российская Федерация, где сосредоточено около одной трети мировых запасов газа, является одним из крупнейших поставщиков его на мировой рынок. В последнее время в мире наблюдается значительный рост энергопотребления и, как следствие, увеличение объемов поставки газа. Одновременно с этим для целого ряда крупных российских месторождений природного газа прогнозируется скорое снижение объемов добычи в связи с истощением запасов. Для обеспечения растущего спроса на газ необходимо вовлекать в разработку новые месторождения. В России большинство разведанных запасов природного газа располагается в районах Крайнего Севера и на шельфе арктических морей. Одним из наиболее перспективных районов добычи газа является полуостров Ямал и прилегающая к нему акватория. В пределах полуострова открыто более двух десятков месторождений, как сухопутных, так и морских. Основные разведанные запасы газа находятся в пяти месторождениях – Бованенковском, Харасавэйском, Южно-Тамбейском, Крузенштернском и Северо-Тамбейском. Весьма перспективным для добычи газа и жидких углеводородов является приямальский шельф Карского моря, в пределах которого уже выявлены уникальные и крупные морские газоконденсатные месторождения (ГМК), такие как Русановское и Ленинградское.

До настоящего времени весь добываемый в России газ доставляется до отечественных и зарубежных потребителей по магистральным

трубопроводам. Расширение районов добычи газа и смещение центров добычи в районы, где отсутствует инфраструктура магистральных трубопроводов, а также желание диверсифицировать рынки сбыта заставляет обратить особое внимание на альтернативный способ транспортировки газа – вывоз его в сжиженном виде морским транспортом.

В России уже существуют проекты, находящиеся на разных стадиях реализации, по производству сжиженного природного газа (СПГ) с последующей транспортировкой его морскими судами-газовозами:

- строительство завода СПГ и терминала для отгрузки в п. Пригородное на острове Сахалин;

- производство и отгрузка СПГ на Кольском полуострове в рамках освоения Штокмановского ГКМ.

Следующим этапом выхода России на международный рынок СПГ может стать освоение месторождений Ямала, Обской губы и Карского моря.

Реализация подобного проекта в районе Ямала имеет как свои преимущества, так и недостатки. Одним из главных преимуществ является возможность снижения затрат энергии на сжижение газа на 30 % по сравнению с аналогичным производством, расположенным в тропической или экваториальной зоне, за счет более холодного климата. Однако при этом возрастают риски, связанные с морской транспортировкой СПГ и необходимостью обеспечения бесперебойности перевозок и четкого соблюдения графика поставок.

Суда, предназначенные для вывоза СПГ из арктических районов, должны создаваться как элемент морской транспортной системы, и обеспечивать регулярные круглогодичные перевозки. Исходя из этого, можно сформулировать два основных критерия, которые необходимо учитывать при проектировании таких судов: надежность и экономическая эффективность.

Для обеспечения надежности и безопасности перевозок судно должно проектироваться, строиться и эксплуатироваться в соответствии с требованиями международных и национальных конвенций и нормативных документов под надзором классификационного общества, признанного Международной Ассоциацией Классификационных Обществ (МАКО). Однако суда для перевозки СПГ в Арктике ранее не создавались, и в связи с этим в настоящее время нет нормативных документов, в полной мере учитывающих особенности эксплуатации арктических газовозов.

Для достижения максимального экономического эффекта судно должно создаваться с учетом обеспечения оптимальных экономичес-

ких показателей транспортной системы в целом и с учетом особенностей линий эксплуатации, для которых оно предназначено.

Основные направления исследований при разработке требований к арктическим судам для перевозки СПГ

При формировании требований к арктическим судам-газовозам основными вопросами исследования являются:

- выбор системы грузовых емкостей;
- определение ограничений главных размерений и наиболее предпочтительного типоразмера судов;
- формирование требований к форме и конструкции корпуса судна, назначение категории ледовых усилений;
- определение необходимой эксплуатационной скорости судна во льдах и по чистой воде;
- выбор типа энергетической установки и определение ее мощности;
- целесообразность использования системы повторного сжижения испарившегося газа;
- оценка возможности осуществления самостоятельного плавания судна во льдах и разработка оптимальных схем взаимодействия судна с ледоколами;
- назначение расчетного периода эксплуатации судна.

Выбор типа грузовых емкостей

Выбор предпочтительного типа системы грузовых емкостей должен осуществляться, прежде всего, исходя из условия обеспечения наилучших показателей надежности и экономической эффективности.

Емкости для перевозки СПГ подразделяются на вкладные и мембранные. К вкладным относятся система сферических танков типа «Moss» и система призматических танков типа SPB (Self-supporting Prismatic tank type B, патент фирмы IHI, Япония). К мембранным относятся системы Mark III, No96 и CS1. В настоящее время наиболее распространены системы Mark III, No96 и Moss. Уже накоплен значительный опыт эксплуатации этих трех систем, позволяющий дать оценку каждой из них.

В настоящее время более 80 % всех заказанных в мире судов-газовозов имеют мембранную систему грузовых емкостей. Однако

подобное распределение вовсе не свидетельствует о неоспоримых преимуществах мембранных систем, поскольку в первую очередь при выборе системы танков на заказчиков оказывает влияние распределение имеющихся мощностей для постройки газовозов и ориентация конкретных судостроительных предприятий на строительство судов с определенным типом грузовых емкостей.

Мембранные емкости позволяют достичь наилучшего коэффициента использования объема судна и обеспечить за счет этого большую грузовместимость, чем сферические танки, при одинаковых размерах. Однако по существующим данным их конструкции имеют более высокий, по сравнению со сферическими емкостями, уровень повреждаемости, поэтому вопрос обеспечения целостности конструкций грузовых емкостей при плавании во льдах требует отдельного изучения. В настоящее время основные фирмы – строители газовозов с мембранными емкостями уже ведут необходимые исследования в данном направлении.

Основным преимуществом вкладных емкостей (сферических и призматических) является то, что их конструкции независимы от конструкций корпуса самого судна, и, следовательно, большие ледовые нагрузки, которые испытывает корпус при плавании в замерзающих арктических морях, не передаются на грузовые емкости, и тем самым снижается опасность их повреждения и возникновения утечек.

По имеющимся данным сферические емкости характеризуются весьма высоким уровнем надежности – до настоящего времени не зафиксировано повреждений их конструкций, обусловленных воздействием эксплуатационных нагрузок. Они также способны обеспечить наименьшие потери груза от испарения. Суда с вкладными призматическими емкостями в мире не распространены. Всего таких судов эксплуатируется 2 ед. с вместимостью около 80000 м³ и поэтому опыт их эксплуатации не так велик по сравнению с вышеуказанными типами судов. Грузовые емкости данного типа наиболее тяжелые из всех рассмотренных. При этом соответственно увеличивается вес судна порожнем, и снижаются показатели экономической эффективности судна. К числу преимуществ судов типа SPB по сравнению с газовозами типа «Moss» следует отнести меньшую степень подверженности к потере остойчивости при обледенении, что является достаточно важным при эксплуатации в условиях экстремальных отрицательных температур окружающей среды, а также отсутствие раскрытия верхней палубы, что обеспечивает более высокую общую прочность кор-

пуга судна. Стоит отметить, что существующие суда этого типа эксплуатируются в довольно сложных природно-климатических условиях северной части Тихого океана, работая на перевозках между Кенаи (Аляска) и Токио (Япония).

Как показал анализ стоимости судов, выбор типа емкостей мало влияет на рыночную стоимость судна, которая в большей степени зависит от конъюнктуры судостроительного рынка, занятости судостроительных мощностей и выбора верфи-строителя. При этом большую роль будет играть возможность верфи (верфей) обеспечить поставку необходимого количества судов в заданные сроки. При выборе системы танков на заказчиков оказывает влияние распределение имеющихся мощностей для постройки газозовов и ориентация конкретных судостроительных предприятий на строительство судов с определенным типом грузовых емкостей.

В настоящее время основная масса заказов на суда-газовозы СПГ будет реализована в Корее – 78 %, а также в Японии (18 %) и Китае (4 %).

В связи со всем вышеизложенным, можно заключить, что окончательное определение наиболее предпочтительного типа грузовых емкостей должен осуществлять заказчик судов по результатам переговоров с потенциальными заводами-строителями. Его выбор должен исходить из наиболее выгодных предложенных условий, но с гарантией надежности, которая может быть получена только после проведения специальных расчетно-экспериментальных исследований по определению влияния ледовых нагрузок на надежность грузовых емкостей судов-газовозов.

Ограничения размеров судов и особенности регламентации ледовой прочности корпусов крупнотоннажных арктических газозовов

Вместимость традиционных судов-газовозов (не ледового плавания) в настоящее время составляет около 150 000 м³ и имеет устойчивую тенденцию к дальнейшему увеличению. Однако опыта эксплуатации столь крупных судов в Арктике нет.

На размеры судов ледового плавания оказывают влияния как ограничения, имеющиеся в портах погрузки/разгрузки и на трассах плавания, так и предполагаемая схема транспортной системы.

Возможны два типа организации схемы вывоза СПГ из арктических регионов:

прямые перевозки от погрузочных терминалов, расположенных в замерзающих районах арктических морей до приемных терминалов США и Западной Европы;

организация перевалочной базы в районе Кольского полуострова, в той части, где возможно лишь эпизодическое появление льдов незначительной толщины.

Очевидно, что использование судов с высокой ледовой категорией на чистой воде менее эффективно по сравнению с традиционными судами. В связи с этим нецелесообразно использовать ледовые газовозы на прямых перевозках, поскольку протяженность ледового участка составит менее 30 % от всей трассы. Поэтому вариант организации перевалочной базы на Кольском полуострове и использование челночных ледовых газовозов представляется более разумным. Размеры акватории и глубины на подходах и у причалов позволяют обеспечить прием судов вместимостью до 150 000 м³ как в районах предполагаемой загрузки судов, так и в районах возможной разгрузки или перевалки.

Однако основной проблемой при определении допустимых размеров арктических судов-газовозов является необходимость работы судов и соблюдения достаточно строгого графика перевозок в сложных ледовых условиях, которые могут возникать на предполагаемых маршрутах следования.

Специальные требования к прочности газовозов ледового плавания до сих пор не регламентированы в нормативных документах как Регистра, так и зарубежных классификационных обществ. Крупнотоннажные газовозы имеют ряд особенностей, которые оказывают существенное влияние на регламентацию ледовой прочности корпуса. К числу таких особенностей относятся в первую очередь следующие:

- ухудшенная маневренность, характерная для крупнотоннажных судов;

- значительная ширина проектируемых газовозов, превосходящая ширину канала, прокладываемого существующими ледаколами;

- бульбообразная форма носовой оконечности, неблагоприятная для плавания во льдах.

Остановимся подробнее на каждой из этих особенностей.

Рассматривая тактику самостоятельного ледового плавания арктических судов, можно выделить следующие четыре основных режима плавания во льдах:

- плавание в мелкобитом льду;

- плавание по разводьям;

преодоление ледовых перемычек;
плавание в сплошных ледовых полях.

На настоящем этапе можно полагать, что при плавании в мелкобитых льдах и при преодолении ледовых перемычек крупнотоннажные газозовы не имеют особенностей по сравнению с традиционными судами ледового плавания. В тех же случаях, когда при плавании во льдах требуется маневрирование, сказывается худшая управляемость крупнотоннажных судов, а также их большие размеры. Так, при плавании в разводьях можно ожидать некоторого увеличения числа ударов корпуса о лед (как в носовом, так и в других районах ледового пояса). При движении в сплошных ледовых полях из-за ухудшения маневренных качеств можно ожидать, что для крупнотоннажного судна следование оптимальным маршрутом будет невозможно, что приведет к необходимости преодолевать более торосистые льды и, соответственно, повышению нагруженности корпуса.

Нестандартная ситуация возникает для крупнотоннажных газозовов и при плавании в канале за ледоколом. Дело в том, что все существующие на сегодняшний день ледоколы прокладывают канал, ширина которого меньше, чем предполагаемая ширина перспективных крупнотоннажных газозовов.

Необходимое увеличение ширины канала будет происходить за счет взаимодействия его кромок с корпусом крупнотоннажного судна. Это взаимодействие в виде периодических ударов, приводящих к изгибному разрушению участков кромки канала, принято называть «доламыванием» канала, так как при таком способе проводки судно фактически завершает начатый ледоколом процесс прокладки канала, доводя его до необходимой ширины. В результате «доламывания» канала возрастает нагруженность соответствующих участков судового корпуса.

Основной проблемой, возникающей при регламентации ледовой прочности бульбообразной носовой оконечности, является наличие в носовом районе ледовых усилений участков, где касательная к шпангоуту близка к вертикали. В этом случае при ударе о лед вертикальная составляющая усилия взаимодействия, вызывающая разрушение льда изгибом, будет невелика, что может привести к существенному увеличению ледовых нагрузок. Основными путями решения этой проблемы являются следующие. Во-первых, необходимо так изменить обводы, осадку и посадку судна (особенно в балластном переходе), чтобы исключить попадание участков борта, близких к вертикальным в зону переменных ватерлиний. Тогда ударное взаимодействие вер-

тикального борта с ледовым полем будет возможно только в случае мощных консолидированных торосов и подсовов, что является гораздо более редкой ситуацией. Удары же в вертикальный борт притопленных обломков льдин не создают больших усилий взаимодействия в силу ограниченности массы этих обломков. Во-вторых, при регламентации ледовой прочности бульбообразной носовой оконечности арктического газовоза следует определять ледовые нагрузки расчетными методами, в том числе для указанных выше сценариев удара о консолидированный торос и подсовы, с учетом пониженной вероятности их реализации.

Таким образом, применительно к перспективным крупнотоннажным газовозам формальное выполнение требований Правил классификационного общества еще не гарантирует отсутствия проблем в части ледовой прочности. В настоящее время грамотно учесть указанную специфику газовозов с целью создания вполне надежной и экономичной конструкции корпуса без проведения специальной научно-исследовательской работы невозможно.

Крупнотоннажные газовозы относятся к числу наиболее высокотехнологичных судов, что обусловлено необходимостью исключить возможность возникновения крупной аварии при транспортировке одного из самых опасных грузов. Проектирование газовоза для Арктики сталкивается с дополнительными проблемами, связанными с низкими температурами и ледовыми нагрузками. Так, применительно к арктическим газовозам возникает совершенно новая проблема – обеспечение сохранности грузовых емкостей для сжиженного газа под действием экстремальных (аварийных) ледовых нагрузок. Если для обычного судна ледового плавания появление ледовых повреждений в виде глубоких вмятин вызывает лишь повышение объемов ремонта, то для арктического газовоза развитая вмятина двойного борта способна привести к значительным деформациям емкостей для сжиженного газа. В случае утраты герметичности и попадания газа в атмосферу создаются предпосылки для крупномасштабной техногенной аварии с тяжелыми последствиями. Определение максимально возможных ледовых нагрузок, способных воздействовать на судно хотя бы один раз за весь эксплуатационный период, а также прогнозирование поведения конструкции двойного борта в области глубоких пластических деформаций также невозможны без выполнения специальных исследований, включающих расчетное определение ледовых нагрузок и физически нелинейный конечно-элементный анализ.

Принимая во внимание вышеизложенное, в настоящее время специалисты Регистра и ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова проводят совместные исследования, направленные на создание научно обоснованных нормативов и методик для регламентации эксплуатационной и аварийной ледовой прочности крупнотоннажных арктических газовозов. Полученные в рамках этого процесса результаты дают возможность Регистру уже в настоящий момент рассматривать проекты газовозов в части требований к ледовой и аварийной прочности корпуса.

Вместе с тем существует еще одна проблема, которую необходимо решать при создании крупнотоннажных судов-газовозов ледового плавания – ледовые сжатия.

Сопротивление движению судна в разреженных льдах определяется шириной судна и слабо зависит от его длины. Многочисленные экспериментальные и теоретические исследования показали, что протяженная цилиндрическая вставка увеличивает сопротивление льда движению не более чем на 15 – 20 %. Однако в сплоченных льдах, в условиях их сжатия большая длина судна может существенно сказаться на ходкости судна. Сжатие льда влияет как на составляющие сопротивления, связанные с ломкой и притапливанием обломков льда, так и на увеличение сопротивления трения льда в районе ватерлинии. Выполненные в ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова предварительные оценки показали, что в условиях сжатия силой 2 балла и более крупнотоннажное судно может быть лишено возможности самостоятельного движения. Очевидно, что в этих условиях для создания безопасного и эффективного судна особую важность приобретает вопрос отработки наиболее предпочтительной формы и конструкции корпуса и пропульсивного комплекса судна, позволяющей достичь оптимальных показателей по ледопроходимости и обеспечить как сохранность самого груза, так и бесперебойность его поставки на мировые рынки.

Энергетическая установка и эксплуатационная скорость

При выборе типа энергетической установки для судов-газовозов можно рассматривать следующие возможные варианты:

- паротурбинная установка;
- малооборотные дизели;
- дизель-электрическая ЭУ со среднеоборотными дизелями;
- газотурбинная ЭУ.

Традиционно на судах для перевозки сжиженного природного газа (СПГ) в качестве энергетических установок до недавнего времени

использовались паротурбинные энергетические установки (ПТУ). Их применение было обусловлено главным образом приспособленностью к использованию низкосортного топлива и паров перевозимого газа в качестве топлива (на судах постройки до 90-х гг. количество испаряющегося газа составляло до 0,25 – 0,3 % в сутки от перевозимого объема).

К недостаткам ПТУ можно отнести их низкий термический КПД (до 35 %) и, следовательно, высокий расход топлива. При этом следует учесть и тот фактор, что совершенствование конструкции и изоляции резервуаров привело к сокращению объемов испаряющегося СПГ до 0,09 – 0,15 %. В результате количества испаряющегося газа стало недостаточно для обеспечения топливом силовой установки, что привело к необходимости использования дополнительного тяжелого топлива. В части выполнения международных требований по содержанию вредных выбросов в выхлопных газах ПТУ находятся в наименее выгодных условиях по сравнению с другими типами энергетических установок. Высокое потребление топлива паровой турбиной ведет непосредственно к высокой эмиссии CO_2 , ответственность за содержание которого будет увеличиваться в будущем. Указанными обстоятельствами был обусловлен постепенный отказ от использования ПТУ на судах-газовозах.

В середине 90-х гг. начали получать распространение двухтопливные дизель-электрические ЭУ, работающие на испаряющемся в грузовых танках газе, а также малооборотные дизели, работающие на тяжелом топливе, с одновременной установкой системы повторного сжижения. Это позволило существенно повысить КПД энергетических установок газовозов и сократить количество вредных выбросов в атмосферу.

Наряду с проработкой дизельных вариантов энергетических установок газовозов для перевозки СПГ были выполнены проработки газотурбинных установок с использованием газовых турбин с теплоутилизационным контуром (ГТУ ТУК) как в варианте с механическим, так и электрическим способом передачи мощности на винт.

Ранее использование ГТУ не нашло широкого применения на транспортных судах в силу их низкой экономичности и недостаточного ресурса. Использование в составе ГТУ ТУК позволило повысить ее экономичность, а проведенные работы фирмами-изготовителями – поднять ресурс, что в конечном итоге позволило вернуться к рассмотрению ее в качестве одного из возможных вариантов ЭУ для судов-газовозов.

Опыт создания ледоколов и ледокольно-транспортных судов показывает, что наиболее удобными и надежными в ледовых условиях являются дизель-электрические ЭУ, а также установки с малооборотными дизелями с винтами регулируемого шага с прямой передачей мощности на винт без электродвижения, что значительно удешевляет двигательно-двигательный комплекс.

Таким образом, можно сделать вывод, что традиционные для судов-газовозов паротурбинные установки уже нецелесообразно применять для арктических судов-газовозов. Технические возможности современных дизельных и газотурбинных агрегатов позволяют при более высокой экономичности по сравнению с ПТУ обеспечить не только требуемую мощность на гребном винте и надежность, но и возможность использовать в качестве топлива испаряющийся газ. В качестве наиболее перспективных вариантов ЭУ для газовозов арктического плавания необходимо рассматривать дизельные, дизель-электрические и газотурбинные с тепло-утилизационным контуром. Окончательный выбор ЭУ может быть сделан после выполнения дополнительных проектных исследований, включая отработку формы корпуса и винторулевого комплекса перспективного газовоза для вывоза СПГ с арктических месторождений.

Выполненная оценка скорости движения газовоза во льду и необходимой для этого мощности ЭУ показывает, что при обеспечении ледопроеходимости 1,7 – 1,8 м выбранной мощности будет достаточно и для достижения скорости движения по чистой воде ок. 18÷20 уз., что является традиционным для судов-газовозов. Однако поскольку корпус судна будет спроектирован для плавания во льдах, то при движении по чистой воде расход топлива будет выше, чем у традиционных судов-газовозов.

Окончательный вывод по определению эксплуатационной скорости может быть сделан после выполнения дополнительных проектных исследований, включая отработку формы корпуса и винторулевого комплекса перспективного газовоза для вывоза СПГ из арктических районов.

Заключение

Проанализировав основные направления исследований, необходимых для создания судов для вывоза СПГ из арктических районов, можно сделать вывод, что потребуется применение не только традиционных и годами проверенных решений, но и внедрение современ-

ных инноваций, позволяющих повысить безопасность и эффективность эксплуатации этих судов. Россия пока только начинает делать первые шаги в области производства и транспортировки СПГ, но в дальнейшем темпы освоения данного сегмента мирового рынка будут только нарастать и в первую очередь за счет освоения месторождений Арктики. Авторы надеются, что выполненные Регистром и ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова совместные исследования по созданию научно-технического базиса проектирования перспективных арктических газозовов позволят в будущем обеспечить надежность и безопасность поставок российского газа мировым потребителям.

Список литературы

1. Правила классификации и постройки морских судов. – СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2008.

УДК 629.5.035.55.017: 629.561.5

Е.Б. Карулин, М.М. Карулина, В.А. Беляшов, И.М. Белов

ОЦЕНКА ПЕРИОДИЧЕСКИХ НАГРУЗОК, ДЕЙСТВУЮЩИХ НА ГРЕБНОЙ ВИНТ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ СО ЛЬДОМ

1 Введение

Натурные наблюдения за работой во льдах ледоколов и судов ледового плавания указывают на то, что часть ледяной массы проникает к движителям и вступает в непосредственный контакт с гребным винтом. Взаимодействие движителей со льдом наблюдается и в модельных экспериментах при исследовании движения моделей судов во льдах в ледовых опытовых бассейнах. Анализ натурных экспериментальных данных, накопленных в результате обследований российских арктических судов среднего водоизмещения [1, 2, 3], позволил выявить закономерности влияния ледовых условий плавания на собственные динамические характеристики корпуса и на изменение сил, возбуждающих вибрацию судна во льдах. В частности установлено, что при форсировании льдов возрастает вибрация корпуса с лопастной и кратными ей частотами, обусловленная взаимодействием лопастей винта с обломками льда (рис. 1). Это, в свою очередь, обуславливает возможность возникновения ряда проблем при эксплуатации арктических судов. К таким проблемам относятся возникновение усталостных повреждений в движительном комплексе, кормовой оконечности и грузовых емкостях, отказы в работе оборудования, ухудшение условий обитаемости.

С учетом этого представляет большой интерес изучение процессов взаимодействия лопастей винтов со льдом и создание надежных методов прогнозирования вызываемых этим взаимодействием периодических сил. К настоящему времени известен ряд работ, посвящен-

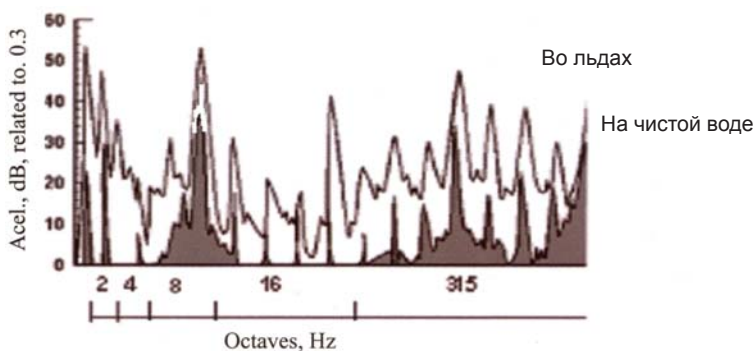


Рис. 1

Сравнение вибрации корпуса ледокола при плавании на чистой воде и во льдах

ных расчетной и экспериментальной оценке динамических нагрузок на винт, вызванных фрезерованием льда в процессе взаимодействия [3, 4, 5], однако до сих пор этот вопрос является недостаточно изученным. В настоящей статье описывается методология определения указанных величин, применяемая в ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, основанная как на теоретических исследованиях, так и на данных модельного эксперимента. Полученные результаты определения периодических ледовых нагрузок, индуцированных взаимодействием гребного винта со льдом, могут быть использованы при анализе усталостной прочности элементов движительного комплекса или в расчетной оценке параметров вибрации судна ледового плавания. Пример такого расчета приведен в данной статье. Изложенная в статье методология в принципе применима и для оценки экстремальных ледовых нагрузок на винт, в частности приводящих к его заклиниванию. Однако в этом случае нагрузки уже не будут периодическими и не могут рассматриваться, как источник установившейся вибрации корпуса. По этой причине их оценка в статье не рассматривается, а будет являться предметом будущих специальных исследований.

2 Определение периодических ледовых нагрузок, действующих на гребной винт

Взаимодействие гребных винтов судов ледового плавания со льдом может быть отнесено к одному из двух типов:

столкновение какой-либо части вращающегося гребного винта с льдиной, сопровождающееся раскалыванием льдины или отбрасыванием ее в сторону;

фрезерование льдины вращающимся гребным винтом.

Второй случай реализуется, когда льдина достаточной толщины оказывается зажатой вблизи работающего гребного винта, и появляются периодические ледовые нагрузки на гребном винте, изменяющиеся с лопастной частотой. Исследование процессов возникновения переменных составляющих ледовых нагрузок, действующих на гребной винт при фрезеровании, производилось по трем направлениям:

.1 применение теоретической модели определения ледовых нагрузок на гребной винт в режиме фрезерования льда;

.2 экспериментальные исследования процесса фрезерования льда моделью гребного винта в ледовом опытовом бассейне;

.3 модельные исследования в ледовом опытовом бассейне процессов взаимодействия со льдом работающих гребных винтов, расположенных за корпусом судна.

Ниже приведено описание каждого направления исследований.

2.1 Теоретическое определение ледовых нагрузок на гребной винт.

Теоретическая модель, позволяющая проследить изменение мгновенных значений упора и крутящего момента гребного винта за один оборот при фрезеровании льда, разработана В.А. Беляшовым в ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова [5]. Она основывается на результатах исследований процессов фрезерования льда лопастями движителей [4, 6], и резания льда специальными ножами, имитирующими лопасть гребного винта.

Физическая картина фрезерования льда гребным винтом может быть описана следующим образом (рис. 2). При внедрении лопасти гребного винта в лед образуется некоторая поверхность контакта со льдом S_c , охватывающая в районе входящей кромки как засасывающую, так и нагнетающую поверхности лопасти.

На засасывающей поверхности в зоне A_1C_1 входящей кромки лопасти происходит дробление льда до мелкодисперсного состояния и выдавливание образовавшейся ледяной крошки. Контактные давления в данной зоне являются наиболее значительными, поскольку разрушение льда происходит в условиях смятия.

На нагнетающей поверхности в зоне входящей кромки происходит отделение малых элементов скола $A_1B_1O_1D_1$ вследствие хрупкого разрушения льда.

сания поверхности лопасти гребного винта, полученного по теоретическому чертежу гребного винта.

С использованием описанного подхода выполнены расчеты изменения ледового упора и крутящего момента гребного винта ледокола в режиме фрезерования льда (рис. 3) для относительной поступи $J=0,4$. Диаметр гребного винта – 5,7 м, глубина врезания лопасти в лед составляет 0,855 м (0,3 радиуса гребного винта), частота вращения – $n=2$ 1/с. Контактные давления приняты постоянными по площади контакта и равными: на засасывающей стороне – 12 МПа, на нагнетающей стороне – 8 МПа. Эти значения позволили получить хорошее соответствие результатов расчетов и данных натурных измерений.

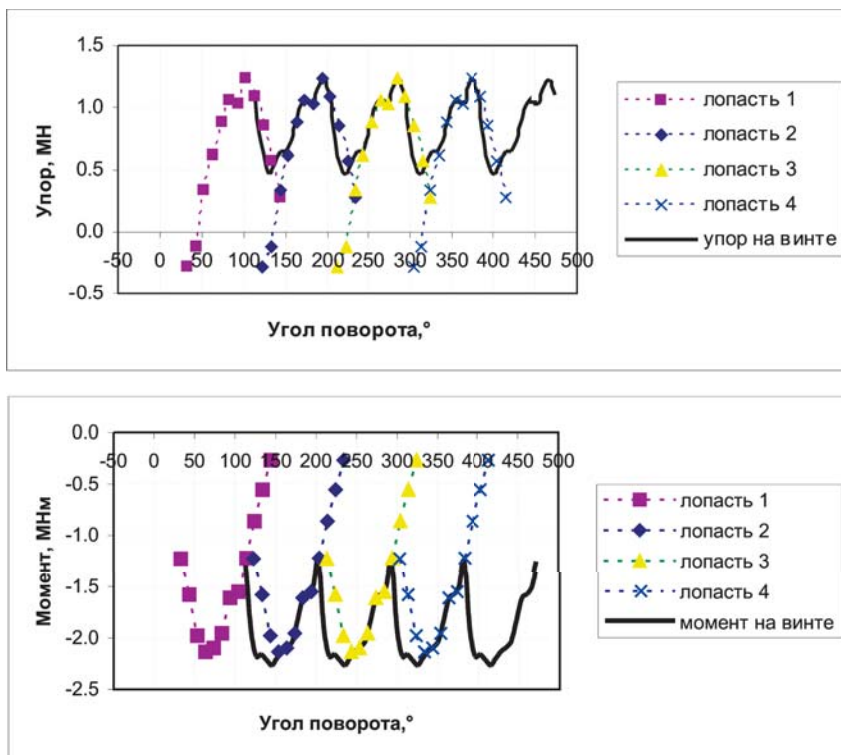


Рис. 3

Изменение ледового упора и крутящего момента 4-х лопастного гребного винта ледокола за один оборот при фрезеровании льда. Расчетные кривые

На рис. 4 приведены спектры амплитуд ледового упора и крутящего момента гребного винта, построенные по результатам спектрального анализа соответствующих расчетных временных зависимостей на рис. 3. Пики максимальной величины расположены на лопастной частоте, меньшие – на частотах, кратных лопастной.

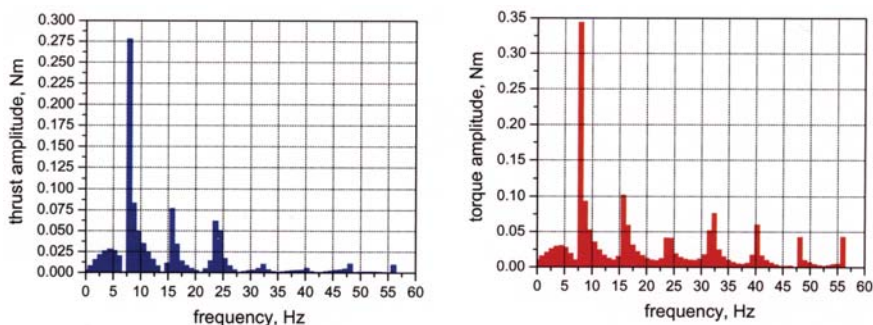


Рис. 4

Спектры амплитуд ледового упора и крутящего момента гребного винта ледокола

Основная сложность применения теоретической модели заключается в неопределенности величин локальных давлений, возникающих в зонах контакта, и их распределении по площади зон контакта. Контактные давления могут изменяться в довольно широком диапазоне в зависимости от температуры, солёности, структуры льда.

2.2 Экспериментальные исследования процесса фрезерования льда моделью гребного винта.

Схема экспериментальной установки для фрезерования льда моделью гребного винта приведена на рис 5.

Методика испытаний заключается в следующем. Из ледяного поля вырезается блок прямоугольной формы с размерами примерно $0,8 \cdot 1,0$ м, выкладывается на ледяное поле и прикрепляется к нему. Винт закрепляется на винтовом динамометре, расположенном в обтекателе установки, закрепленной на буксировочной тележке ледового бассейна. Буксировочная тележка перемещается с заданной скоростью по рельсам вдоль бассейна. Привод установки сообщает вращательное движение гребному винту. При поступательном движении буксировочной тележки с закрепленной на ней установкой происходит внедрение лопастей вращающегося гребного винта в поверхность

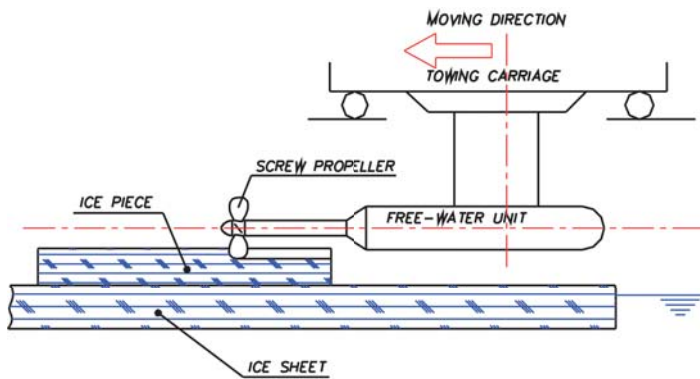


Рис. 5

Схема экспериментальной установки фрезерования льда моделью гребного винта

участка ледяного поля. На приведенных ниже фотографиях (рис. 6) показаны момент фрезерования и поверхность льда после фрезерования.



Рис. 6

Фрезерование блока льда и вид блока льда после фрезерования

Фактическая глубина внедрения лопасти в лед измеряется после выполнения пробега. Обычно исследуется диапазон глубин внедрения от $0,1R$ до $0,4R$, где R – радиус модели гребного винта. Толщина фрезеруемой льдины выбирается таким образом, чтобы исключить раскалывание образца льда при принятой глубине внедрения лопасти в лед.

В процессе взаимодействия гребного винта со льдом производится запись следующих параметров:

- скорости буксировочной тележки;
- частоты вращения гребного винта;
- упора;
- крутящего момента на гребном валу.

Физическое моделирование процесса фрезерования гребным винтом льда реализует этот процесс в определенных условиях. Главным из них является постоянство скорости относительного движения гребного винта и образца льда. При этом за счет неподвижности образца скорость относительного движения направлена вдоль оси гребного винта, соблюдается неизменность величины заглубления лопастей в лед и постоянство интервалов времени между внедрением в лед сходственных точек различных лопастей гребного винта. В результате спектры пульсаций крутящего момента и упора имеют дискретный характер.

Примеры записи ледового упора и крутящего момента, полученные при фрезеровании льда моделью гребного винта, приведены на рис. 7. Диаметр гребного винта равен 0,2 м, число лопастей – 4,

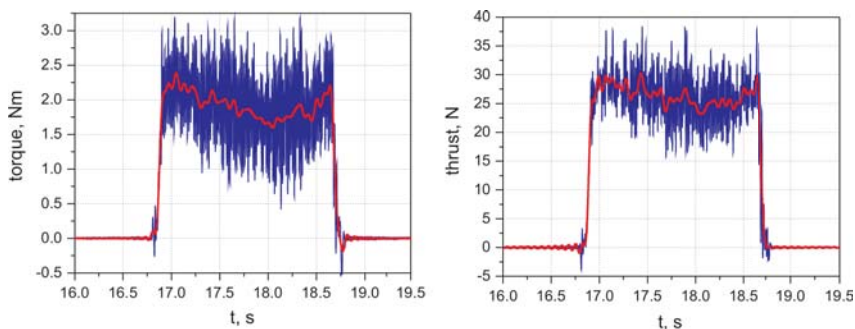


Рис. 7
Примеры записи упора и крутящего момента
модели гребного винта при фрезеровании льда

скорость поступательного движения – 0,5 м/с, частота вращения – 14,6 1/с. На графиках рис. 8 отчетливо видны наибольшие амплитуды на лопастной частоте (58,6 Гц), на частоте вращения гребного винта (14,6 Гц) и кратной ей частотах.

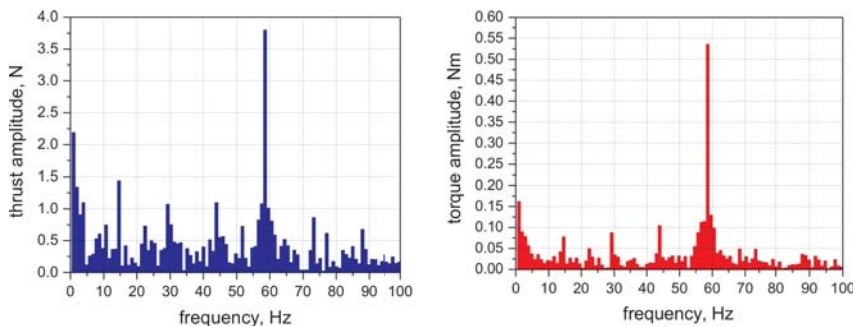


Рис. 8

Спектр амплитуд ледового упора и крутящего момента модели гребного винта по результатам фрезерования льда

Пересчет результатов модельных испытаний на натуру выполняется в предположении, что:

.1 соблюдены требования по равенству чисел Фруда (подобие соотношения гравитационных и инерционных сил в натуре и в модельном эксперименте);

.2 соблюдены требования по равенству относительных поступей натурального гребного винта и его модели;

.3 давления в зонах контакта поверхностей гребного винта со льдом пропорциональны прочности льда на сжатие, и коэффициент пропорциональности одинаков для модельных и натуральных условий.

2.3 Буксировочные испытания модели корпуса с работающими движителями.

Схема экспериментальной установки для проведения буксировочных испытаний приведена на рис. 9. Модель судна жестко крепится на динамометре, соединенном с буксировочной тележкой. С помощью установленного на модели судна электродвигателя и редуктора гребные винты вращаются с заданной частотой. Скорость движения тележки определяет скорость движения модели судна.

В этом эксперименте моделируются все возможные режимы движения судна, когда вероятно взаимодействие движителей со льдом: буксировка носом и кормой вперед (имитация движения передним и задним ходом) в ровном льду, в грядах торосов и в заполненном льдом канале.

В процессе движения модели с помощью винтового динамометра измеряются упор гребного винта и крутящий момент на гребном винте.

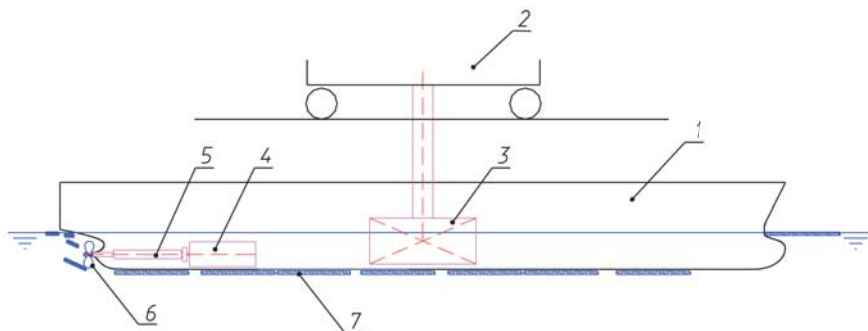


Рис. 9

Экспериментальная установка для буксировки модели судна с работающими гребными винтами

- 1 – модель судна; 5 – винтовой динамометр; 2 – буксировочная тележка;
6 – гребной винт; 3 – динамометр; 7 – блоки льда; 4 – электродвигатель

Для выделения чисто ледовых нагрузок на движительный комплекс из полученных в ходе экспериментальных пробегов значений вычитаются гидродинамические нагрузки, предварительно определенные при буксировке модели судна с той же скоростью с работающими движителями по чистой воде. При этом вводится предположение о независимости гидродинамических и ледовых воздействий на движительный комплекс. Момент взаимодействия модели корпуса со льдом в канале показан на рис. 10.

В отличие от описанных выше условий чистого фрезерования, взаимодействие со льдом гребного винта, работающего за корпусом модели судна, имеет более сложный характер. Наиболее существенными отличиями являются следующие.

Взаимодействие движителя со льдом происходит в условиях, когда обломки льда свободно плавают в воде. При этом можно предполагать, что в результате силового контакта лопасти вращающегося гребного винта и плавающего обломка льда происходит изменение скорости их относительного движения как по величине, так и по направлению. Величина изменения скорости зависит от многих факторов. Прежде всего – от массы (размера) обломка льда, величины контактного усилия, наличия сопредельных соседних обломков льда и т. д.

Из-за ограниченного размера обломков, наряду с фрезерованием, имеют место удары лопастей о лед с последующим их отбрасыванием или раскалыванием.



Рис. 10
Буксировка модели корпуса судна в канале, плотно заполненном льдом

Указанные факторы приводят к трансформации дискретного спектра пульсаций в широкополосный, что может быть видно по результатам испытаний. Типичный вид спектров пульсаций упора гребного винта представлен на рис. 11

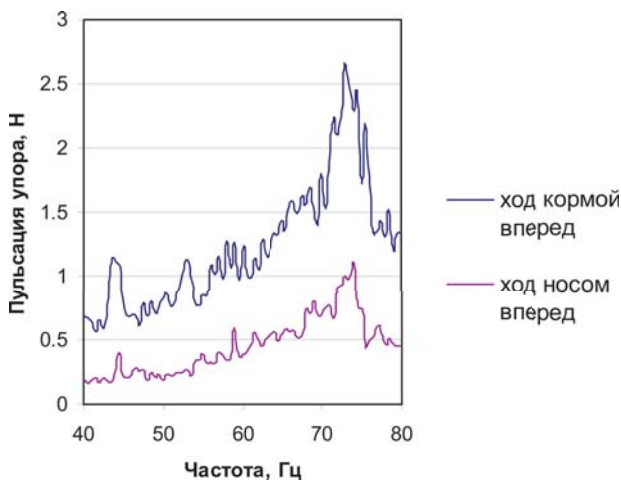


Рис. 11
Типовые спектры пульсации упора, частота вращения винта 15 Гц, число лопастей 5

Из рис. 11 видно, что процесс взаимодействия лопастей со льдом при буксировке модели корпуса, как и следовало ожидать, представляет собой широкополосный случайный процесс, спектральная плотность которого, возрастает в районе лопастной частоты. В связи с этим далее под значением продольной возмущающей силы понимается среднее квадратичное значение пульсации упора в полосе частот, составляющей $\pm 10\%$ от лопастной частоты.

Реализация этого направления исследований является дорогостоящей, поскольку кроме моделей гребных винтов требуется изготовление модели корпуса судна.

3 Оценка параметров вибрации

Описанные выше теоретические и экспериментальные исследования механизма возникновения периодических ледовых нагрузок на гребном винте позволили получить значения этих нагрузок и их спектральный состав, после чего может быть выполнена оценка параметров вибрации судна. В качестве объекта расчета вибрации был выбран арктический танкер длиной 280 м. Расчет выполнен с помощью программного комплекса ANSYS с использованием трехмерной расчетной модели для режимов плавания по чистой воде, а также при плавании в сплошном льду толщиной 0,9 и 1,5 м. В расчетах учитывались гидродинамическая и ледовая составляющие возмущающих сил. Расчетные уровни вибрации кормовой оконечности судна и надстройки показаны на рис. 12.

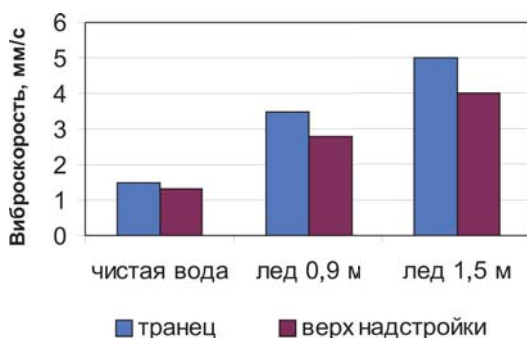


Рис. 12
Расчетные уровни вибрации лопастного порядка

Результаты расчета показывают, что учет ледовых вибрационных нагрузок для рассматриваемого судна, в диапазоне расчетных ледовых условий, приводит к 3–4- кратному увеличению общей вибрации корпуса.

4 Заключение

В работе представлен комплексный подход, включающий три направления исследования проблемы определения периодических ледовых нагрузок на гребных винтах ледоколов и судов ледового плавания. Каждое направление имеет свои ограничения, одновременно дополняя общую картину изучаемого сложного процесса.

Применение теоретической модели позволяет оценить ледовые нагрузки на гребном винте в процессе фрезерования льда в зависимости от его геометрии и параметров взаимодействия (поступь гребного винта, величина погружения лопасти в лед). Вместе с тем, неопределенность величин контактных давлений в зоне контакта лопастей гребного винта со льдом является основным ограничивающим фактором использования только теоретического подхода для определения ледовых нагрузок на гребном винте.

Удобство экспериментального изучения фрезерования изолированным гребным винтом льда заключается в том, что в одном поле моделированного льда можно получить довольно большое количество экспериментальных точек с вариацией кинематических параметров взаимодействия (частоты вращения гребного винта и его поступательной скорости). Довольно большой объем экспериментальной информации позволяет установить корреляционные связи между величинами ледовых нагрузок и параметрами взаимодействия. При построении амплитудно-частотных характеристик ледовых нагрузок следует иметь в виду, что записи процессов получены при условии неподвижности фрезеруемого блока льда и постоянности глубины внедрения лопасти в лед.

Буксировочные испытания модели корпуса с работающими движителями позволяют исследовать уровни ледовых нагрузок на гребных винтах и их спектральный состав в моделируемых ледовых условиях с учетом влияния корпуса конкретного судна. При этом реализуются наиболее близкие к натурным условиям сценарии взаимодействия блоков льда с гребными винтами. Основной недостаток этого подхода заключается в значительной трудоемкости и дороговизне его реализации, а также в сложности обработки полученного экспериментального

материала. Однако ограничения использования первых двух подходов свидетельствуют о необходимости развития и этого направления.

Важнейшее практическое применение рассмотренные подходы к определению периодических ледовых нагрузок на винтах имеют при оценке параметров вибрации корпуса судна на стадии проектирования. Рассмотренная методология дает возможность оценивать вибрацию судов различных ледовых категорий с учетом локальной геометрии кормовой оконечности и геометрии винтов, а также особенностей режимов их эксплуатации.

Список литературы

1. Boudanov D.A., Nikolsky Y.A. Ship hull vibrations underway in ice. Proc. Int. Conf. On Development and Commercial Utilization of Technologies in Polar Region. St. Petersburg, 1996.
2. Matusiak J. Dynamic Loads And Response of Ship During Continuous Icebreaking. Fifth Int. Offshore Mech. & Arctic Eng. Symp. Vol. IV, ASME, 1986.
3. Merculov V., Pasumansky E., Serov A. Ice Loads and Requirements to the Shafts Strength of Icebreakers and Ice-going Vessels, ICETECH-2000, St. Petersburg, 2000.
4. Ягодкин В.Я. Аналитическое определение момента сопротивления вращению гребного винта при его взаимодействии со льдом // Проблемы Арктики и Антарктики. – 1964. – № 13.
5. Belyashov V.A. Method for calculating ice loads encountered by propeller blades. Proc. 12th Int. Conf. on Port and Ocean Eng., POAC-93. – Hamburg, 1993. – Vol. 2, pp. 359 – 368.
6. Игнатьев Н.А. Гребные винты ледоколов. – Л., 1966.

*Е.М. Анполонов, А.В. Дидковский, М.А. Кутейников,
А.Б. Нестеров, Е.А. Шишенин*

ОБЕСПЕЧЕНИЕ АВАРИЙНОЙ ПРОЧНОСТИ КРУПНОТОННАЖНЫХ АРКТИЧЕСКИХ ГАЗОВОЗОВ ПРИ НЕСТАНДАРТНЫХ СЦЕНАРИЯХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СО ЛЬДОМ

1 Введение

В связи с необходимостью вывоза природного газа с арктического шельфа и побережья России стала актуальной проблема создания крупнотоннажных арктических газозовов, способных эксплуатироваться не только в сравнительно легких условиях Баренцева моря, но и в гораздо более тяжелых условиях Карского моря, а в перспективе – по всей трассе Северного морского пути (СМП). Между тем опыт создания и эксплуатации подобных судов в настоящее время отсутствует.

Крупнотоннажные газозовы относятся к числу наиболее высоко-технологичных судов, что обусловлено, в том числе, необходимостью обеспечить безопасность при транспортировке столь опасного груза как сжиженный природный газ (СПГ). Проектирование газозова для Арктики должно учитывать дополнительные сложности, связанные с низкими температурами и ледовыми нагрузками. Кроме того, необходимо обеспечить сохранность вкладных емкостей для сжиженного газа под действием экстремальных ледовых нагрузок. Если для обычного судна ледового плавания при появлении ледовых повреждений в виде глубоких вмятин потребуется лишь ремонт большего объема, то для арктического газозова это способно привести к значительным деформациям вкладных емкостей для сжиженного газа, нарушению их герметичности и, при утечке газа в атмосферу, повлечь за собой крупномасштабную техногенную аварию с тяжелыми последствиями. Определение максимально возможных ледовых нагрузок, способных хотя бы однократно воздействовать на судно за весь период эксплуатации, а также прогнозирование поведения конструкции двойного борта в области глубоких пластических деформаций невозможны без

выполнения специальных исследований. Такие исследования должны обеспечивать решение следующих задач:

расчетное определение ледовых нагрузок при аварийных режимах движения – ударе корпуса на высокой скорости о лед большой толщины (что недопустимо с точки зрения эксплуатационных ограничений);

разработка уточненной модели для определения нагрузок при нестандартных сценариях ледового взаимодействия, таких как отраженный удар о лед при движении в канале за ледоколом и ледовое сжатие;

конечноэлементный анализ напряженно-деформированного состояния двойного борта грузового отсека под действием ледовых нагрузок, соответствующих указанным выше сценариям.

2 Расчетное определение ледовых нагрузок для аварийных режимов движения

Как уже указывалось выше, повышенная ответственность конструкций, ограждающих системы хранения СПГ (вкладные емкости) обуславливает целесообразность оценки ледовых нагрузок на аварийных режимах движения (АРД), соответствующих удару на высокой скорости о толстый лед. Подобная задача является новой, поэтому устоявшаяся методология ее решения отсутствует. Исходя из общих соображений, можно полагать, что толщина льда на аварийных режимах должна учитывать возможность удара о консолидированный торос или смерзшийся наслоенный лед, то есть может быть принята на уровне удвоенной толщины льда, встречающейся в районах эксплуатации. В рамках консервативного подхода полагается, что толщина наслоенного льда равна удвоенной толщине ровного льда, встречающегося в рассматриваемом районе в экстремальные по тяжести ледовых усилений навигации. Скорость судна при аварийном ударе, соответствующем неожиданному столкновению со льдом при движении на чистой воде, предварительно может быть принята на уровне 7–12 уз., увеличиваясь с ростом номера категории ледовых усилений. В первом приближении можно предложить назначать параметры АРД в соответствии с приведенными в табл. 1.

**Параметры аварийных режимов движения
для проверки прочности районов вкладных емкостей**

Категория ледовых усилений		Ice2	Ice3	Arc4	Arc5	Arc5	Arc6	Arc7
Район эксплуатации		Замерзающие неарктические моря		Баренцево море		Карское море		
Толщина льда h , м		2,5	2,5	3,5	3,5	6	6	6
Скорость хода v	уз.	7	8	9	10	10	11	12
	м/с	3,60	4,12	4,63	5,14	5,14	5,66	6,17

Определение параметров ледовой нагрузки может быть осуществлено с использованием программы, разработанной в ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова и являющейся составной частью программного комплекса «РУСЛАН», сертифицированного ГУ Российского морского регистра судоходства (РМРС).

3 Ледовые нагрузки при отраженном ударе о лед (1-ый нестандартный сценарий)

Для оценки ледовых нагрузок на бортовое перекрытие в районах хранилищ СПГ помимо аварийных режимов движения целесообразно рассмотреть также нестандартные сценарии ледового взаимодействия, в частности, ледовое сжатие во льдах значительной толщины (см. ниже), а также так называемый отраженный удар о лед, возможный при движении в ледовом канале, проделанном ледоколами. Отраженный (вторичный) удар – это удар о противоположную кромку канала, следующий после прямого (первичного) удара. Такой удар в обязательном порядке рассматривается при регламентации ледовой прочности ледоколов.

Отраженный удар при движении в канале характерен, в основном, для арктических судов, однако, поскольку рассматриваются весьма маловероятные сценарии, выполняется расчет и для неарктических категорий **Ice2**, **Ice3**. Скорость должна быть несколько снижена по сравнению с АРД, поскольку при движении в ледовом канале суда редко разгоняются до 12 уз., как из соображений безопасности, так и вследствие наличия в канале битого льда. Поэтому оба события – разгон судна до высокой скорости и реализация отраженного удара – являются относительно редкими и их одновременное осуществле-

ние маловероятно. В первом приближении можно принять расчетную скорость газовоза в ледовом канале на уровне 4–7 уз. Впрочем, опыт эксплуатации крупнотоннажных газовозов в Арктике пока не накоплен, поэтому любая принимаемая оценка достаточно условна.

Рассмотрение отраженного удара о наслоенный лед представляется нецелесообразной по следующим причинам. Развитие такого сценария предполагает совместную реализацию следующих трех событий:

- судно попадает в ледяные поля экстремальной толщины, существенно большей, чем разрешено условиями эксплуатации;

- судно при движении в проложенном двумя ледоколами канале испытывает отраженный удар;

- отраженный удар происходит именно о тот участок кромки канала, где имеется наслоенный лед (лед удвоенной толщины).

Каждое из этих событий хоть и является редким и маловероятным, может произойти по крайней мере один раз за срок эксплуатации судна.

Попадание судов категории **Л1** (соответствует современному **Arc4**) в очень толстые льды имело место в экстремальную по тяжести ледовых условий навигацию 1983 г. Отраженный удар при плавании в канале за ледоколом является нарушением правильной эксплуатации судна, однако полностью исключить такую возможность нельзя. В условиях сильных сжатий наслоенные участки могут образовываться и в достаточно толстых ледяных полях, хотя и реже, чем в тонких.

Тем не менее, каждое из указанных событий является достаточно редким, так что их совместная реализация уже настолько маловероятна, что не должна включаться в рассмотрение.

Что касается единовременной реализации первых двух событий, то есть попадания в экстремальный лед и реализации отраженного удара, то она представляется гораздо более вероятной. В самом деле, при попадании судна в экстремальные ледовые условия, можно ожидать, что движение будет осуществляться по каналу, проложенному двумя ледоколами. При этом можно ожидать определенной спешки и нервозности со стороны судоводителя, испытывающего большую психологическую нагрузку, вызванную опасной обстановкой.

В таких условиях повышается вероятность реализации отраженного удара о лед, являющегося следствием ошибки судоводителя. Учитывая изложенное, аварийный сценарий отраженного удара о лед следует рассматривать для экстремального льда одинарной толщины, без учета возможности удара о наслоенный лед двойной толщины.

На основании изложенного можно в первом приближении принять параметры режимов движения в канале для расчета отраженного удара в соответствии с табл. 2. По мере накопления опыта регламентации конструктивной безопасности арктических газовозов эти данные могут уточняться. Определение параметров ледовой нагрузки может быть проведено с использованием программы, разработанной в ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова и являющейся составной частью программного комплекса «РУСЛАН», сертифицированного ГУ РМРС.

Таблица 2

Режимы движения в ледовом канале для расчета отраженного удара

Категория ледовых усилений		Ice2	Ice3	Arc4	Arc5	Arc5	Arc6	Arc7
Район эксплуатации		Замерзающие неарктические моря		Баренцево море		Карское море		
Толщина льда h , м		1,25	1,25	1,75	1,75	3	3	3
Скорость хода v	уз.	4	4,5	5	6	6	6,5	7
	м/с	2,06	2,31	2,57	3,09	3,09	3,34	3,60

4 Ледовые нагрузки при ледовом сжатии (2-ой нестандартный сценарий)

Оценка нагрузок от ледовых сжатий в явном виде отсутствует в действующих Правилах РМРС. Регламентация ледовых нагрузок на средний район ледовых усилений в зоне переменных ватерлиний носит эмпирический характер и основывается на обобщении существующего опыта ледовой эксплуатации традиционных судов. Этот опыт показывает, что в среднем районе не наблюдается повреждений корпусных конструкций с относительно большой протяженностью деформированной зоны, которые могут быть идентифицированы с воздействием нагрузок от сжатия. Однако крупнотоннажные суда имеют повышенную опасность ледовых сжатий. Из-за большой длины корпуса традиционный способ освобождения судна путем обколки ледоколом может оказаться малоэффективным. В связи с этим требуется совершенствование существующих моделей ледовых сжатий применительно к крупнотоннажному судну.

Исходя из общих представлений об особенностях плавания во льдах различных судов, можно предположить, что для крупнотоннажных газовозов опасность попадания в ледовый плен и восприятия интенсивных нагрузок от сжатия во льдах возрастает.

Ледовая нагрузка на среднюю часть корпуса судов в случае ледовых сжатий может быть применена для регламентации расчетных ледовых нагрузок на районы хранилищ СПГ кормовое мидель-шпангоута.

Как показывает наблюдение за процессом взаимодействия льда с вертикальной (или близкой к вертикальной) плоскостью борта судов или стенки морских сооружений, процесс разрушения льда при ледовом сжатии (дрейфе ледового поля) сводится к последовательному откалыванию секторов с кромки ледового поля (рис. 1). Поэтому расчетным случаем взаимодействия корпуса со льдом в случае ледового сжатия будет деформирование ледового клина, образующегося на границе двух секторов.

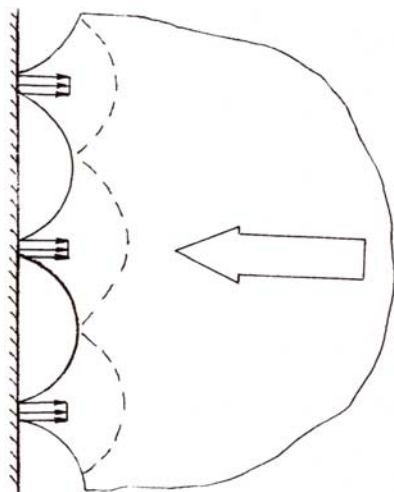


Рис. 1
Разрушение ледового поля путем выламывания секторов

После первого контакта ледового клина с корпусом судна происходит местное разрушение льда на острие клина и образование вместо острого угла плоской кромки длиной l . Затем происходит сжатие льда на длине l , при котором возрастание l протекает гораздо медленнее. Одновременно с ростом l наблюдается возрастание контактного давления в зоне взаимодействия ледового клина с корпусом, сопровож-

дающееся локализацией зоны контакта по высоте, вызванной частичным разрушением нижних, менее прочных слоев льда. Необходимо отметить, что прочность нижних слоев льда снижается из-за постоянного контакта с морской водой, имеющей положительную температуру. В результате локализации зоны контакта развивается внецентренно приложенная ледовая нагрузка интенсивности p , приводящая (в силу внецентренности приложения и сложного изгиба ледяной пластины) к разрушению льда в форме выламывания очередного сектора.

Таким образом, на основании изложенного выше сценария разрушения льда, наблюдений за характером выламывания секторов и оценок с использованием МКЭ, выполнявшихся специалистами ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова (см. статью в настоящем сборнике: Апполонов Е.М., Нестеров А.Б., Тимофеев О.Я. «Регламентация ледовых нагрузок на вертикальный борт при сжатии во льдах»), можно оценить расчетные параметры ледовой нагрузки при сжатии (рис. 2).

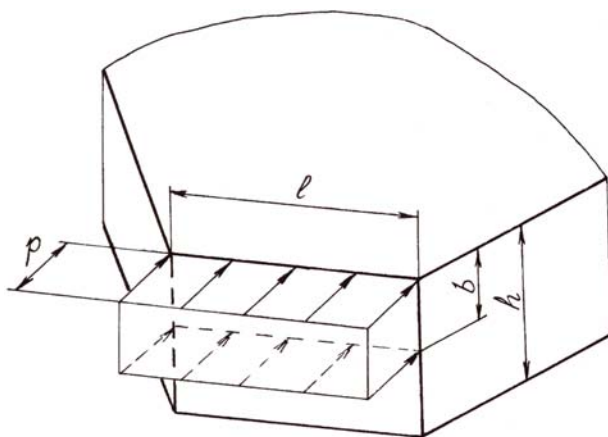


Рис. 2
Параметры ледовой нагрузки
при взаимодействии ледового клина с вертикальным бортом

Ледовое давление p должно быть не менее предела прочности на смятие нижних слоев льда, взаимодействующих с морской водой, и не более предела прочности на смятие верхних слоев льда, опресненных за счет перетекания рассола и охлаждаемых атмосферным

воздухом. Это позволяет оценить границы измерения p диапазоном $0,5 \div 5$ МПа.

Высота распределения ледовой нагрузки в долях толщины льда может быть оценена в диапазоне $0,4 \leq b/h \leq 0,8$, при этом меньшие значения b/h соответствуют более раннему разрушению ледового покрова и потому менее опасны.

Длина распределения ледовой нагрузки в долях толщины льда может быть в первом приближении с ошибкой в безопасную сторону оценена как $l \approx 2,5 \cdot h$. При проверке прочности бортового перекрытия, ограждающего мембранные емкости для хранения СПГ, необходимо учитывать, что в принципе возможно одновременное интенсивное взаимодействие с двумя и более расположенными рядом ледовыми выступами (см. рис. 1). Поэтому расчетная ледовая нагрузка в этом случае должна приниматься в виде чередующихся прямоугольных пятен, отстоящих друг от друга на величину c (см. рис. 3), которая не может быть менее $2h$.

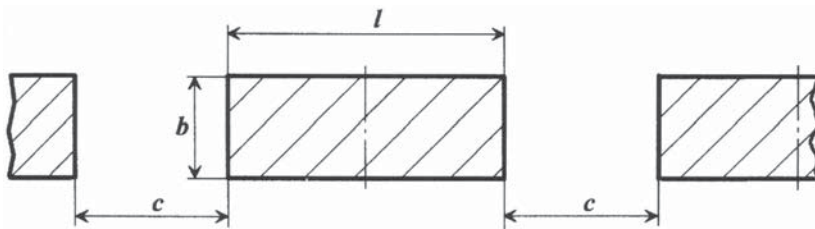


Рис. 3

Расчетная нагрузка от ледового сжатия в виде чередующихся пятен

В рамках принятых допущений специалистами ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова был выполнен специальный анализ, позволивший получить для Баренцева и Карского морей в качестве оценки сверху параметры ледовой нагрузки от ледовых сжатий, которые указаны в табл. 3. В этой же таблице выполнено их сопоставление с нагрузками на средний район крупнотоннажных газовозов (водоизмещением 100 000 т) по Правилам РМРС, показавшее, что нагрузки по Правилам РМРС имеют значительно большую длину распределения. Поэтому погонная нагрузка q определяется как $q = p \cdot b$ для нагрузки по Правилам РМРС и по формуле $q = pbl / (l + 2h)$ с учетом приложения нагрузки от ледового сжатия в виде чередующихся пятен.

Таблица 3

**Сопоставление расчетных значений параметров ледовой нагрузки
для морей российской Арктики с нагрузками на средний район
крупнотоннажных газозовов (водоизмещением 100 000 т) по Правилам РМРС**

Параметр ледо- вой нагрузки	h (м)	p (МПа)	b (м)	l (м)	q (МН/м)	$q/q_{\text{карск}}$
Баренцево море	1,10	3,55	0,71	2,75	1,40	0,368
Карское море	2,20	4,38	1,56	5,50	3,80	1
Газовоз Arc4	–	1,29	1,19	10,5	1,54	0,405
Газовоз Arc5	–	2,02	1,40	10,5	2,83	0,745
Газовоз Arc6	–	3,10	1,65	10,5	5,10	1,342

Как видно из табл. 3, для крупнотоннажных газозовов нагрузка от ледового сжатия может превзойти расчетную по Правилам РМРС только при эксплуатации газозовов **Arc4**, **Arc5** в Карском море. При этом следует учитывать, что толщины льда для определения нагрузки от ледовых сжатий соответствуют экстремальной навигации, а как следует из табл. 2.2.3.4-1 части I «Классификация» Правил классификации и постройки морских судов, эксплуатация судов указанных категорий в Карском море в зимний период экстремальной навигации запрещена даже в сопровождении ледокола, а тем более – при самостоятельном плавании. Таким образом, для эксплуатирующегося в соответствии со своей ледовой категорией крупнотоннажного газозова нагрузка от ледового сжатия не представляет опасности. Тем не менее, поскольку нагрузки для проверки конструктивной безопасности во всех случаях носят аварийный характер, для газозовов низших ледовых категорий можно рассмотреть и нагрузки при сжатии, соответствующие арктическим морям и типам навигации, при которых их эксплуатация не разрешена.

5 Конечноеэлементный анализ напряженно-деформированного состояния двойного борта

Конечноеэлементный анализ напряженно-деформированного состояния конструкций двойного борта газозовов производится с помощью конечноеэлементных моделей (КЭМ) бортовых перекрытий газозова. В состав КЭМ бортовых перекрытий, ограниченных по длине

судна поперечными переборками, как правило, включаются конструкции скуловых цистерн и конструкции тронка, если таковой имеется.

При формировании расчетной модели отсека двойного борта принимается, что все его основные элементы, обеспечивающие прочность конструкции (листы обшивки, стенки и свободные пояски элементов набора), моделируются оболочечными элементами постоянной толщины. В библиотеке конечных элементов ANSYS такой элемент хранится под именем Shell181 (см. рис. 4). Элемент имеет четыре узла и шесть степеней свободы в каждом узле: перемещения в направлении осей X, Y и Z узловой системы координат и повороты вокруг осей X, Y и Z узловой системы координат.

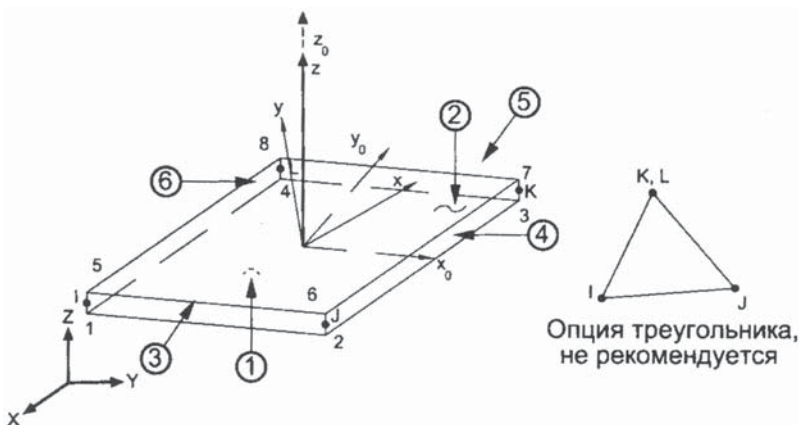


Рис. 4
Геометрия элемента SHELL181

Исключение составляет моделирование элементов набора, изготовленных из полособульбов. Стенка полособульба моделируется с помощью элемента Shell181, головка – с помощью стержневого элемента Link8 (см. рис. 5). Модели полособульбов показаны на рис. 6. Моделируются: момент инерции поперечного сечения полособульба и площадь поперечного сечения работающая на срез.

5.1 Получение конечноэлементной сетки.

КЭМ отсеков двойного борта строятся, начиная с объектов самого низкого порядка. Сначала задаются ключевые узлы, затем – связанные с ними линии (см. рис. 7, 11) и поверхности (см. рис. 8, 12).

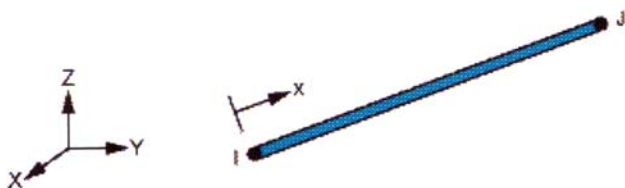


Рис. 5
Геометрия элемента Link8

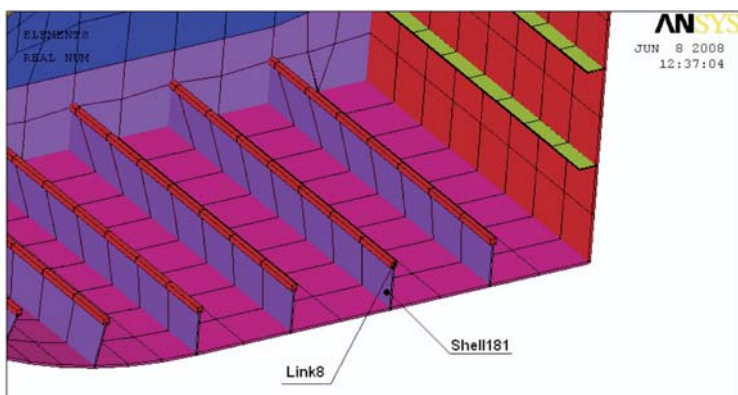


Рис. 6
Модели полособульбов

Положение ключевых узлов для отсеков вне цилиндрической вставки определяется с помощью теоретического чертежа корпуса газозова.

Поверхности, представляющие собой срединные поверхности листов обшивки, стенок и свободных поясков элементов набора, разбиваются на конечные элементы (предпочтительно прямоугольники) – в результате чего в распоряжении пользователя оказывается КЭМ бортового перекрытия (см. рис. 9, 13).

Размеры конечных элементов выбираются, исходя из имеющейся практики подобных расчетов напряженно-деформированного состояния объемных отсеков, одобренных Российским морским регистром судоходства. Принято, что максимальный размер стороны конечного элемента равен 400 мм. Используется автоматический генератор сетки.

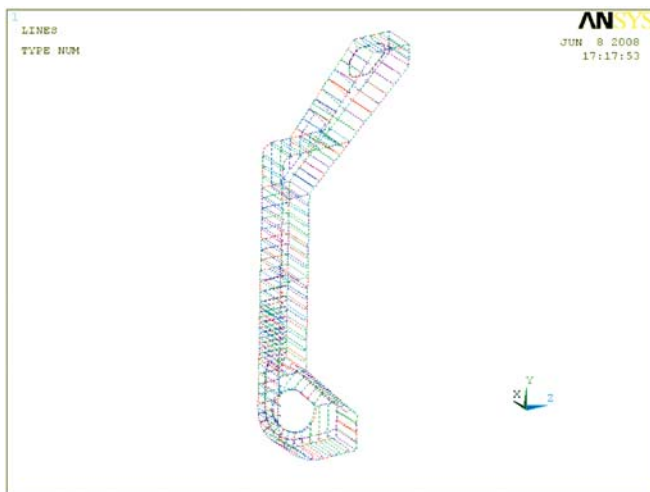


Рис. 7

Линии, использованные при построении модели рамной шпации бортового перекрытия трюма в районе цилиндрической вставки



Рис. 8

Поверхности, с помощью которых моделировалась рамная шпация бортового перекрытия трюма в районе цилиндрической вставки



Рис. 9
КЭМ рамной шпации бортового перекрытия трюма в районе цилиндрической вставки



Рис. 10
КЭМ бортового перекрытия газовоза для трюма в районе цилиндрической вставки

Относительно просто получаются КЭМ в районе цилиндрической вставки корпуса. Для этого достаточно построить КЭМ одной рамной шпации (см. рис. 7–9), которую потом можно «размножить» и получить КЭМ бортового перекрытия, показанную на рис. 10. КЭМ, показанная на рис. 10, состоит 89600 конечных элементов, а система линейных уравнений, которую необходимо решить для раскрытия ее статической неопределимости, содержит 432000 неизвестных.

Построение КЭМ бортового перекрытия вне района цилиндрической вставки требует гораздо больших трудозатрат, поскольку в этом случае каждая поверхность КЭМ является уникальной и не удастся воспользоваться операцией «размножения». Порядок построения КЭМ в этом случае показан на рис. 11–13 (66000 элементов и 324500 неизвестных).

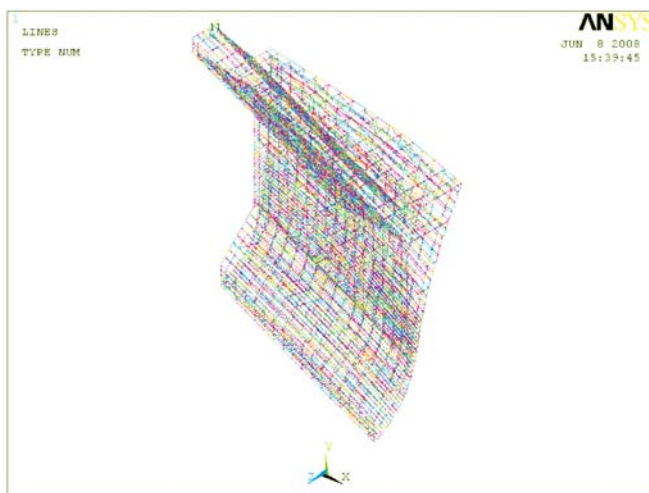


Рис. 11

Ключевые узлы и связанные с ними линии для отсека вне цилиндрической вставки

5.2 Моделирование нагрузки.

Ледовые нагрузки, действующие на отсек, задаются в виде равномерных давлений, приложенных по нормали к поверхности конечных элементов моделирующих отсек. Приложение давления к бортовой обшивке подразделяется на три этапа:

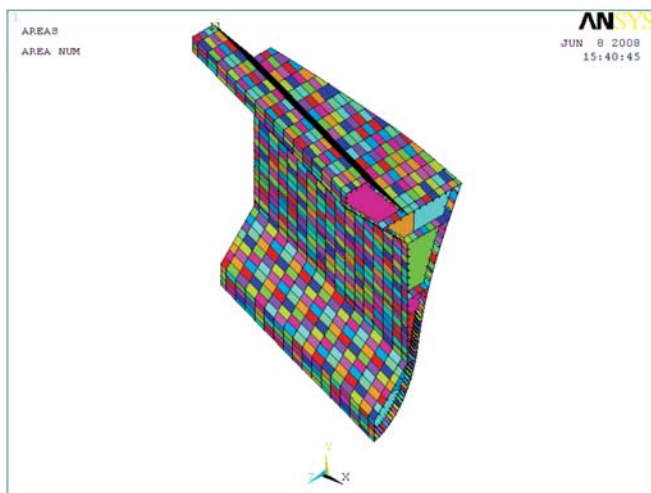


Рис. 12
Поверхности для отсека вне цилиндрической вставки,
натянутые на линии, показанные на рис. 11

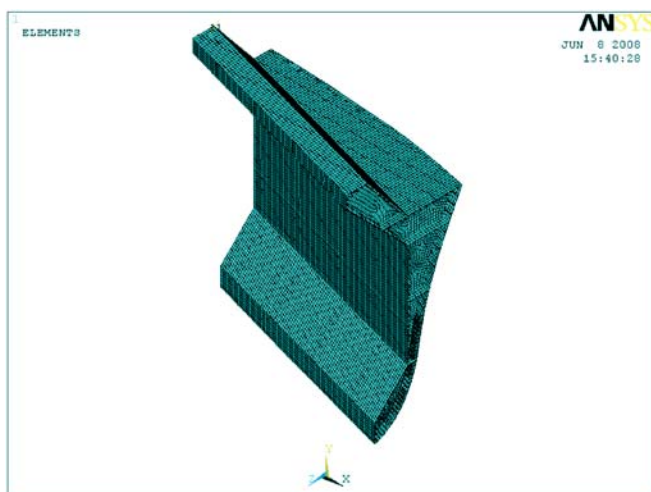


Рис. 13
КЭМ бортового перекрытия газовеоза для трюма вне цилиндрической вставки

предварительный отбор конечных элементов, попадающих в границы района приложения нагрузки;

поскольку, давлением загружается вся площадь конечного элемента, то площадь пятна приложения нагрузки, по сравнению с заданной, как правило, несколько увеличивается. Поэтому, с целью сохранения величины нагрузки, действующей на перекрытие, величина давления может быть несколько изменена;

приложение давлений к выбранным элементам КЭМ – см. рис. 14.

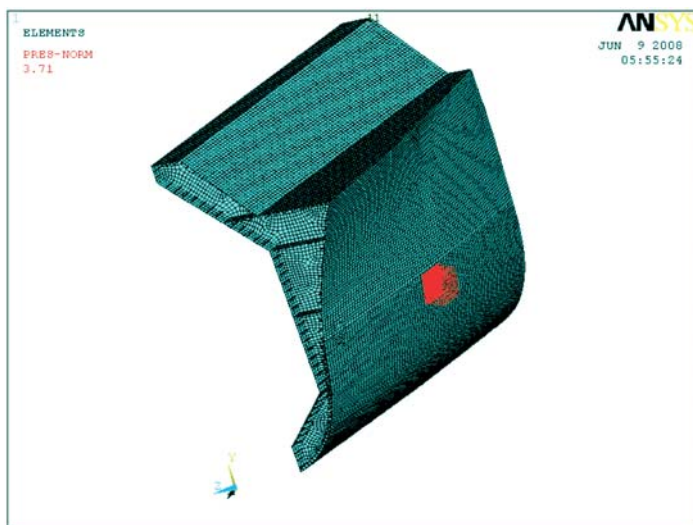


Рис. 14

КЭМ бортового перекрытия трюма с приложенной ледовой нагрузкой.
Приведена интенсивность действующей нагрузки в МПа

5.3 Задание граничных условий.

Граничные условия для элементов бортового перекрытия, задаются в виде ограничений, наложенных на перемещения линий и ключевых узлов геометрической модели. Перекрытия рассчитываются при следующих граничных условиях:

сечения перекрытий, совпадающие с поперечными переборками, считаются жестко заделанными в отношении линейных перемещений;

бортное перекрытие считается жестко заделанным на днищевом перекрытии (см. рис. 15);

бортное перекрытие считается свободно опертым на перекрытии тронка (см. рис. 15).

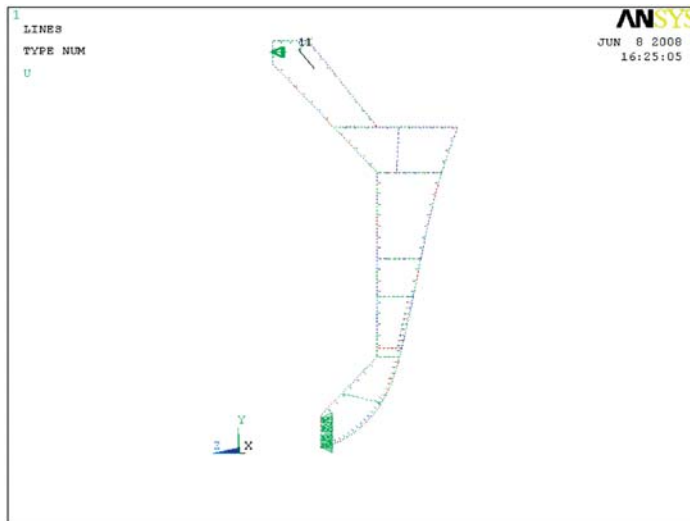


Рис. 15
Граничные условия для отдельно взятого рамного шпангоута
в составе бортового перекрытия

5.4 Решение задачи с учетом наличия пластических деформаций и деформационного упрочнения материалов.

Известно, что нелинейное поведение материалов может привести к изменению жесткости конструкции под действием приложенной нагрузки. Так, нелинейная зависимость деформации от напряжения для пластичных материалов заставляет конструкцию различным образом реагировать на внешние силы; уровень остаточной деформации определяется величиной приложенных сил.

Поведение металлов под действием приложенных сил описывается деформационной кривой, на которой можно выделить несколько характерных точек и участков:

до предела пропорциональности деформация металла подчиня-

ется линейному закону;

до предела упругости величина остаточной деформации пренебрежимо мала, и поведение металла мало отличается от линейного;

выше предела упругости и до предела текучести металл деформируется нелинейно;

увеличение внешней нагрузки свыше предела текучести и вплоть до предела прочности приводит к интенсивному пластическому деформированию, которое характеризуется накоплением остаточной деформации; данный процесс является неконсервативным и должен подвергаться нелинейному анализу.

Из нескольких возможных способов был выбран способ билинейной аппроксимации пластического течения материалов.

Билинейная аппроксимация отражает обычное нагружение металлических конструкций и предполагает, что деформационная кривая в истинных координатах «напряжение (σ) – логарифм деформации ($\epsilon = \ln(l/l_0)$)» состоит из двух линейных участков с одной критической точкой пересечения, соответствующей пределу текучести. Данный способ аппроксимации позволяет учитывать эффект Баушингера и применим для деформаций, когда поведение металла контролируется критерием пластичности фон Мизеса. Кривая деформации при билинейном нагружении представлена на рис. 16.

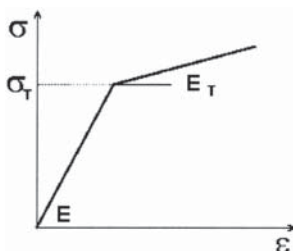


Рис. 16
Билинейная диаграмма σ – ϵ

В общем случае используется диаграмма при $E = 206\,000$ МПа, $E_T = 1000$ МПа. Решение задачи производилось итерационным методом Ньютона-Рафсона, который предполагает приближенное разбиение нагрузки на несколько последовательных приращений.

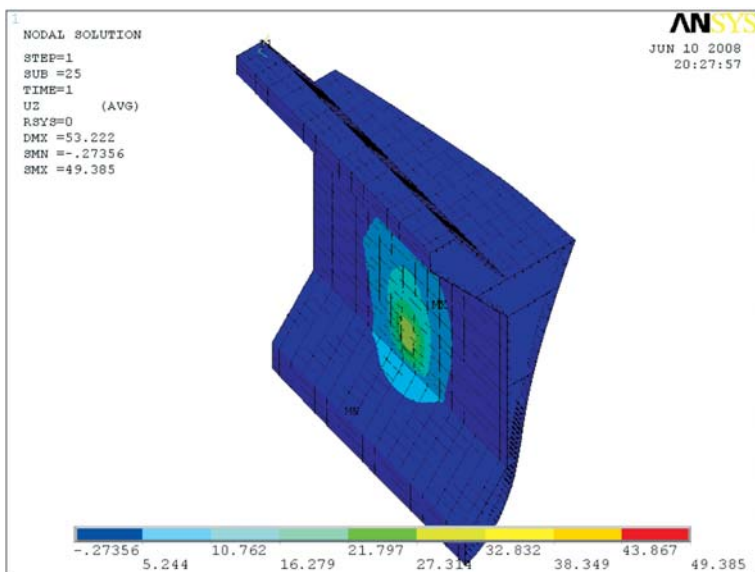


Рис. 17
Изозначения U_z -перемещений в направлении оси OZ, мм,
для внутреннего борта трюма вне цилиндрической вставки

5.5 Представление результатов расчета.

При решении нелинейных задач, используя процессор Time-History, имеющийся в ANSYS, можно построить кривые «нагрузка–перемещение» для заданных узлов КЭМ. При построении кривых «нагрузка–перемещение» по оси абсцисс обычно откладывается прогиб, мм, а по оси ординат – доля действующей нагрузки (от 0 до 1). С помощью кривых «нагрузка–перемещение» пользователь может определить предельную нагрузку перекрытия (см. рис. 18).

Кроме того, может быть построено в виде полей изозначений (или изолиний) распределение по элементам КЭМ:

U_x , U_y , U_z проекций вектора перемещений на оси координат;

суммарных перемещений $U_{sum} = \sqrt{U_x^2 + U_y^2 + U_z^2}$;

эквивалентных напряжений $\sigma_e = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \sigma_y + 3\tau_{xy}^2}$,

где σ_x и σ_y – нормальные напряжения в оболочечных элементах;

τ_{xy} – касательные напряжения в оболочечных элементах;

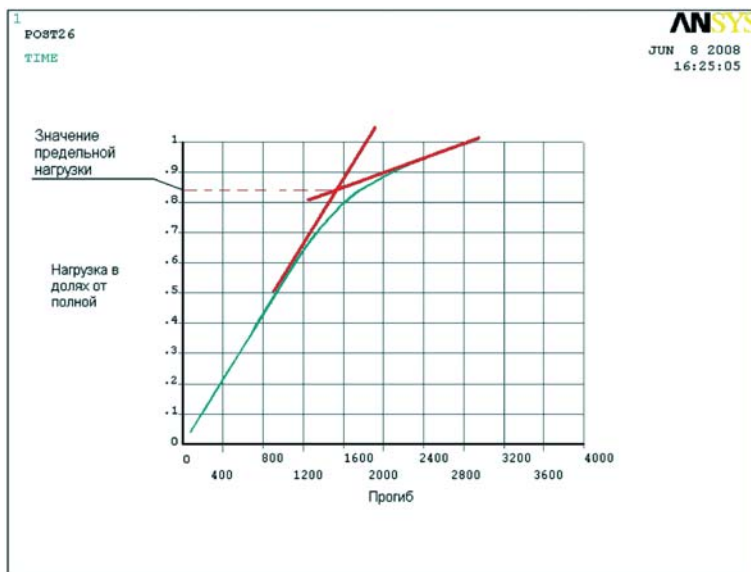


Рис. 18

Пример кривой «нагрузка–перемещение», построенной для узла перекрытия с наибольшим значением прогиба. Приведены построения, позволяющие определить предельную нагрузку перекрытия

эквивалентных деформаций (the von Mises or equivalent strain)

$$\varepsilon_e = 1/(1 + \nu) \sqrt{0,5 [(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2]},$$

где $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ – главные деформации (principal strains);
 ν – коэффициент Пуассона.

Если результаты конечноэлементного анализа показывают достаточность прочности двойного борта газовеоза для восприятия аварийных нагрузок, становится актуальной задача определения коэффициента запаса по нагрузке для наиболее неблагоприятного случая. С этой целью необходимо оценить отношение допустимого прогиба внутреннего борта к величине максимального прогиба в области нагрузок, превышающих аварийную (см. рис. 19).

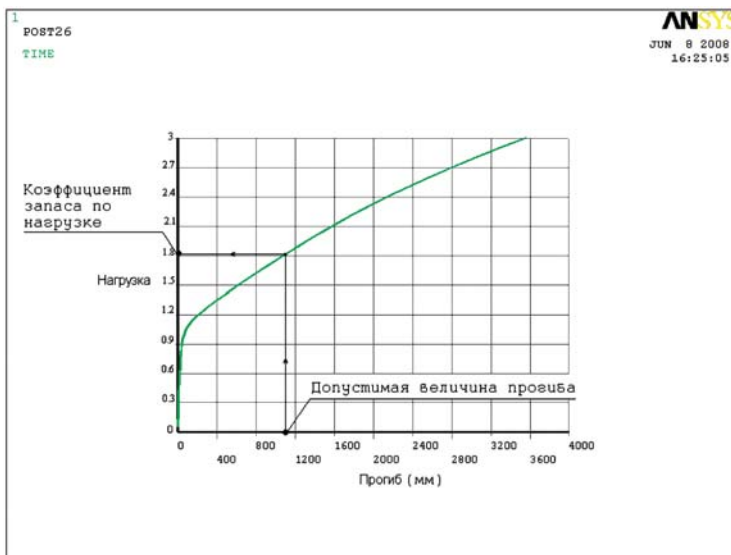


Рис. 19

Кривая «нагрузка–перемещение» в области нагрузок, превышающих аварийную

6 Заключение

Описанная в настоящей статье методология назначения расчетных параметров аварийных и нестандартных сценариев ледового взаимодействия позволяет получить исходные данные для вычисления ледовых нагрузок для проверки конструктивной безопасности вкладных емкостей СПГ. Определение параметров ледовой нагрузки может быть осуществлено с использованием существующих программ, реализующих алгоритм гидродинамической модели удара судна о лед.

Рассмотрены нагрузки, возникающие при сжатии во льдах. Использование расчетной модели, учитывающей локализацию зоны контакта по высоте, вызванную частичным разрушением нижних, менее прочных слоев льда, позволило определить расчетные значения нагрузок ледового сжатия.

Выполненные исследования особенностей глубокого пластического деформирования конструкций двойного борта под действием ледовой нагрузки позволяют конкретизировать процедуру оценки

последствий реализации аварийных и нестандартных сценариев для корпусов арктических газовозов.

Список литературы

1. Б а с о в К.А. ANSYS // Справочник пользователя. – М.: Из-во ДМК, 2005.

РЕГЛАМЕНТАЦИЯ ЛЕДОВЫХ НАГРУЗОК НА ВЕРТИКАЛЬНЫЙ БОРТ ПРИ СЖАТИИ ВО ЛЬДАХ

Введение

Суда активного ледового плавания малых и средних водоизмещений традиционно имеют наклонный борт, чтобы снизить нагрузки в средней части судна при ледовых сжатиях появлением вертикальной силы, ломающей лед изгибом. Суда больших водоизмещений имеют в средней части вертикальный борт по условиям вместимости и технологическим ограничениям. Попытки регламентации расчетных ледовых нагрузок от сжатий для вертикального борта, предпринимавшиеся до настоящего времени, базировались на использовании механизма разрушения льда выкрашиванием (crushing) и, следовательно, предполагали назначение расчетного давления как средней прочности льда на сжатие в направлении, параллельном поверхности, и расчетной высоты нагрузки, близкой к толщине льда [1 – 3]. При этом в отечественной практике длина пятна контакта считается бесконечной [2, 3].

Модель, учитывающая неравномерность свойств по толщине льда

Анализ реального взаимодействия вертикального борта с ледовым полем во время сжатий показывает, что лед разрушается крупными секторами с появлением «изгибной» компоненты напряженно-деформированного состояния. Размер сектора в районе вертикального борта меньше, чем размер сектора в районе наклонного борта, где появляются вертикальные силы. Цель представляемого исследования – объяснить наблюдаемый механизм разрушения льда у вертикального борта и разработать модель ледовых нагрузок при воздействии сжатий на вертикальный борт.

Разрушение льда по «изгибной» форме при взаимодействии с вертикальным бортом может быть объяснено следующими положениями.

1. Физико-механические свойства морского льда существенно отличаются по толщине льда из-за разной температуры слоев льда и разной солености и, как следствие, разной структуры. В частности, в направлении, параллельном поверхности, прочность на сжатие верхних слоев льда выше, чем аналогичная прочность на сжатие нижних слоев льда. Основной причиной такого положения является разность температур верхних и нижних слоев льда. Нижние слои имеют температуру, близкую к температуре морской воды у поверхности (от $-1,5^{\circ}\text{C}$ до $-1,0^{\circ}\text{C}$). Температура верхних слоев близка к температуре воздуха, что для арктических условий может составлять ниже -40°C . Представляемая модель ледовых контактных нагрузок на вертикальный борт предполагает: прочность льда на параллельное сжатие льда распределена линейно по толщине льда. Распределение прочности льда на параллельное сжатие по толщине показано на рис. 1. Приняты следующие обозначения:

– предел прочности льда на параллельное сжатие в верхнем слое ровного льда;

$\sigma_{c,d}$ – предел прочности льда на параллельное сжатие в нижнем слое ровного льда;

$\sigma_{b,d}$ – предел прочности льда на изгиб в нижнем слое ровного льда;

h – толщина ровного льда.

Принятые обозначения и предположения позволяют записать:

$$\sigma_c(y) = \sigma_{c,d} + (\sigma_{c,u} - \sigma_{c,d}) \cdot y/h. \quad (1)$$

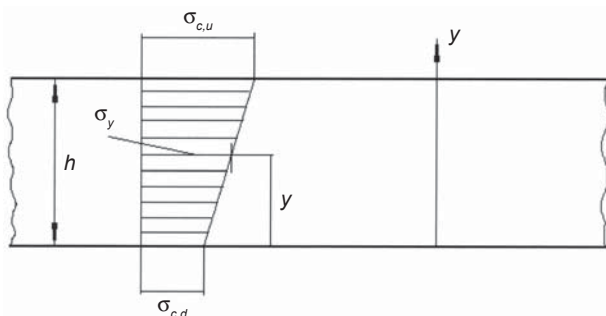


Рис. 1
Распределение прочности льда на сжатие
в направлении, параллельном поверхности по толщине

2. Контакт вертикального борта с ледяным покровом для любого момента времени приводит к следующим контактным нагрузкам (рис. 2).

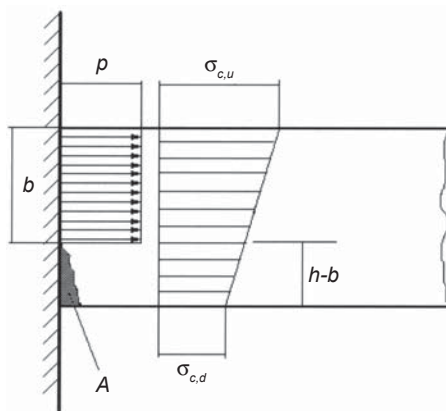


Рис. 2

Схема контактных ледовых нагрузок при взаимодействии с вертикальным бортом:
 p – контактное давление; b – высота пятна контакта; A – зона разрушенного льда

При росте среднего контактного давления в нижних слоях льда, для которых выполняется условие

$$p > \sigma_c(y), \quad (2)$$

происходит разрушение кристаллов льда (область A на рис. 2) и контактное давление перераспределяется на высоту b , меньшую, чем толщина льда h .

3. Рост контактного давления при дальнейшем уменьшении высоты пятна нагрузки приводит к появлению зоны растягивающих σ_z напряжений на нижней поверхности льда в направлении, перпендикулярном плоскости вертикального борта (рис. 3).

Появление и рост трещины на нижней поверхности льда происходит, если напряжения превышают предел прочности льда на изгиб «снизу» $\sigma_{b,d}$:

$$\sigma_z > \sigma_{c,d}. \quad (3)$$

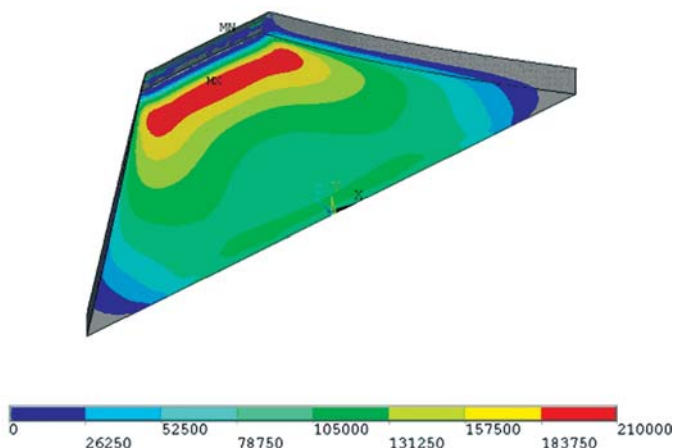


Рис. 3
Расчетная диаграмма напряжений σ_z на нижней поверхности ледяного сектора

Значение $\sigma_{b,d}$ зависит от температуры нижних слоев льда (практически постоянной), солёности и определяется в натурных условиях тестом изгиба «клавиши» силой, направленной вверх. Появление сквозной трещины в направлении, перпендикулярном поверхности льда, приводит к нарушению его сплошности, падению контактного давления на вертикальный борт и появлению нового сектора, который, как правило, выжимается над верхней поверхностью льда.

4. Контактная область образуется на другом секторе, который появляется у борта при приближении кромки льда. Процесс трансформации контактной нагрузки повторяется с последующим сбросом нагрузки.

Дальнейшее развитие алгоритма расчета ледовых нагрузок требует генерации зависимостей между ключевыми параметрами: p – контактным давлением, b – высотой пятна контакта и σ_z – максимальным растягивающим напряжением на нижней поверхности льда в направлении, перпендикулярном борту.

Построение зависимостей между величинами p , b , σ_z / базировалось на серийных расчетах ледяной пластины. Форма пластины в плане – симметричная трапеция (см. рис. 3). Нагружение производится по короткой кромке трапеции. Такая форма ледяной пластины соответствует физической картине разрушения льда у вертикального

борта с образованием ледовых секторов. Величина угла между непараллельными сторонами трапеции принималась равной 90° и 120° . В расчете варьировалась относительная высота пятна нагрузки b/h и относительная длина пятна нагрузки l/h . Давление $p = 1$ МПа принималось постоянным, модуль Юнга льда задавался $E = 1 \cdot 10^9$ Па. Расчетным путем было проверено геометрическое подобие картины напряженно-деформированного состояния, то есть при одинаковых b/h и l/h значения напряжений σ_z не менялись для различных толщин льда. Пластина моделировалась твердотельными конечными элементами, расчеты проводились в упругой области. Сопоставление результатов для различных углов ледового клина позволило в качестве расчетного выбрать угол 120° , что соответствует большим нагрузкам на вертикальный борт при сжатии. Соответствующие зависимости σ_z/p от b/h и l/h , построенные по данным серийных расчетов показаны на рис. 4. Необходимо отметить, что район, в котором величина σ_z достигает максимума, расположен вблизи нагруженной кромки. Такая картина подтверждается экспериментами в ледовом бассейне ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, показывающими, что размеры выломанных льдин при взаимодействии с вертикальным бортом действительно относительно невелики.

При анализе полученных выше результатов конечноэлементных расчетов необходимо иметь в виду следующие обстоятельства. Форма ледовой кромки, взаимодействующей с корпусом судна, может быть достаточно разнообразна. Так, в начале процесса ледового сжатия возможно взаимодействие с достаточно ровной на определенном участке длины ледовой кромкой, приводящей к появлению достаточно протяженных по длине ледовых нагрузок (см. рис. 5 а). Расчетная модель для этого случая в дальнейшем именуется моделью № 1. Возможна также иная форма ледовой кромки, состоящая из последовательных заостренных выступов, образованных пересечением границ отколотых ледовых секторов (см. рис. 5 б). Такая кромка образуется в результате прокладывания канала ледоколом, а также может образоваться в процессе сжатия во льдах в результате разрушения первоначальной ровной кромки путем выламывания секторов. При взаимодействии такой кромки с вертикальным бортом происходит постепенное нарастание длины зоны взаимодействия l путем постепенного разрушения (выкрашивания) острого выступа. При этом для каждой длины зоны взаимодействия l реализуется весь диапазон возможных значений высоты зоны распределения b за счет выкрашивания льда снизу вверх. Поскольку, как видно из рис. 4, наибольшие значения из-

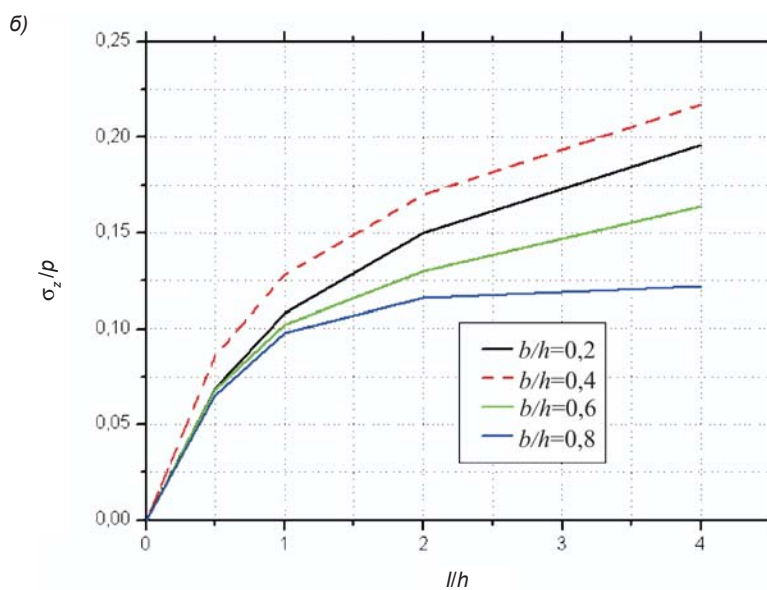
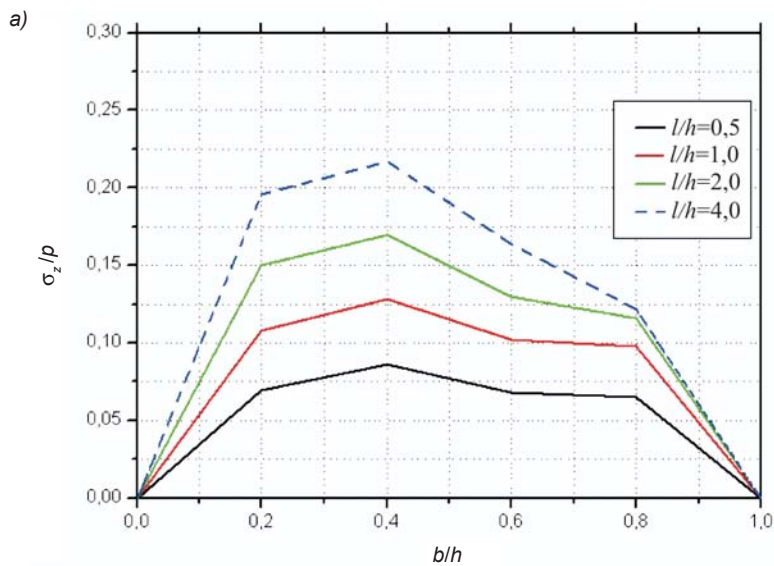


Рис. 4
Зависимость σ_z/p от b/h (а) и l/h (б)

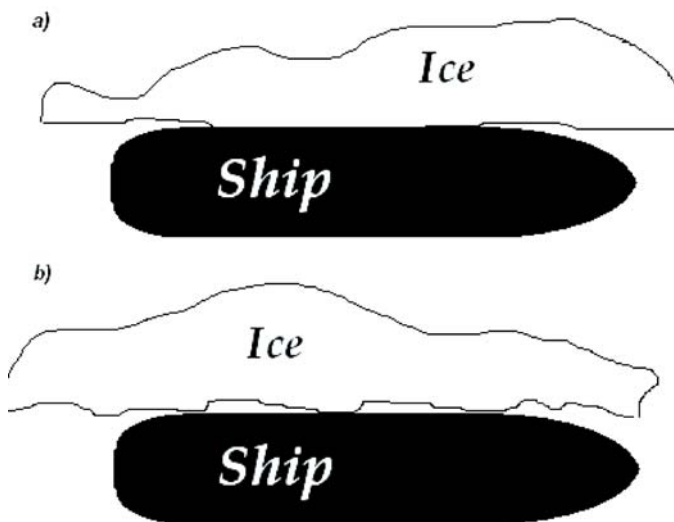


Рис. 5
Взаимодействие судна с ледовой кромкой:
а) модель № 1, б) модель № 2

гибных напряжений реализуются при $b = 0,4 h$, можно полагать, что при разрушении кромки из последовательных выступов соотношение b/h , соответствующее выламыванию следующего сектора, известно и составляет $b/h = 0,4$. Расчетная модель, соответствующая такому подходу, называется в дальнейшем моделью № 2.

Поскольку как форма первоначальной ледовой кромки, так и характер ее изменения в процессе взаимодействия с вертикальным бортом могут быть весьма различны, практически возможна реализация как модели № 1, так и модели № 2. Поэтому для определения параметров максимально возможной ледовой нагрузки при сжатии во льдах необходимо рассмотреть обе эти модели.

Расчетная модель с постоянным l/h

Детальный анализ картины разрушения, получаемый конечно-элементным анализом показывает, что область максимальных напряжений разделяется на две области при больших l/h . Физически это означает, что при значительном разделении областей максимальных

изгибных напряжений сброс нагрузки происходит разрушением двух секторов по вертикальным границам области контакта, что приводит к ограничению длины области контакта. Анализ результатов проведенного численного моделирования и опыт натурных наблюдений показал, что реально ожидать сброс нагрузки разрушением изгиба одного сектора до величины, соответствующей $l/h = 2,5$. Для $l/h = 2,5$ линейной интерполяцией была получена зависимость $\sigma_z(b/h)$ и аппроксимирована кубическим полиномом (рис. 6). Такая аппроксимация приводит к следующему уравнению:

$$\frac{\sigma_z(b/h)}{p} = a_0(b/h) + a_1(b/h)^2 + a_2(b/h)^3, \quad (4)$$

где $a_0 = 0,97647$, $a_1 = -1,5315$, $a_2 = 0,55671$ – коэффициенты кубического полинома.

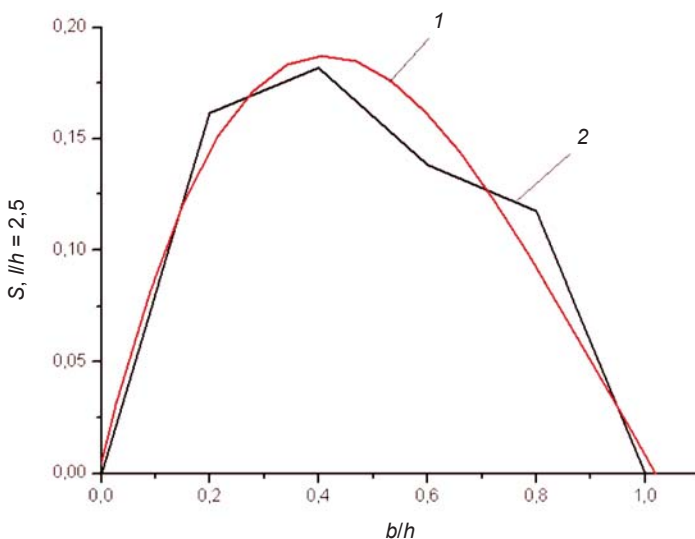


Рис. 6
Аппроксимация исходной зависимости $\sigma_z(b/h)$ (2) кубическим полиномом (1)

Применяя зависимости (1 – 3) для p от b/h из физической модели разрушения, можно получить:

$$p = \sigma_{c,u} - (\sigma_{c,u} - \sigma_{c,d}) \cdot (b/h). \quad (5)$$

Далее получим уравнение для относительной высоты пятна контакта b/h :

$$\sigma_{b,d} = [a_0 (b/h) + a_1 (b/h)^2 + a_2 (b/h)^3] \cdot [\sigma_{c,u} - (\sigma_{c,u} - \sigma_{c,d}) \cdot (b/h)]. \quad (6)$$

Уравнение четвертой степени относительно b/h . В качестве параметров в него входят только характеристики прочности льда $\sigma_{c,u}$, $\sigma_{c,d}$, $\sigma_{b,d}$. Дальнейшая параметризация решения возможна относительно показателей:

$$\gamma = \sigma_{c,u} / \sigma_{c,d} \quad \text{и} \quad \beta = \sigma_{b,d} / \sigma_{c,d}. \quad (7)$$

Тогда ледовое давление вычисляется при заданном γ через соотношение $p/\sigma_{c,d}$:

$$p/\sigma_{c,d} = \gamma - (\gamma - 1) \cdot (b/h). \quad (8)$$

Относительная высота ледовой нагрузки напрямую зависит от γ .

$$[\gamma - (\gamma - 1) \cdot (b/h)] \cdot [a_0 (b/h) + a_1 (b/h)^2 + a_2 (b/h)^3] = \beta. \quad (9)$$

Результаты численного решения уравнения относительно b/h в зависимости от γ для $\beta = 0,3$ приведены на рис. 7. Обоснование принятого значения $\beta = 0,3$ дано ниже. График зависимости, приведенной на рис. 7, был аппроксимирован функцией:

$$b/h = 0,72951 - 1,12202 \cdot e^{-\gamma/1,48818}. \quad (10)$$

Относительное среднее давление в пятне контакта с использованием приведенных выше зависимостей и функции $b/h(\gamma)$ позволяет получить функцию, связывающую $p/\sigma_{c,d}$ и γ (рис. 8). При этом безразмерная погонная нагрузка $q = (p/\sigma_{c,d}) \cdot (b/h)$ изменяется по закону, показанному на рис. 9.

Таким образом, предлагаемая последовательность расчета параметров локальных ледовых нагрузок при постоянном $\beta = 0,3$ на вертикальный борт по модели № 1 при заданных условиях внешней среды:

$\sigma_{c,d}$ – предел прочности льда на параллельное сжатие в нижнем слое ровного льда, МПа;

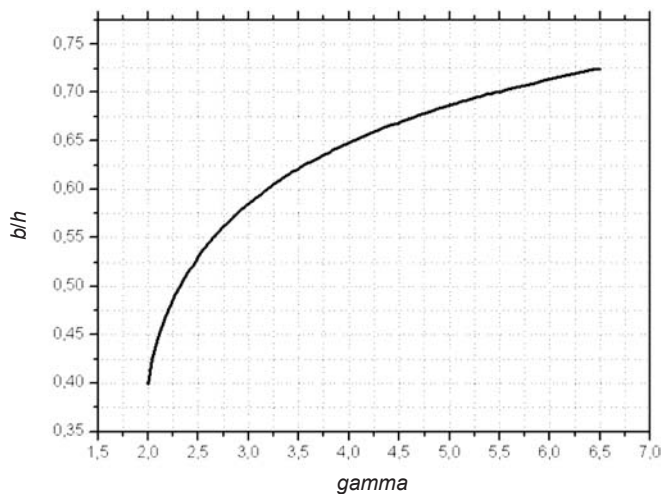


Рис. 7
Зависимость относительной высоты пятна нагрузки b/h
от относительной прочности верхнего и нижнего слоев льда $\gamma = \sigma_{c,u}/\sigma_{c,d}$

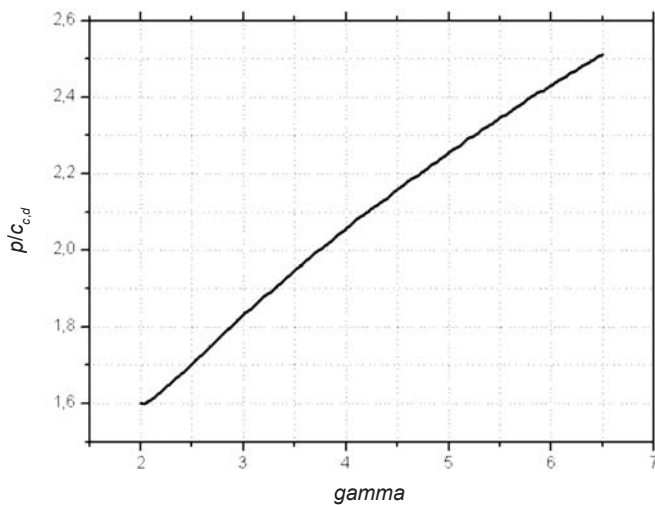


Рис. 8
Зависимость относительного давления $p/\sigma_{c,d}$
от относительной прочности верхнего и нижнего слоев льда $\gamma = \sigma_{c,u}/\sigma_{c,d}$

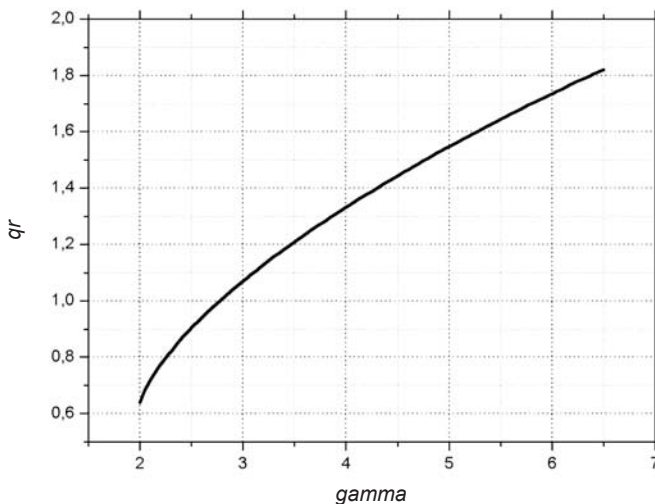


Рис. 9

Зависимость безразмерной погонной нагрузки q от относительной прочности верхнего и нижнего слоев льда $\gamma = \sigma_{c,u}/\sigma_{c,d}$

$\gamma = \sigma_{c,u}/\sigma_{c,d}$ – отношение прочности льда на параллельное сжатие верхнего и нижнего слоя льда;

h – толщина льда, м;

может быть представлена следующим образом:

.1 вычисление по графику рис. 7 или по формуле (10) b/h в зависимости от γ ;

.2 вычисление среднего давления в пятне контакта $p = \sigma_{c,d} \cdot [\gamma - (\gamma - 1) \cdot (b/h)]$;

.3 вычисление высоты распределения нагрузки $b = (b/h) \cdot h$;

.4 длина пятна контакта $l = 2,5 h$.

Расчетная модель с постоянным b/h

Как следует из анализа напряженно-деформированного состояния ледового клина, максимальное значение σ_z/p достигается при $b/h = 0,4$, что использует расчетная модель, описываемая ниже. Для модели № 2 постоянным принимается относительный размер пятна контакта $b/h = 0,4$. В этом случае значение контактного ледового давления принимают следующим:

$$p = 0,4 \sigma_{c,d} \cdot (1,5 \cdot \gamma + 1). \quad (11)$$

Относительное максимальное растягивающее напряжение на нижней поверхности льда $[\sigma_z \cdot (//h)] / p$ в зависимости от размера пятна контакта $//h$ при $b/h = 0,4$ (см. рис. 4 б) может быть аппроксимировано следующей функцией:

$$[\sigma_z \cdot (//h)] / p = k_0 \cdot (//h)^m. \quad (12)$$

С достаточной точностью параметры аппроксимации имеют следующие значения: $k_0 = 0,12372$, $m = 0,41605$.

Введем, аналогично модели № 1, безразмерный параметр β (отношение прочности льда на изгиб к прочности льда на сжатие для нижней поверхности пластины):

$$\beta = \sigma_{b,d} / \sigma_{c,d}. \quad (13)$$

С учетом введенных обозначений легко видеть, что относительная длина пятна контакта может быть найдена как:

$$//h = \left[\frac{\beta}{0,4 \cdot k_0 \cdot (1,5 \cdot \gamma + 1)} \right]^{1/m}. \quad (14)$$

Принимая во внимание полученные параметры аппроксимации k_0 и m , зависимость упрощается:

$$//h = 1358,9398 \cdot \left(\frac{\beta}{1,5 \cdot \gamma + 1} \right)^{2,4}. \quad (15)$$

Вариации значений β и γ приводят к диапазону $//h$, показанному на рис. 10.

Относительное ледовое давление при этом зависит только от γ и изменяется по линейному закону (рис. 11). При больших значениях γ относительное ледовое давление в рамках рассматриваемого варианта больше, чем аналогичное давления в варианте с $//h = \text{const}$. Относительная погонная нагрузка несколько меньше по сравнению с моделью № 1 (рис. 9).

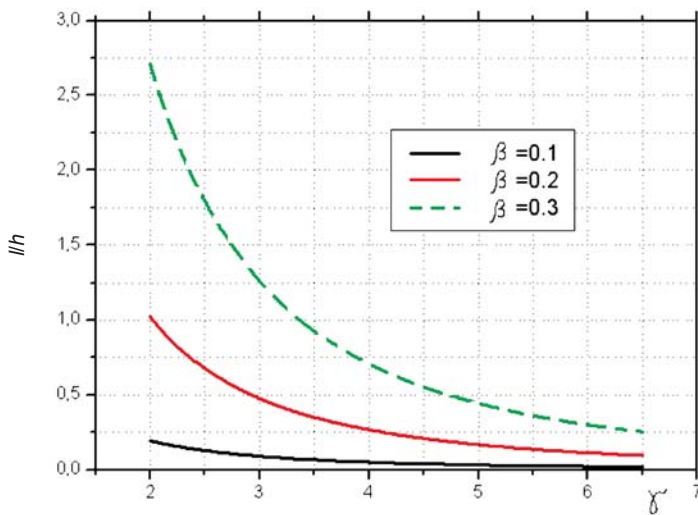


Рис. 10
Зависимость l/h от β и γ

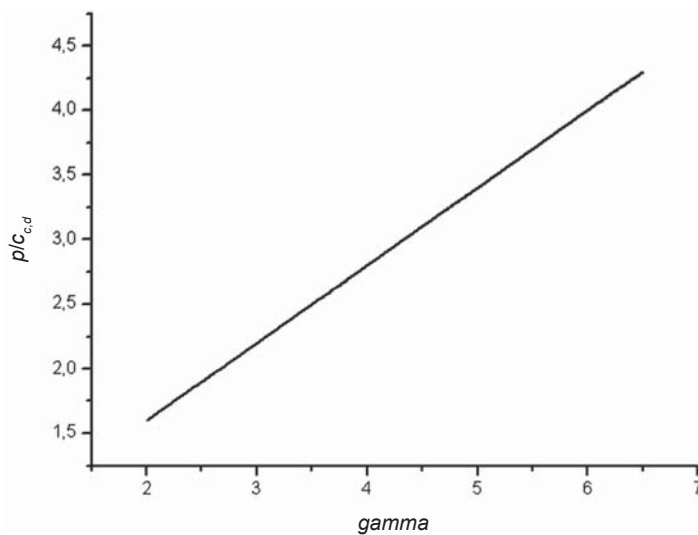


Рис. 11
Зависимость относительного давления $p/\sigma_{c,d}$ от относительной прочности верхнего и нижнего слоев льда γ при $b/h = \text{const}$

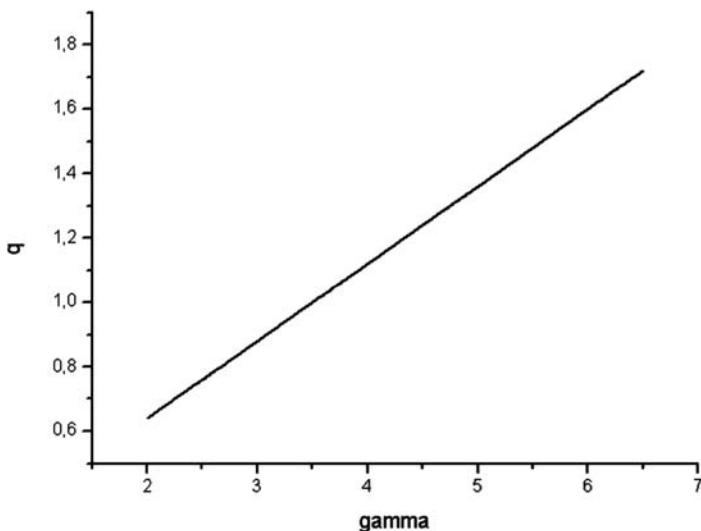


Рис. 12

Зависимость относительной погонной нагрузки q от относительной прочности верхнего и нижнего слоев льда γ при $b/h = \text{const}$

Алгоритм расчета параметров ледовых нагрузок в модели № 2 при постоянном $\beta = 0,3$ и заданных условиях внешней среды:

$\sigma_{c,d}$ – предел прочности льда на параллельное сжатие в нижнем слое ровного льда, МПа;

$\gamma = \sigma_{c,u} / \sigma_{c,d}$ – отношение прочности льда на параллельное сжатие верхнего и нижнего слоя льда;

h – толщина льда, м;

может быть сформулирован следующим образом:

1. $b = 0,4 \cdot h$;
2. ледовое давление $p = 0,4 \sigma_{c,d} \cdot (1,5 \cdot \gamma + 1)$;
3. вычисление по графику рис. 10 (или по зависимости (15)) l/h как функции β и γ ;
4. $l = (l/h) \cdot h$.

Нормативные нагрузки и сопоставление результатов

Процедура определения расчетных нагрузок при сжатии на вертикальный борт в соответствии с разработанными моделями требу-

ет предварительного назначения следующих прочностных свойств льда:

предел прочности льда на изгиб при действии нагрузки снизу вверх («прочность льда на изгиб снизу») $\sigma_{b,d}$;

предел прочности льда на сжатие параллельно поверхности льда в верхних слоях льда $\sigma_{c,u}$;

предел прочности льда на сжатие параллельно поверхности льда в нижних слоях льда $\sigma_{c,d}$.

Остальные параметры модели β и γ являются комбинацией перечисленных физико-механических характеристик льда. Анализ значений физико-механических характеристик льда проводился с использованием [1].

Требуемые прочностные параметры льда назначались, исходя из следующих положений.

1. Прочностные параметры льда зависят в основном от двух характеристик окружающей среды: соленость и температура. Поскольку соленость арктических морей такова, что отличие влияния солености на прочностные свойства льда незначительно для отдельных морей, то для всех арктических морей соленость можно принять одну и ту же.

2. Нижние слои льда находятся при температуре, близкой к температуре морской воды. Температура морской воды зимой в Арктике примерно равна $-1,5\text{ }^{\circ}\text{C} \div -1,8\text{ }^{\circ}\text{C}$. По этой причине значения $\sigma_{b,d}$ и $\sigma_{c,d}$ могут быть приняты постоянными для арктических морей и связаны с температурой морской воды.

3. Прочность льда на изгиб, учитывая крайне низкую трещиностойкость льда, фактически может быть интерпретирована как прочность льда на растяжение. Среднее значение отношения прочности на растяжение к прочности на сжатие составляет примерно 0,13. В модели этот параметр обозначен как β . Поскольку задачей исследования является определение максимальных значений нагрузок при сжатии во льдах, следует принять значение β на верхней границе возможного диапазона изменения, что обеспечит отсутствие ошибки в опасную сторону. С учетом этих соображений можно принять $\beta = 0,3$.

4. Прочность льда на сжатие верхних слоев параллельно поверхности $\sigma_{c,u}$ можно принять зависимой от расчетной температуры зимнего воздуха для соответствующей акватории.

Таким образом, требуется определить зависимость прочности льда на параллельное сжатие от температуры. Сопоставление данных позволило сформировать следующую зависимость прочности льда на параллельное сжатие от температуры:

$$\sigma_c = 0,415 \cdot |T| + 1,17 \quad (\text{МПа}) \quad \text{при } T > -10 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$\sigma_c = 2,1 \cdot \sqrt{|T| - 3,59} \quad (\text{МПа}) \quad \text{при } T < -10 \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (16)$$

где T – температура льда.

Использование зависимости (16) для прочности на параллельное сжатие для нижних слоев льда ($T = -1,5 \text{ } ^\circ\text{C}$) приводит к значению $\sigma_{c,d} = 1,77 \text{ МПа}$.

Значения расчетных температур воздуха для морей российской Арктики приняты по данным анализа, выполнявшегося при разработке действующих требований Правил РМРС к ледовой прочности корпусов судов и ледоколов.

Сопоставление параметров нагрузки согласно модели № 1 и модели № 2, показавшее, что модели № 1 соответствуют большие значения интегральной ледовой нагрузки, а модели № 2 – большее ледовое давление. Расчетные параметры внешней среды, принятые РМРС для морей российской Арктики, позволяют, используя модель № 1, сформировать расчетные ледовые нагрузки на вертикальный борт (табл. 1).

Таблица 1

**Расчетные значения параметров ледовой нагрузки
на вертикальный борт для морей российской Арктики
(h – толщина льда, p – ледовое давление, b – высота пятна нагрузки,
 l – длина пятна нагрузки, P – общая сила, q – погонная нагрузка)**

Акватория	h , м	p , МПа	b , м	l , м	P , МН	q , МН/м
Баренцево море	1,10	3,55	0,71	2,75	6,92	1,40
Карское море	2,20	4,38	1,56	5,50	37,66	3,80
Море Лаптевых и Восточно- Сибирское море	3,70	4,47	2,64	9,25	109,15	6,56
Чукотское море	3,45	3,99	2,39	8,63	82,34	5,30

Выполнено сопоставление результатов прогнозирования ледовых нагрузок, приведенных в табл. 1, с известными экспериментальными данными [6] в координатах «давление–площадь контакта» (рис. 13).

Таким образом, консервативный подход, реализованный при получении результатов табл. 1 и ясно видимый из рис. 13, может быть признан обоснованным.

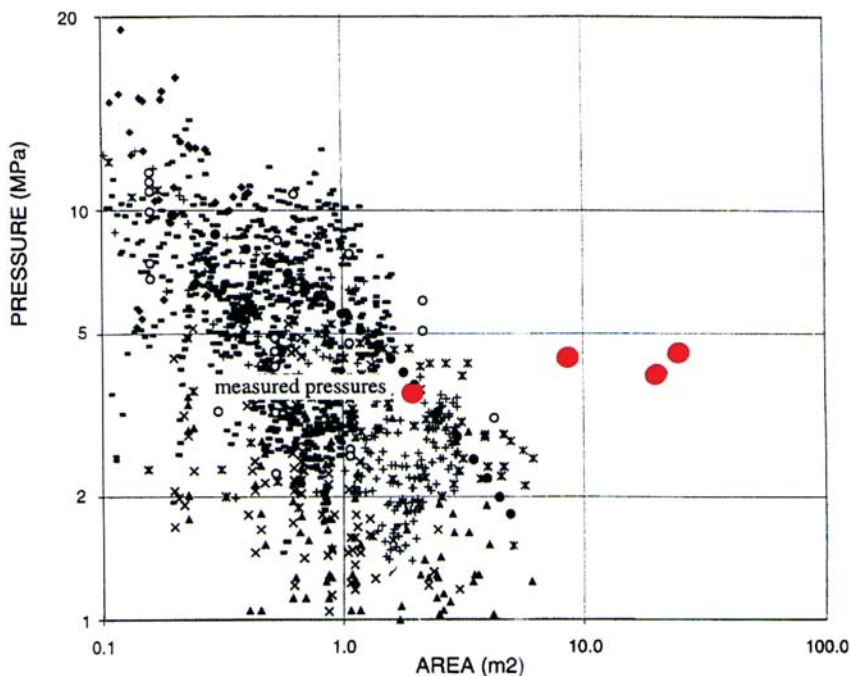


Рис. 13

Сопоставление результатов, полученных с использованием разработанной программы, с известными экспериментальными данными в координатах «давление–площадь»:

● – результаты, полученные с использованием представляемого подхода для морей российской Арктики

Заключение

Представленный метод моделирования ледовых нагрузок при сжатии вертикального борта, в отличие от упомянутых методов, предполагает разрушение льда изгибом. Метод объясняет конечность длины пятна нагрузки и назначение высоты пятна нагрузки, меньшей, чем толщина льда. Расчетные данные показали удовлетворительное совпадение с имеющимся массивом соотношения «ледовое давление – площадь пятна нагрузки». Дальнейшее совершенствование модели требует проведения модельного, а затем и натурного эксперимента на конструкциях борта крупнотоннажных судов.

Список литературы

1. Kendrick, A. Pressured Ice Forces – IACS working group PT49, Pressured conditions report, 2008.
2. Доронин Ю.П., Хейсин Д.Е. Морской лед. – Гидрометеиздат, 1975.
3. Курдюмов В.А. О нагрузках при сжатии судов во льдах // Проблемы проектирования корпусных конструкций / Труды ЛКИ. – Л., 1987.
4. Электрофизические и физико-механические свойства льда / Под ред. Богородского В.В. и Гаврило В.П. – Л.: Гидрометеиздат, 1989.
5. Апполонов Е.М., Нестеров А.Б., Степанов И.В., Тимофеев О.Я. Регламентация допускаемых условий ледового плавания арктических судов // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. – Вып. 3 (287). – СПб., 1996.
6. Masterson D.M., Frederking R. Load contact pressures in ship/ice and structure/ice interactions. – Cold Region Science and Technology, vol. 21, 1993, pp. 169–185.

УДК 621.791.05:539.4

А.В. Ильин, В.П. Леонов, В.Ю. Филин

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ СОПРОТИВЛЕНИЯ ХРУПКОМУ РАЗРУШЕНИЮ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ДЛЯ ШЕЛЬФА АРКТИКИ

Введение

Одной из ключевых проблем материаловедения, решаемой при создании морских технических сооружений для шельфа Арктики, является предотвращение хрупких разрушений при предельно низких климатических температурах (расчетная температура T_p до минус 50 °С для замерзающих бассейнов, до минус 35 °С – для открытых бассейнов). Опасность хрупких разрушений обусловлена достаточно большими толщинами элементов конструкций: до 50 – 70 мм для ледостойких стационарных платформ (ЛСП) и плавучих буровых установок (ПБУ), с отдельными конструктивными элементами до 130 мм, большой протяженностью сварных швов, измеряемой километрами, интенсивными циклическими ветроволновыми и ледовыми нагрузками, приводящими к возможности развития исходных технологических дефектов при эксплуатации. В первую очередь потенциальными зонами возникновения хрупких разрушений являются сварные соединения. Это связано с высокой вероятностью существования технологических дефектов, наличием остаточных сварочных напряжений (ОСН), достигающих в локальных районах предела текучести материала σ_y , а также с пониженной трещиностойкостью металла сварного шва и металла зоны термического влияния (ЗТВ) по сравнению с основным металлом (листовым прокатом) [1].

Одним из элементов системы обеспечения безопасности конструкции является проведение поверочных оценок прочности по критерию предотвращения хрупкого разрушения. Целью таких расчетов является подтверждение правильности выбора материалов и технологических процессов сварки, допустимости нагрузок, определенных при проектировании, определение объемов неразрушающего контроля при строительстве и при обследовании в ходе эксплуатации, определение критериев качества сварных швов. Подобные оценки давно вошли в практику проектирования конструкций ответственного назначения. В соответствии с общими принципами таких расчетов, выполняемых в терминах механики разрушения, определяется допустимый уровень нагрузок, соответствующий условию нераспространения дефекта, рассматриваемого как трещина постулируемых размеров и формы (т. н. «расчетный дефект»). Высокий уровень допускаемых в элементах рассматриваемых конструкций эксплуатационных напряжений σ_d (до $0,8 \dots 0,85\sigma_y$ в штатных условиях эксплуатации, более σ_y – в режимах выживания) [2], суммирующихся с ОСН (σ_r), заставляет рассматривать условие прочности элемента конструкции с трещиной в терминах нелинейной механики разрушения:

$$J \leq [J] = J_{cr}/n, \quad (1)$$

где J – расчетное значение J -интеграла на контуре заданного дефекта;

$[J]$ – допустимое его значение, определяемое как экспериментально найденное значение параметра трещиностойкости материала J_{cr} , деленное на коэффициент безопасности n .

В соответствии с входящими в (1) параметрами, должны быть:

.1 определены процедуры расчета величины J , которые должны начинаться с выбора размера расчетного дефекта;

.2 на основе экспериментальных данных определена величина, которую можно принять за трещиностойкость материала;

.3 выбран коэффициент безопасности.

Необходимо отметить, что проблема выполнения .2 связана с большим рассеянием результатов испытаний при низких климатических температурах, типичным для металла сварных соединений, выполненных даже из наиболее хладостойких материалов [1].

К настоящему времени имеется ряд зарубежных стандартов, определяющих процедуры подобных расчетов для нетермообрабатываемых сварных конструкций. Наиболее часто используемым из них является стандарт [3]. Однако ряд специфических особенностей проведе-

ния расчетных оценок применительно к конструкциям шельфа Арктики требует введения ряда дополнений и уточнений известных расчетных схем, что и является предметом рассмотрения данной работы.

1 Выбор размеров расчетного дефекта

Наиболее мотивированное назначение размеров такого дефекта может быть основано на оценках выявляющей способности, принятой при строительстве методики неразрушающего контроля (НК): из соображений консервативности расчета должно быть принято, что постулируемый дефект принятых размеров должен быть выявлен при НК с вероятностью, близкой к 1. Из тех же соображений дефект должен рассматриваться как трещина наименее благоприятного по отношению к возможности разрушения пространственного положения. В нормах расчетов на прочность оборудования для атомных энергетических установок [4] в качестве расчетного дефекта для элемента конструкции толщиной S принята полуэллиптическая приповерхностная трещина, ориентированная перпендикулярно направлению нагрузки, глубиной $a = 0,25S$ и протяженностью по поверхности (большая ось эллипса) $l = 3a$. Такой подход для всех без исключения ситуаций может быть излишне консервативным. С другой стороны он не учитывает такой фактор, как протяженность сварных швов в конструкции (или объем наплавляемого металла), а также особенности принятой системы НК. Более современные нормативные документы оставляют этот принципиально важный момент расчета на усмотрение Заказчика конструкции, что представляется неприемлемым.

Будем рассматривать в качестве дефектов технологического происхождения, представляющих опасность для целостности конструкций, следующие (рис. 1).

1.1 Дефекты типа подрезов на линии сплавления.

Предельная глубина такого дефекта a может быть принята равной 1 мм согласно существующим нормам НК, рассматривающим такой дефект как допустимый. Можно также принять, что его протяженность по поверхности $l \gg a$ (определение точного размера l не отражается на результате расчета). Исходно такой дефект не должен приводить к разрушению, однако при усталостных нагрузках скорость его развития в зонах концентрации напряжений – концентраторах формы шва, значительно выше, чем для внутренних технологических дефектов. Поэтому возможность его подроста вследствие усталости должна анализироваться. Конечная глубина дефекта является в этом случае раз-

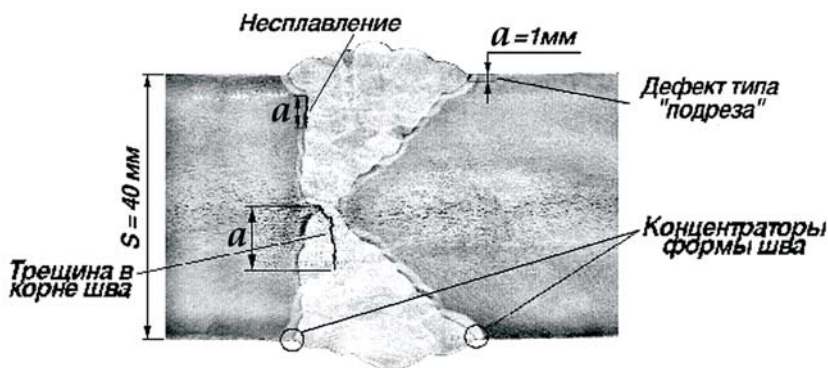


Рис. 1
Наиболее опасные технологические дефекты сварного шва

мером расчетного дефекта a_c , который, из соображений консерватизма оценок, может рассматриваться как бесконечная по протяженности трещина ($l_c \gg a_c$). Учитывая, что усталостная трещина такого происхождения развивается преимущественно вне зоны сварки, в качестве характеристики трещиностойкости в данном варианте расчета представляется допустимым использовать данные для основного металла.

1.2 Технологические дефекты в металле шва или на линии сплавления.

Такого рода дефекты могут представлять опасность как при исходной их геометрии (размеры a , l), так и вследствие их подроста при усталостной нагрузке (размеры a_c , l_c). Расчет следует проводить, используя данные по трещиностойкости металла сварного соединения: металла шва и металла зоны термического влияния, поскольку трещиностойкость основного металла, как правило, выше.

Рассмотрим возможный принцип определения исходных размеров такого расчетного дефекта a , l исходя из существующей практики ультразвукового НК (УЗК), являющегося в настоящее время основным методом НК для морских конструкций, эксплуатирующихся на шельфе, и некоторых данных о фактической дефектности сварных швов.

Основной характеристикой используемой методики УЗК, непосредственно связанной с вероятностью выявления дефектов определенного размера, является поисковая чувствительность, определяемая как площадь s эталонного дефекта. Она назначается в зависи-

мости от S ; например, по руководящему документу [5], использованному при строительстве первой МСП «Приразломная» для Печерского моря, величина s принята равной: 4 мм^2 для $25 \text{ мм} \leq S < 40 \text{ мм}$, 5 мм^2 для $41 \text{ мм} \leq S < 60 \text{ мм}$, 7 мм^2 для $S > 60 \text{ мм}$, то есть увеличивается приблизительно пропорционально S . По экспертным оценкам близкую к 100 % выявляемость при УЗК, в зависимости от контроледоступности, имеет дефект с площадью, на порядок превышающей s .

Принимая далее из соображений наибольшего консерватизма оценок, что отношение размеров дефекта по глубине и протяженности равно 1:3, что обеспечивает максимум J при варьировании отношения a/l для постоянной площади дефекта, и рассматривая его как поверхностную полуэллиптическую трещину (что также соответствует наиболее консервативным оценкам), получим:

$$3\pi a^2/4 \geq 10s. \quad (2)$$

Принимая $s \approx 0,1 \text{ мм} \cdot S$, получим оценку:

$$a = 0,65 \text{ мм}^{0,5} \sqrt{S}, \quad l = 1,95 \text{ мм}^{0,5} \sqrt{S}. \quad (3)$$

Количественная оценка вероятности существования дефектов близких размеров в сварном шве была сделана на основе результатов т. н. испытаний «Nick-Break» (разрыв сварного образца по металлу шва, по сечению, ослабленному острыми боковыми надрезами), проводимых по стандарту API 5L [6] при контроле качества монтажных швов магистрального трубопровода (испытанию подлежал каждый 100-ый стык). Всего было рассмотрено 1250 результатов испытаний образцов в толщинах от 20 до 32 мм. Необходимо подчеркнуть, что испытания были проведены после выполнения УЗК в объеме 100 %, и образцы вырезались из тех зон, где дефекты по данным УЗК отсутствовали. На рис. 2 а представлена гистограмма максимальных размеров, зарегистрированных в изломах дефектов в направлении по толщине (размер a).

Согласно [7], вероятность появления в заданном объеме металла сварного соединения максимального дефекта с размером a более x описывается показательной функцией распределения:

$$P_a |_{a > x} = \exp(-x/x_0), \quad (4)$$

где параметр x_0 равен математическому ожиданию размера дефекта.

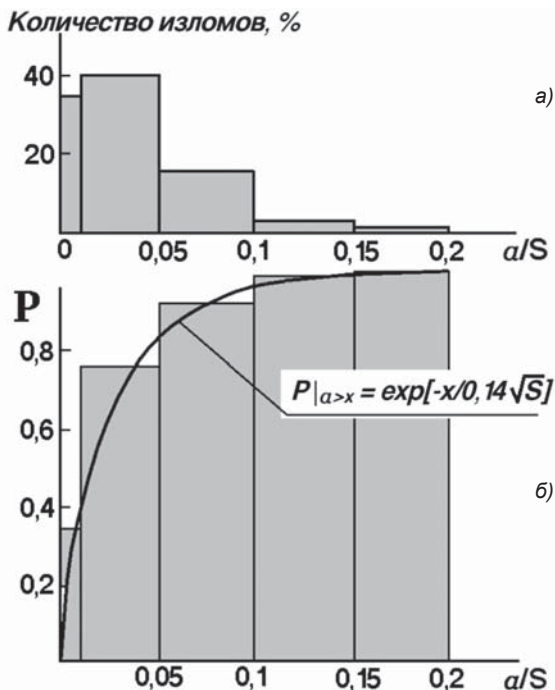


Рис. 2

Распределение по частоте появления максимальных размеров дефектов (а) и аналитическая аппроксимация накопленной вероятности появления дефектов с размером более x (б).

Полученные данные удовлетворительно описываются зависимостью (4) при значении параметра распределения $x_0 = 0,72$ мм. Можно отметить, что всего в результате испытаний было обнаружено 7 дефектов с размерами, превосходящими заданные по (3), что соответствует вероятности 0,0056. Они представляли собой протяженные шлаковые включения, цепочки шлаковых включений и несплавления. Учитывая высказанные соображения, следует полагать, что для различной толщины конструкций значение x_0 должно быть пропорционально $\sqrt{S}$. Принимая, что полученная выше оценка x_0 относится к средней из рассмотренного диапазона толщине 25 мм, получим:

$$P_a|_{a>x} = \exp[-x/(0,14 \text{ мм}^{0,5} \sqrt{S})], \quad (5)$$

где x и S измеряются в мм.

Из (5) следует, что вероятность появления дефекта с размерами, определенными по (3), равна 0,01. Однако такая оценка еще не является достаточно консервативной, поскольку относится к объему металла сварного шва, приблизительно равному $SxSxS$ (ширина испытанных образцов была равна 25 мм). Корректировка размеров расчетного дефекта с учетом фактической протяженности сварных швов может быть выполнена, исходя из следующего соображения: вероятность P^* появления во всех участках шва общим количеством n максимального дефекта с размером менее x при протяженности каждого из участков, равной S , определяется как произведение вероятностей реализации этого события на каждом из участков:

$$P^* = \{1 - \exp[-x / (0,14 \sqrt{S})]\}^n. \quad (6)$$

Тогда связь максимального размера дефекта a с вероятностью P_1 события, заключающегося в том, что в объеме металла шва $SxSxnS$ дефект большего размера отсутствует, выражается формулой:

$$a = 0,14 \text{ мм}^{0,5} \sqrt{S} \cdot \ln(1 - P_1^{1/n}), \quad (7)$$

где $n = L/S$, L – общая протяженность сварных швов, находящихся в приблизительно однородном напряженном состоянии.

В табл. 1 приведены определенные таким образом размеры a , l (определены для большей толщины в заданном интервале), соответствующие значению $P_1 = 0,99$. Достаточность этого значения для обеспечения надежности конструкции рассмотрена ниже.

Таблица 1

Размеры расчетного дефекта

Толщина	Протяженность сварного шва (в толщинах)		
	1	10	100
от 25 до 40 мм	$a = 4,0 \text{ мм},$ $l = 12,0 \text{ мм}$	$a = 6,0 \text{ мм},$ $l = 18,0 \text{ мм}$	$a = 8,0 \text{ мм},$ $l = 24,0 \text{ мм}$
от 41 до 60 мм	$a = 5,0 \text{ мм},$ $l = 15 \text{ мм}$	$a = 7,5 \text{ мм},$ $l = 22,5 \text{ мм}$	$a = 10,0 \text{ мм},$ $l = 30,0 \text{ мм}$
от 61 до 100 мм	$a = 6,5 \text{ мм},$ $l = 19,5 \text{ мм}$	$a = 9,5 \text{ мм},$ $l = 28,5 \text{ мм}$	$a = 13,0 \text{ мм},$ $l = 39,0 \text{ мм}$

Функция распределения, заданная формулой (6), приводит к результатам, близким к оценкам по трехпараметрической функции распределения Вейбулла с параметрами, зависящими от n :

$$P_a|_{a \leq x} = 1 - \exp\{ - [(x - x_{\min}) / (x_0 - x_{\min})]^b \}. \quad (8)$$

Появление третьего параметра распределения ($x_{\min}$) означает, что существует определенный размер дефекта, вероятность появления которого в рассматриваемом объеме металла равна 1. Например, для сварного соединения толщиной 30 мм, протяженностью 30 мм · 100 = 3 м получено: $b = 2,56$, $x_0 = 4,4$ мм, $x_{\min} = 2,05$ мм.

1.3 Анализ возможности роста расчетного дефекта при наличии циклической составляющей нагрузки.

Данный анализ производится по соотношениям механики разрушения. В общем случае размер дефекта a_c в конце периода эксплуатации за N циклов переменной нагрузки определяется интегрированием формулы, связывающей скорость его роста $V_k = da/dN$ с размахом коэффициента интенсивности напряжений $\Delta K = K_{1\max} - K_{1\min}$ в цикле и коэффициентом асимметрии цикла $r = K_{1\min} / K_{1\max}$:

$$\int_a^{a_c} \left(\frac{da}{f(\Delta K, r)} \right) = N. \quad (9)$$

Функция $V_k = f(\Delta K, r)$ характеризуется тремя участками: т. н. припороговой областью малых значений ΔK (пороговое значение $\Delta K = K_{th}$ соответствует нераспространению трещины), т. н. линейным («Пэрисовским») участком, и участком ускоренного роста трещины. В литературе рекомендовано множество аналитических представлений данной функции. Однако для выполнения предельных оценок применительно к нетермообрабатываемым сварным соединениям достаточную точность обеспечивает наиболее простая их них:

$$da/dN = C (\Delta K)^m. \quad (10)$$

Ее приемлемость для данных целей может быть обоснована тем, что для наиболее консервативных оценок должно рассматриваться расположение дефекта в зонах с наиболее высокими ОСН. Так как наибольший вклад в циклическую повреждаемость конструкций, эксплуатирующихся на шельфе, вносят относительно небольшие напря-

жения с высокой повторяемостью, величина r может считаться близкой к 1. Экспериментально показано (см. рис. 3) что при таком режиме нагружения наблюдается резкое снижение величины K_{th} , что может интерпретироваться как расширение диапазона применимости зависимости (10) при параллельном ее смещении относительно данных, полученных при стандартном для таких испытаний режиме нагрузки с $r = 0$. Для верхней огибающей данных по кинетике усталостной трещины при $r \rightarrow 1$ для судокорпусных сталей и материала их сварных соединений авторами рекомендуются следующие значения коэффициентов в формуле (9) в единицах измерения [мм/цикл], [МПа $\sqrt{м}$]: $C = 4,7 \cdot 10^{-8}$, $m = 2,7$.

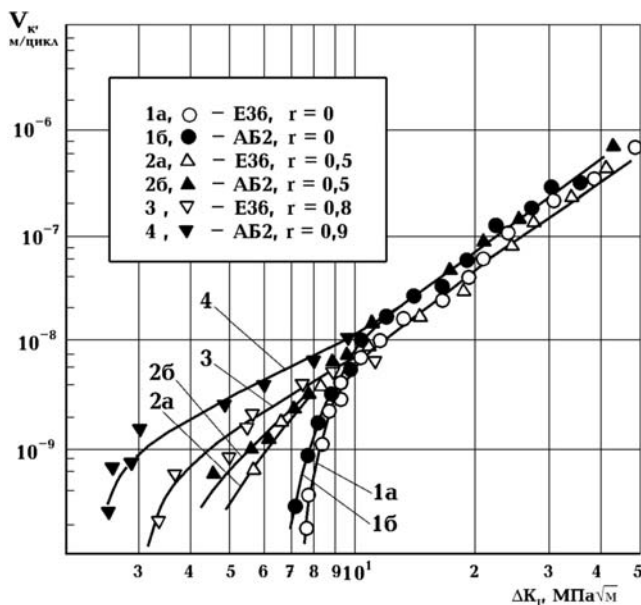


Рис. 3

Экспериментальные данные по скорости роста усталостной трещины в судокорпусных сталях при варьируемом коэффициенте асимметрии цикла r

Для расчетного дефекта первого типа (бесконечная по протяженности трещина в концентраторе формы шва) величина ΔK_I должна

определяться с введением поправочной функции Y_1 , учитывающей концентрацию напряжений:

$$\Delta K_1 = Y_1 (\Delta \sigma_t Y_{2t} + \Delta \sigma_b Y_{2b}) \sqrt{\pi a}, \quad (11)$$

где $\Delta \sigma_t, \Delta \sigma_b$ – размах растягивающих и изгибных номинальных напряжений;
 Y_{2t}, Y_{2b} – поправочные функции для растяжения и изгиба, соответственно, учитывающие отношение величины a к толщине S ; $\alpha = a/S$.

Для упрощенной оценки величины Y_1 авторами предложена формула, интерполирующая результаты расчетных исследований МКЭ:

$$Y_1 = 1 + \frac{0,93 A}{\sqrt{a}}, \quad (12)$$

где A – параметр сварного соединения в формуле, связывающей коэффициент концентрации напряжений K_t с радиусом концентратора ρ [8, 9]:

$$K_t = 1 + A/\sqrt{\rho}. \quad (13)$$

Величина A зависит от типа сварного соединения, его размеров и условий нагружения и может варьироваться от $0,3...05 \text{ мм}^{0,5}$ для стыковых соединений до $3...6 \text{ мм}^{0,5}$ для сварных узлов типа «обрыва связей» [9].

Значения Y_{2t}, Y_{2b} могут быть найдены в справочной литературе, например, в [10].

Для расчетного дефекта второго типа – полуэллиптической поверхностной трещины – значение ΔK для наиболее глубокой точки контура может быть найдено по известным соотношениям:

$$\Delta K_1 = (\sigma_t Y_{2t} + \sigma_b Y_{2b}) Y_3 \sqrt{\pi a}, \quad (14)$$

где Y_3 – поправочная функция, учитывающая форму трещины (отношение a/b), приводимая в справочной литературе [10].

Для конструкций морской техники проблему представляет расчет величины подроста дефекта при типичном для них нестационарном режиме нагрузки. Наиболее простым и достаточно хорошо подтверждаемым экспериментально ее решением является использование принципа линейного суммирования повреждений (хотя теоретическое

обоснование его в данном случае отсутствует). При задании внешних воздействий двухпараметрическим распределением Вейбулла (волновая, ветровая или ледовая нагрузка):

$$P(\sigma \geq a) = e^{-(a/a_0)^k}, \quad (15)$$

где P – интегральная вероятность события: $\sigma \geq a$;
 k, a_0 – параметры формы и масштаба распределения,

использование этого принципа позволяет определить величину эквивалентного напряжения σ_{ev} , приводящего к той же циклической повреждаемости на базе суммарного числа циклов нагрузки N_0 , что и реальный спектр нагрузок:

$$\sigma_{ev} = \frac{\sigma_0}{Ln N_0^{1/k}} \cdot (\Gamma(q/k + 1))^{1/q}. \quad (16)$$

где Γ – полная гамма-функция;

σ_0 – максимальные напряжения за период эксплуатации (напряжения, реализуемые с обеспеченностью $1/N_0$);

q – показатель степени в степенной зависимости количества циклов до разрушения N от размаха циклических напряжений σ .

Значение q в данном случае равно экспериментально найденному значению m в формуле (10) ($= 2,7$).

Пример результатов расчета по формулам (9), (10), (14), в которых в качестве предельного состояния принят подрост дефекта на 20 % от начального его размера, представлен на рис. 4. Размеры исходного дефекта соответствовали величинам, приведенным в правом столбце табл. 1. Результаты незначительно изменяются при изменении толщины конструкции, что позволяет выделить область I интенсивного циклического нагружения и область II, для которой цикличность нагрузки можно не учитывать. При сочетании значений σ_{ev} , N_0 , соответствующих области I, необходимо учитывать возможность роста дефектов при оценках сопротивления хрупкому разрушению, а также проводить периодический НК при эксплуатации. Сопоставление с кривой допускаемых циклических напряжений (кривой усталости) для сварных соединений категории F2 (тавровые соединения приварных элементов) показывает, что циклические нагрузки, которые могут рассматриваться как допустимые при проектировании, могут быть опасными по возможности роста технологических дефектов.

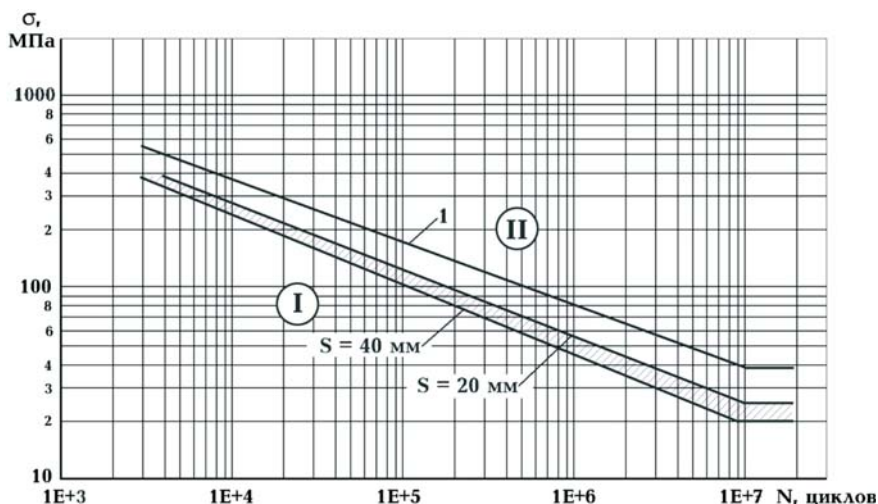


Рис. 4
Область интенсивного циклического нагружения (I)
и низкой циклической нагруженности (II).
1 – кривая усталости сварных соединений категории F2

Для дефекта типа 1 границы подобной области полностью определяются типом и размерами сварного соединения и не могут быть определены в общем виде.

2 Определение величины J

В современных нормативных документах по расчету прочности конструктивных элементов с дефектами широко используется метод FAD (failure assessment diagram – диаграмма предельных состояний). Согласно этому методу поверхность разрушения представлена кривой в координатах «относительный коэффициент интенсивности напряжений K_r – относительная нагрузка L_r », рис. 5 [11, 3]. Значения K_r, L_r определяются равенствами: $K_r = K_1/K_{1c}$, $L_r = L/L_{\max}$, где K_{1c} – критическое значение коэффициента интенсивности напряжений, $L_{\max}$ – предельная нагрузка, соответствующая исчерпанию несущей способности конструкции с трещиной. Функция $f = K_r(L_r)$, ограничивающая область потенциальных разрушений, в современной интерпретации соответ-

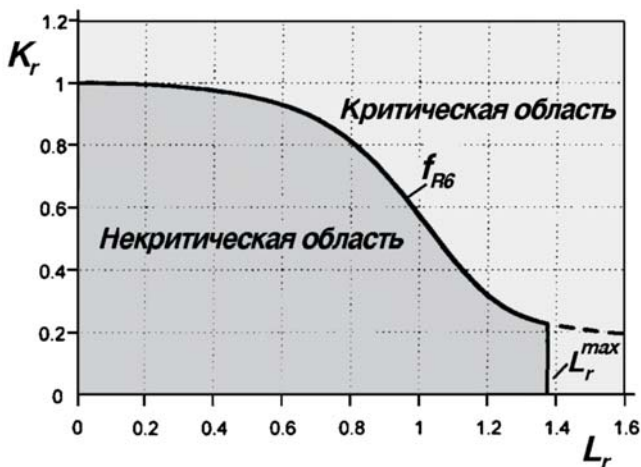


Рис. 5
Функция $f = K_r(L_r)$ в соответствии с методикой «R6»

ствует условию: $J = J_c = \text{const}$. В соответствии с т. н. «Методикой R6» [11] используется однозначная связь f с L_r :

$$f = (1 - 0,14 L_r^2) [0,3 + 0,7 \exp(-0,65 L_r^6)]. \quad (17)$$

В иных вариантах функция f включает в себя характеристики диаграмм деформирования материала [12].

Справа область предельных состояний ограничена условием разрушения, соответствующим исчерпанию несущей способности конструкции с дефектом. Для материалов с выраженной площадкой текучести это условие принимается в виде: $L_{\text{max}} = 1$; при наличии существенного деформационного упрочнения нагрузка разрушения повышается: $L_{\text{max}} = \sigma_f / \sigma_Y$, где σ_f – т. н. «напряжения течения (flow stress)», $\sigma_f = (\sigma_Y + \sigma_U) / 2$, σ_U – временное сопротивление.

Функция f связана с J и J_{el} соотношением:

$$f = \sqrt{\frac{J_{\text{el}}}{J}}, \quad (18)$$

где J_{el} – упругая составляющая J -интеграла;

$$J_{el} = K_1^2(1 - \mu^2)/E; \quad (19)$$

μ – коэффициент Пуассона;
 E – модуль упругости.

Таким образом, расчет величины J для элемента конструкции с дефектом сводится к следующему:

1. По заданным номинальным напряжениям определяется величина L_r . В стандартах представлены формулы для расчета L_r в простейших ситуациях (полуэллиптическая, бесконечная по протяженности краевая, внутренняя эллиптическая трещины в бесконечных пластинах, стержнях и трубных элементах). Например, для бесконечной по протяженности пластины толщиной S с поверхностной полуэллиптической трещиной рекомендуется формула:

$$L_r = \frac{(1 - \zeta)^{1,58} \sigma_b^2 / 3 + \sqrt{(1 - \zeta)^{3,16} \sigma_b^2 / 9 + (1 - \zeta)^{3,14} \sigma_t^2}}{(1 - \zeta)^2 \sigma_y}, \quad (20)$$

где σ_b , σ_t – составляющие мембранного и изгибного напряжений, определенные на поверхности, действующих в направлении, перпендикулярном плоскости трещины;
 $\zeta = a / S (l + 2S)$.

2. С использованием известных решений и рекомендуемых формул типа (14) по заданным значениям σ_b , σ_t определяется величина K_1 и величина J_{el} по формуле (19).

3. По формулам (17), (18) рассчитывается величина f и значение J .

Согласно стандарту [3], напряжения в конструкции разделяются на первичные σ^d (эксплуатационные) и вторичные σ^r (остаточные, в том числе и остаточные сварочные). При наличии последних величина K_1 определяется по формуле:

$$K_1 = K^r + K^d + \rho K_{1c}, \quad (21)$$

где K^r , K^d – значения коэффициента интенсивности напряжений, определенные отдельно для поля эксплуатационных и остаточных напряжений;

ρ – параметр, учитывающий дополнительные пластические деформации при взаимодействии эксплуатационных и остаточных напряжений и варьирующийся от 0 до 0,23 в зависимости от отношения $K^r L / K^d$. При $L_r = 0$ и $L_r = 1$ $\rho = 0$.

Для определения величины K^r в стандартах используются упрощенные представления эпюр остаточных напряжений.

Данная процедура может быть принята за основу расчетной оценки величины J в элементах конструкций морской техники, однако необходимы некоторые ее дополнения. Во-первых, типовые элементы таких конструкций часто плохо приводятся к ограниченному перечню готовых решений. В частности, для конструкций ферменного типа необходим расчет величины J для дефекта типа полуэллиптической трещины в пластинах конечной ширины; для трещин в зоне сопряжения трубных элементов необходим учет конструктивной концентрации напряжений. Во-вторых, необходимо уточнение процедуры оценки вклада ОСН для конструктивных элементов с расчетным дефектом. С одной стороны, для предельных оценок необходимо рассматривать наименее благоприятную ориентацию и положение дефекта, что сокращает количество рассматриваемых вариантов, с другой стороны – необходимо учитывать возможность релаксации ОСН при высокой нагрузке, что приводит к снижению излишнего консерватизма таких оценок.

Для решения этого круга задач целесообразно использовать МКЭ. Численное определение величины J потенциально может быть выполнено по следующим методикам.

1. Расчет величины J как контурного интеграла с использованием определяющей его формулы:

$$J = \int_{\Gamma} (w dy - \bar{T} \frac{\partial \bar{u}}{\partial w} ds), \quad (22)$$

где w – плотность энергии деформации, $w = \int_0^{\epsilon} \sigma_{ij} d\epsilon_{ij}$,
 Γ – контур интегрирования, окружающий вершину трещины;
 $\bar{T}$ – поверхностный вектор силы;
 $\bar{u}$ – вектор перемещений;
 ds – элемент контура.

Метод применим для определения величины J как при решении двумерных задач (когда трещина рассматривается как бесконечная по протяженности), так и при решении трехмерных задач с применением объемных элементов (что требуется при рассмотрении полуэллиптической трещины), как характеристики напряженно-деформированного состояния в отдельной точке на фронте трещины. В этом случае должен использоваться контур интегрирования, лежащий в перпендикулярной плоскости, проходящей через эту точку. Однако этот метод требует достаточно мелкой сеточной аппроксимации, а для трещины в поле ОСН его применимость проблематична, так как в этом случае независимость от контура интегрирования не соблюдается.

2. Расчет величины J по изменению потенциальной энергии Π при моделировании продвижения трещины:

$$J = - \partial \Pi / \partial A, \quad (23)$$

где ∂A – площадь подраста трещины.

Метод не требует подробной сеточной аппроксимации (приемлемые результаты получаются уже при размерах элементов в вершине трещины порядка $0,1a$) и принципиально применим для анализа нагруженности материала в вершине трещины и при наличии ОСН. В связи с этим он был взят за основу численных оценок МКЭ. Следует отметить, что возможность использования параметра J как характеристики, однозначно определяющей НДС в вершине трещины, в присутствии ОСН не вполне ясна, поскольку в данном случае нагружение не является простым и деформационная теория пластичности не применима. Однако можно предполагать, что в этом случае физический смысл имеет результат определения изменения упругой энергии тела U при продвижении трещины, связанный с упругой составляющей J :

$$J_{el} \cong - \Delta U / \Delta a, \quad (24)$$

где $U = 1/2 \int e_{ij}^{el} \sigma_{ij} dV - uP$,

e_{ij}^{el} – компоненты тензора упругих деформаций;

σ_{ij} – компоненты тензора напряжений;

u – перемещения точек приложения узловых сил P .

2.1 Определение величины J_{el} с учетом ОСН

Исследования проводились в двумерной постановке задачи (плоская деформация) с применением программного комплекса, описанного в работе [13]. При наличии ОСН непосредственно возмущающим фактором являются остаточные пластические деформации укорочения, формирующиеся при термомеханическом цикле сварки. Решение моделирующих задач выполнялось в следующей последовательности:

а) задача термоупругопластического деформирования («сварочная») с моделированием выполнения одно- или многопроходной сварки;

б) задача упругопластического деформирования, использующая в качестве исходной информации (начальных условий) остаточные пластические деформации, полученные при решении задачи (а). На этом этапе осуществлялось поэтапное раскрепление узлов сетки

МКЭ, моделирующее продвижение трещины длиной a . В варианте анализа воздействия суммарных (ОСН + эксплуатационных) напряжений перед продвижением трещины моделировалось приложение эксплуатационных напряжений.

В расчете использовались теплофизические и механические характеристики судокорпусных сталей с пределом текучести от 400 до 620 МПа, характеристики металла шва принимались теми же, что и для основного металла. Дефект (трещина) помещался в зоне максимальных растягивающих ОСН.

Получено, что использование принципа суммирования коэффициентов интенсивности напряжений, определенных отдельно для ОСН и эксплуатационных напряжений (21), и вычисление величины K^r исходя из распределений ОСН приводит к неопределенно большим погрешностям. Для дефекта, расположенного в зоне остаточных пластических деформаций после сварки, результаты МКЭ ближе к сумме значений J -интеграла, определенных для каждого из полей отдельно (J_{el}^r и J_{el}^d), а при больших относительных нагрузках необходимо учитывать также релаксацию ОСН. Для дефекта, помещенного в зону максимального уровня ОСН для получения наиболее консервативных оценок (рис. 6) получено, что величина J_{el}^r зависит не столько от раз-

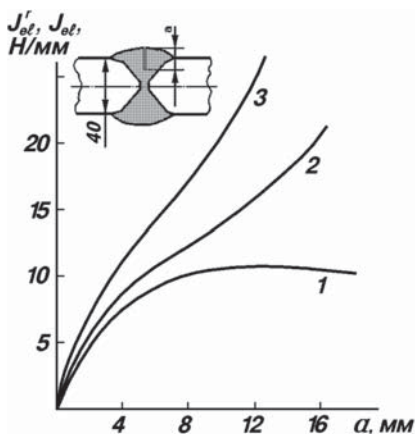


Рис. 6

Расчетные зависимости значений J_{el} от длины трещины: 1 – в поле ОСН ($\sigma_t = 0$); 2, 3 – в суммарном поле напряжений, $\sigma_t = 200$ МПа и 360 МПа соответственно (растяжение). Материал с $\sigma_y = 450$ МПа

меров дефекта, сколько от размера зоны пластических деформаций при сварке, связанного с толщиной элемента конструкции S .

Функция $J_{el}^r(a)$ имеет платообразный характер с максимумом, слабо зависящим от a . Этот максимум может быть оценен по формуле:

$$J_{el}^r = 0,7 \sigma_Y^2 S/E. \quad (25)$$

При прогнозировании значений J_{el}^r для полуэллиптической трещины примем, что соотношение J_{el}^r для бесконечной по протяженности (двумерной) и полуэллиптической трещины такое же, как и при действии эксплуатационных напряжений:

$$J_{el}^r = 0,7 Y_3 \sigma_Y^2 S/E, \quad (26)$$

где Y_3 – поправочная функция, учитывающая значение отношения a/l , согласно [4]:

$$Y_3 = [1 + 1,464 (a/l)^{1,85}]^{-0,5}. \quad (27)$$

Для учета релаксации ОСН при высоких нагрузках предложена интерполяционная формула, определяющая суммарное значение J_{el} в виде:

$$J_{el} = J_{el}^d + J_{el}^r (1 - 0,67L_r), \quad (28)$$

где значения J_{el}^d , J_{el}^r соответствуют воздействию эксплуатационных и остаточных напряжений, соответственно.

2.2 Определение величины J при решениях МКЭ с использованием объемных элементов.

Целью численных исследований являлась отработка методологии определения величины J для элементов конструкций с полуэллиптической трещиной, отличных по геометрии от простейших конфигураций, приведенных в стандартах. Так как для обеспечения точности вычислений по формуле (22) необходимо моделировать подрот трещины по всему фронту, использовалось упрощенное представление контура трещины в виде прямоугольника. Допустимость такого упрощения подтвердилась результатами расчета (по отношению к известным решениям для наиболее глубокой точки полуэллиптической трещины отличия определенных МКЭ значений J_{el} не превышали 10 %). Кроме того, моделирование реальных дефектов трещиной с прямоугольным

фронтом представляется ничуть не менее приемлемым, чем полуэллиптической трещиной.

Так как формула (22) справедлива лишь для тела с нелинейно-упругой диаграммой деформирования, для оценки полного значения J применялась схема Бигли-Ландеса [14]: определение величины – δP как площади между кривыми деформирования элемента с трещиной глубиной a и $a + da$. Расчет значений J , J_{el} проводился по результатам решения двух задач с варьируемой глубиной трещины a и $(a + \Delta a)$ по формулам:

$$J = - \Delta P / \Delta A; J_{el} = - P^2 / 2 \cdot \Delta \lambda / \Delta A, \quad (29)$$

где ΔP – разность площадей под диаграммами «нагрузка P – перемещение точки ее приложения V » для фрагмента с трещиной глубиной a и $(a + \Delta a)$;

ΔA – площадь подроста трещины, $\Delta A = l \Delta a$;

P – нагрузка;

$\Delta \lambda$ – изменение упругой податливости; $\lambda = V/P$.

Для расчетов использовался программный комплекс «Зенит-95» (разработка ООО «ДИП»).

На рис. 7 представлены примеры результатов расчета для пластины конечной ширины 300 мм, длиной 1300 мм и толщиной $S = 40$ мм. Выбран материал со следующими характеристиками: $\sigma_y = 400$ МПа, $E = 2 \cdot 10^5$ МПа, линейная диаграмма деформационного упрочнения с модулем деформационного упрочнения $G_s = 2 \cdot 10^3$ МПа. Длина трещины l принималась постоянной, глубина a – варьировалась. Нагружение во всех вариантах проводилось до достижения номинальными напряжениями, рассчитанными по брутто-сечению, величины $1, 1,1 \dots 1,3 \sigma_y$. Сопоставление расчетов МКЭ (точки) с расчетами по стандарту [3] выполняется в координатах « $J - J_{el}$ », то есть численные результаты сравниваются с итоговыми результатами расчета по формулам (17), (18), (20) и формулам, связывающим значения P и K_I . Получено, что безусловно удовлетворительное соответствие имеет место для случая нагружения изгибом. При растяжении расчеты МКЭ и расчеты по стандарту удовлетворительно совпадают лишь для трещин глубиной $a < 0,25S$. При больших значениях расчеты по [3] существенно завышают величину J по отношению к данным МКЭ. Анализ получаемых полей напряжений показывает, что причиной тому является формирование в нетто-сечении зоны высокой объемности напряженного состояния вследствие возникновения внецентренного изгиба, не учитываемого при расчете L_r по формуле (20).

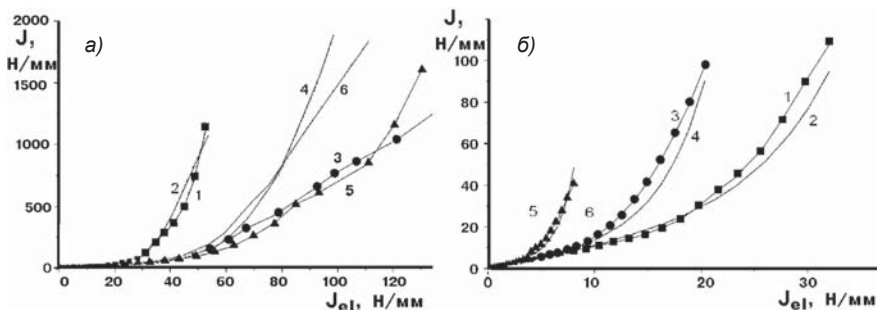


Рис. 7

Зависимость $J(J_e)$ по расчету МКЭ (точки) и по формулам (17), (18), (20) (кривые),
 а – растяжение, б – изгиб. $a = 10$ мм (1, 2), $a = 20$ мм (3, 4), $a = 30$ мм (5, 6).

В итоге можно заключить, что метод МКЭ с использованием объемных элементов в предложенном варианте методики позволяет достаточно достоверно определять значения J_{eI} и J для элементов конструкций морской техники.

3 Определение величины J_{cr} и коэффициента безопасности n

В предшествующей работе авторов [1] изложены основные результаты определения параметра трещиностойкости CTOD (δ_{cr}) материала сварных соединений судокорпусных сталей при температурах испытаний ниже минус 30 °С, соответствующих расчетным температурам шельфа Арктики. Основной их особенностью является наличие большого разброса данных, вследствие чего корректней говорить не о трещиностойкости материала как некоторой определенной величине, а о параметрах функции распределения трещиностойкости для данного материала при данной температуре. Переход от величины δ_{cr} , являющейся традиционно определяемым параметром для судокорпусных материалов, к непосредственно входящему в расчеты прочности параметру J_{cr} может быть выполнен по известной формуле:

$$J = \nu \delta \sigma_y \quad (30)$$

где ν – числовой коэффициент,

и не изменяет сути проблемы: какую вероятность разрушения следует считать приемлемой при определении трещиностойкости материала?

Предваряя предлагаемое решение данной задачи целесообразно сделать некоторые замечания о связи значений J_{cr} и δ_{cr} и величине коэффициента ν . Согласно известным расчетным оценкам [14], величина ν зависит от степени приближения напряженного состояния в вершине трещины к условиям плоской деформации (ПД), изменяясь от 2 при ПД до 1 при плоском напряженном состоянии (ПНС). Однако в этих решениях под величиной δ подразумевается раскрытие трещины, непосредственно определяемое в ее вершине (в отличие от определяемой по стандартам по перемещению берегов трещины на поверхности образца), а способ определения J не связан с приближенным методом обработки результатов испытаний (расчетом по величине работы пластического деформирования A_{pl} при разрушении). В связи с этим авторами анализировалась корреляция величин J_{cr} и δ_{cr} , непосредственно полученных для судокорпусных сталей при испытаниях на изгиб образцов различных сечений, в ходе которых одновременно регистрировались диаграммы «нагрузка – перемещение точки ее приложения V » и «нагрузка – раскрытие берегов трещины q » и по формулам стандартов рассчитывались оба параметра. Было получено, что величина ν , равная 2,0 при номинально-упругом деформировании по определению стандартов, быстро приближается к 1,0 при возникновении номинально-пластического деформирования и даже может быть меньше единицы. Анализ напряженно-деформированного состояния в вершине трещины показывает, что при этом не возникает каких-либо отклонений от условий ПД и изменения коэффициента ν связаны не с этим фактором. Можно показать, что при значительной номинальной пластической деформации величина ν полностью определяется геометрией образца. Для этого необходимо использовать чисто геометрическую связь пластического раскрытия берегов трещины q_{pl} , определяющего составляющую раскрытия вершины трещины δ_{pl} и пластической составляющей перемещения точки приложения нагрузки V_{pl} , произведение которой на σ_y пропорционально пластической части J -интеграла J_{pl} . Такие оценки показывают, что при близких к оптимальным по стандартам отношениям размеров образца на трехточечный изгиб (SENB): $a = S = W/2 = L/8$, и нагрузке, близкой к предельной, получим: $\nu = 1,0$.

В итоге для перехода от значений CTOD к величине J рекомендуется соотношение, использующее всегда определяемые при промежу-

точной обработке данных параметры: величину δ_{pl} , определяемую по V_{pl} , и величину δ_{el} , определяемую, исходя из нагрузки, $\delta_{el} = K_1^2/\sigma_Y/2E^*$:

$$J = J_{el} + J_{pl} = 2,0 \cdot \bar{\delta}_{el} + 1,0 \cdot \sigma_Y \bar{\delta}_{pl}. \quad (31)$$

Близкая к линейной связь параметров трещиностойкости J_{cr} и $\bar{\delta}_{cr}$ позволяет распространить на критические значения J -интеграла результаты статистического анализа данных по $\bar{\delta}_{cr}$ металла сварных соединений, приведенные в работе [1]. Для температурного диапазона вязко-хрупкого перехода распределение значений J_{cr} описывается интегральной функцией вероятности, соответствующей двухпараметрическому распределению Вейбулла:

$$F = 1 - \exp[-(J_{cr}/J_{c0})^b], \quad (32)$$

где J_{c0} – параметр масштаба распределения;
 b – параметр формы.

По результатам исследований рекомендовано: для основного металла $b = 2,0$, для локальных охрупченных структур при совпадении плоскости трещины с плоскостью охрупченной структуры $b = 1,0$. В целом для металла сварного соединения при произвольном расположении дефекта следует принимать: $b = 1,7$.

Помимо неопределенности в назначении доверительной вероятности определения трещиностойкости, необходимо отметить сделанный выше достаточно произвольно выбор размеров расчетного дефекта как соответствующих вероятности их превышения 0,01, а также необходимость определения коэффициента безопасности n . Предлагается далее рассматривать решение этих вопросов как взаимосогласованных, связывая выбор размеров расчетного дефекта, доверительной вероятности определения трещиностойкости и назначения коэффициента безопасности общим условием. Сформулируем это условие следующим образом: при проведении расчета хрупкой прочности в детерминистической постановке выполнение неравенства

$$J_{cr}/n - J(a) \geq 0, \quad (33)$$

где a – основной размер дефекта (по сечению элемента конструкции, глубина),

должно означать, что вероятность P выполнения неравенства

$$J_{cr}' - J(a') \geq 0, \quad (34)$$

где J_{cr}' , a' – случайные значения J_{cr} и a , выбираемые по заданным законам распределения этих параметров,

обеспечена на требуемом уровне, принимаемом, например, равным 0,999 для наиболее ответственных ситуаций.

Данное единственное условие связывает три подлежащих определению параметра: размер расчетного дефекта, доверительную вероятность определения J_{cr} в неравенстве (33) и коэффициент безопасности. Поэтому имеется возможность определить два из этих трех параметров достаточно произвольно. Примем далее, что величина J_{cr} определяется как среднее значение, найденное по результатам экспериментов (приблизительно равное параметру масштаба J_{c0}), размеры расчетного дефекта соответствуют определенным выше значениям, и используем условия (33), (34) для того, чтобы определить такие значения коэффициента безопасности n , которые обеспечивали бы заданную вероятность разрушения конструкции.

Алгоритм расчета n для наиболее простого случая стационарного режима нагружения заключается в следующем.

1. Для выбранного варианта расчета (толщина, конфигурация элемента, уровень нагрузок, размеры расчетного дефекта) определяется величина J_{cr}' , удовлетворяющая неравенству (33) при $n = 1$.

2. Для того же варианта численно определяется зависимость вероятности выполнения неравенства (34) P от параметра распределения трещиностойкости J_{c0} (при выбранном значении b). При этом величины J_{cr}' , a' генерируются в соответствии с функциями их распределения.

3. Определяется величина J_{c0} , удовлетворяющая заданному значению P , и значение n определяется как отношение: $n = J_{c0}/J_{cr}'$.

Таким образом, величина n зависит от выбора приемлемой вероятности разрушения элемента конструкции P и параметра распределения трещиностойкости b , характеризующего рассеяние данных.

Реализация п. 2 данного алгоритма осуществлялась проведением серии численных экспериментов по методу Монте-Карло. При этом величина P определялась как отношение числа экспериментов, в которых условие прочности было не выполнено, к общему числу экспериментов (для одного варианта задания исходных параметров – не менее 10^7). Для генерации случайных значений a и J_{cr} использовались алгоритмы выбора равномерно распределенного между 0 и 1 значения

параметра u («генератор случайной величины»), рекомендованные в литературе для проведения численных экспериментов с большой повторяемостью. Случайное число x , распределенное по заданному закону, определяется при этом по методу оригинала функции:

$$x = F_x^{-1}(u), \quad (35)$$

где $F_x^{-1}(x)$ – функция, обратная интегральной функции рассматриваемого распределения.

Для двухпараметрического распределения Вейбулла:

$$x = x_0 [-\ln(1 - u)]^{1/b}. \quad (36)$$

Для трехпараметрического распределения Вейбулла:

$$x = (x_0 - x_{\min}) [-\ln(1 - u)]^{1/b} + x_{\min}. \quad (37)$$

В качестве примера результата расчетов на рис. 8 приведены полученные зависимости P от J_{0c} для $b = 2,0$, $b = 1,7$ и $b = 1,0$. Значения детерминированных параметров в этом примере составляли: $\sigma = 0,8\sigma_y$, при нагрузке растяжения $\sigma_y = 400$ МПа; $S = 40$ мм. Параметры распределения размеров дефекта соответствовали данной толщине при протяженности шва $100S$ (табл. 1). При заданной нагрузке для постулированного расчетного дефекта $a = 10$ мм, $l = 30$ мм, прочность обеспечивается при значении $J_{cr} = 20,3$ кН/м. Результаты расчетов продемонстрировали, что зависимости « $P - J_{0c}$ » оказываются практически линейными в двойной логарифмической системе координат, а их положение определяется комплексом перечисленных переменных задачи.

Примем, что для специальных конструкций приемлемой вероятностью разрушения является $P = 0,001$ ($\lg P = -3$), а для основных конструкций – $P = 0,005$ ($\lg P = -2,3$) (выбор значений P , безусловно, должен быть в будущем детально обоснован). Тогда из результатов, приведенных на рис. 8, получим: для специальных конструкций при $b = 2,0$ $n = 6,0$, при $b = 1,7$ $n = 8,3$, при $b = 1,0$ $n = 32$. Близкие значения n получаются при широком варьировании входных параметров: σ , σ_y и S . Относительная независимость n от выбора варианта задачи обусловлена тем, что величина J_{0c} , обеспечивающая принятое значение P , оказывается приблизительно пропорциональной значению J_{cr} , получаемому при детерминистическом расчете. Значение J_{cr} оказывается

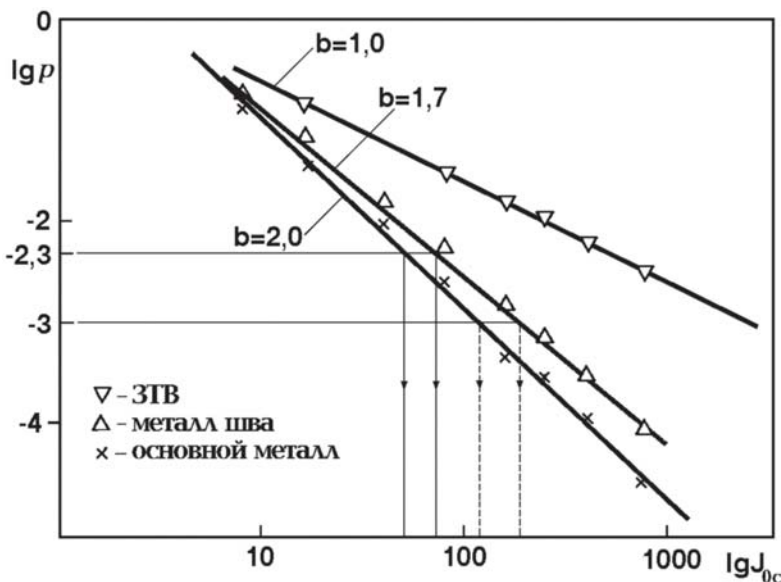


Рис. 8

Результаты численного прогнозирования вероятности разрушения конструкции для стационарного режима нагружения

приблизительно соответствующим 3 % вероятности разрушения для $P = 0,001$ и 10 % вероятности разрушения – для $P = 0,005$. Таким образом, при статистически достоверном объеме испытаний в расчете могут использоваться значения трещиностойкости, определенные с указанной доверительной вероятностью, и тогда коэффициент безопасности может быть принят равным 1.

Полученные результаты для основного металла и металла сварного соединения приведены в табл. 2. В ней не представлен вариант возможного расположения фронта трещины вдоль крупнозернистой составляющей металла ЗТВ ($b = 1$), когда вычисленный коэффициент безопасности оказывается таким, что для выполнения условия прочности хрупкие разрушения образцов с разметкой по данной целевой структуре фактически должны отсутствовать. По-видимому, в этом случае в последующих разработках должна быть учтена низкая вероятность попадания плоскости расчетного дефекта в эту структуру.

Таблица 2

**Результаты оценок доверительной вероятности
определения трещиностойкости материала и коэффициента безопасности
при использовании в расчете средних значений J_{cr}**

Категория конструкции	Основной металл		Металл сварного соединения	
	Доверит. вероятность J_{cr}	n для среднего значения J_{cr}	Доверит. вероятность J_{cr}	n для среднего значения J_{cr}
Специальные	3 %	6,0	3 %	8,3
Основные	10 %	2,5	10 %	4,0

Для нестационарного режима нагружения, характерного для конструкций морской техники, алгоритм определения коэффициента безопасности усложняется. Нестационарный режим нагружения, обусловленный динамическими (волновыми, ветровыми, ледовыми или сейсмическими) нагрузками, характеризуется случайным сочетанием нагрузок и температур их реализации. В варианте детерминистического расчета необходимо принимать, что максимальная нагрузка соответствует минимальной (расчетной) температуре эксплуатации, в вероятностном расчете можно, в первом приближении, рассматривать нагрузку и температуру как независимые случайные величины. Это позволяет учесть фактическое возрастание трещиностойкости материала при возрастании температуры в соответствии с экспериментально обоснованной формулой:

$$(J_{0c})_T = (J_{0c})_p \exp[0,04 (T - T_p)], \quad b_T = b_p, \quad (38)$$

где $(J_{0c})_T$, b_T – значения параметров масштаба и формы распределения трещиностойкости при температуре T ;

$(J_{0c})_p$, b_p – параметры, определенные при температуре испытаний T_p .

Для численного определения P в данном случае использовался алгоритм с внешним и внутренним циклами. Во внешнем цикле генерировались случайные значения a и J_c , во внутреннем – случайные значения σ , T . При оценочных расчетах распределение σ принималось как двухпараметрическое распределение Вейбулла с рекомендуемыми в соответствии с [2] параметрами для ледовой нагрузки. Температура задавалась трехпараметрическим распределением Вейбулла:

$$F_T = 1 - \exp \{ - [(T - T_{\min}) / (T_0 - T_{\min})]^w \}, \quad (39)$$

где T_0 определена как среднегодовая температура;

$T_{\min}$ принята равной минус 60 °С;
параметр формы w предложено определять из условия: $F_T = 0,001$ для $T < T_p$
(то есть снижение температуры ниже T_p возможно в одном цикле нагрузки из 1000).

Данные оценки следует рассматривать как ориентировочные. Например, при использовании их для климатических условий МСП «Приразломная», где $T_0 = -10$ °С и $T_p = -45$ °С, и принимая $T_{\min} = -60$ °С, получим: $w = 5,73$.

Получаемые значения P сопоставлялись с полученными для стационарного режима нагружения при $\sigma = \sigma_{\max}$ и $T = T_p$. Сопоставление показывает, что при всех наборах входных параметров, соответствующих ожидаемым режимам нагружения МСП, отношение вероятностей разрушения при нестационарном и стационарном режиме не превышает 0,1. Это позволяет снизить коэффициенты безопасности по отношению к приведенным в табл. 2 практически в два раза, например, для специальных конструкций: $n = 4,0$ для металла сварного соединения, $n = 2,7$ для основного металла, или же использовать в расчетах значения трещиностойкости, определенные с 10 % доверительной вероятностью и принимать $n = 1$.

Целесообразно подчеркнуть, что снижение коэффициентов безопасности для динамических нагрузок по отношению к статическим еще не означает, что они являются менее опасными. Для них должна вводиться описанная выше процедура учета возможности роста расчетного дефекта, вследствие чего расчетное значение J может увеличиться.

Выводы:

1. За основу методики оценки сопротивления хрупкому разрушению сварных конструкций морской техники принята процедура расчета величины J -интеграла для элемента конструкции с дефектом. Критерий прочности формулируется в виде неравенства $J \leq J_c/n$, где J_c – характеристика трещиностойкости материала, n – коэффициент безопасности.

Основные элементы данной процедуры могут соответствовать варианту применения Failure Assessment Diagram (FAD). Однако необходимо решение ряда проблемных моментов, к числу которых относятся:

уточнение алгоритма расчетных оценок J -интеграла для дефектов в поле остаточных и эксплуатационных напряжений;

обоснование выбора размеров и конфигурации «расчетного дефекта»;

уточнение метода получения данных о трещиностойкости материала J_c с учетом сложившейся практики определения параметра CTOD и характерного для низких температур разброса данных;

обоснование выбора коэффициентов безопасности с учетом специфики конструкций МСП и ПБУ и условий их нагружения.

2. На основе комплекса численных исследований предложены интерполяционные формулы для расчета упругой составляющей J -интеграла для трещин в поле остаточных сварочных напряжений и при их взаимодействии с эксплуатационными напряжениями с учетом частичной релаксации, отмечена необходимость дополнения численными методами известных аналитических решений для определения предельных нагрузок элементов конструкций с дефектами.

3. Предложен принцип взаимосогласованного выбора размеров расчетного дефекта, назначения коэффициента безопасности и способа интерпретации экспериментальных данных. На основе численного определения вероятности хрупких разрушений конструктивных элементов при стационарном и нестационарном температурно-силовом нагружении предложены значения коэффициента безопасности, вводимого в условие предотвращения хрупких разрушений.

Список литературы

1. Виноградов О.П., Ильин А.В., Филин В.Ю. Научно-методические вопросы аттестации испытаний на трещиностойкость структурно неоднородного металла сварных соединений // Вопросы материаловедения. – 2004. – Вып. 1 (41). – С. 55 – 68.
2. Правила классификации и постройки ПБУ и МСП. – СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2006.
3. BS 7910: 2005 Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures, 2005, 297 pp.
4. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок (ПНАЭ Г-7-002-86). – М: Энергоатомиздат, 1989. – 525 с.
5. Контроль качества сварных соединений конструкций 16 днищевых секций МЛСП «Приразломная». ВпрД 34-1.-01-96. – ЦНИИ КМ «Прометей», 1996.– 32 с.
6. API 5L. Specification for line pipe. 43rd ed., March, 2004.
7. Гетман А.Ф., Козин Ю.Н. Неразрушающий контроль и безопасность эксплуатации сосудов и трубопроводов давления. – М: Энергоатомиздат, 1997.– 228 с.
8. Ильин А.В., Леонов В.П., Маннинен Т.П. Влияние геометрии сварных соединений на концентрацию упругих напряжений // Вопросы судостроения, серия «Сварка». – Вып. 32, 1981.

9. Ильин А.В., Леонов В.П. Совершенствование расчетных процедур оценки долговечности сварных соединений конструкций // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – Вып. 23. – СПб., 2000.

10. Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений в 2^х т. / Под ред. Ю.Мураками. Пер. с англ. – М.: Мир, 1990.

11. R6 Revision 3. Assessment of the integrity of structures containing defects. British Energy Generation Ltd, Amendments 10, May 1999.

12. SINTAP (Structural Integrity Assessment Procedures for European Industry). Project No. BE95-1426, Final Procedure, November 1999.

13. Карзов Г.П., Марголин Б.З., Швецова В.А. Физико-механическое моделирование процессов разрушения.– СПб.: Политехника, 1993. – 391 с.

14. Брок Д. Основы механики разрушения / Пер. с англ. – М.: ВШ, 1980. – 368 с.

Е.И. Хлусова, А.А. Круглова, В.В. Орлов, В.А. Сувориков, В.К. Башаев

ОСВОЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОГО УПРОЧНЕНИЯ СТАЛИ ПОВЫШЕННОЙ КАТЕГОРИИ ПРОЧНОСТИ МАРОК FW¹ И F32W С ПРЕДЕЛОМ ТЕКУЧЕСТИ 235–315 МПа В ТОЛЩИНАХ ДО 50 ММ НА ЧЕРМК ОАО «СЕВЕРСТАЛЬ»

Введение

Для изготовления металлоконструкций наиболее широко применяется листовой прокат из стали с пределом текучести 235 – 315 МПа [1].

Традиционно для изготовления листового проката такой категории прочности применяются стали, легированные марганцем (1–1,5 %) с небольшими добавками микролегирующих элементов: ванадия, ниобия, титана в сумме до 0,01 %. Листовой прокат поставляется в горячекатаном состоянии или после контролируемой прокатки. При использовании этих технологий с увеличением толщины листа становится проблематичным обеспечение вязкости стали при испытании на ударный изгиб образцов с острым надрезом.

Так например, данные работы [2] показывают, что после рекристаллизационной прокатки для стали марки 09Г2С, соответствующей по химическому составу стали Е32 – Е36 согласно требованиям Российского морского регистра судоходства (РМРС), обеспечивается работа удара 50 – 90 Дж при температуре минус 40 °С, причем для проката толщиной от 10 до 30 мм температура хрупко-вязкого перехода составляет минус 30 °С, а в листах толщиной 30 мм она повышается до 0 °С. При изготовлении листа толщиной 50 мм из стали 09Г2С отдельные значения работы удара при минус 40 °С снижаются до 15 – 20 Дж [2]. В то же время современные исследования показывают возможность обеспечения в марганцевой стали повышенных характеристик вязкости и прочности за счет реализации механизма субструктурного упрочнения при термомеханической обработке [3].

¹ «W» – сталь улучшенной свариваемости с гарантией стойкости к слоистым разрушениям.

В настоящее время в связи с началом реализации масштабных проектов по освоению нефтегазовых месторождений на шельфе Северных морей России будет востребована сталь нормальной и повышенной категории прочности для различных береговых конструкций. Температура их эксплуатации может достигать минус 40 °С, что определяет требование к температуре хрупко-вязкого перехода не выше минус 60 °С. Для сварных конструкций, эксплуатирующихся в столь жестких условиях (причалов, опор грузоподъемных кранов и т. п.), часто необходимо использование листового проката толщиной до 40 – 50 мм.

В то же время технологическая схема производства проката должна предусматривать максимальное снижение затрат на ее реализацию, что возможно при использовании термомеханической обработки.

Целью работы является выбор химического состава и разработка технологических параметров термомеханической обработки, позволяющей обеспечить высокий комплекс свойств, в том числе хладостойкость до минус 60 °С, в листовом прокате толщиной до 50 мм из марганцевой стали нормальной и повышенной прочности категорий FW и F32W.

Материал и методика исследования

Материалом для исследования послужила сталь марганцевой композиции легирования, отвечающая требованиям Российского морского регистра судоходства к химическому составу сталей нормальной и повышенной прочности (см. табл. 1).

Таблица 1

**Химический состав сталей с пределом текучести 235 и 315 МПа
с контролем работы удара при минус 60 °С**

Марка стали	№ состава	Массовая доля элементов, %						
		C	Si	Mn	P	S	Ni	V+Nb+Ti
05ГФБ	1	0,05	0,23	0,8	0,006	0,002	0,18	0,08
06ГФБ	2	0,06	0,23	0,73	0,007	0,002	0,23	0,07
Требования РМРС		не более						
		0,16	0,50	1,6	0,025	0,005	0,80	0,17

Выплавка проводилась в конверторе ЧерМК ОАО «Северсталь» с разливкой в непрерывнолитые слябы, прокатка – на стане «5000» ЧерМК ОАО «Северсталь».

Исследование микроструктуры выполнено на шлифах после травления в 3 % спиртовом растворе HNO_3 по ГОСТ 5640. Для исследования микроструктуры использовались образцы, вырезанные на полную толщину проката параллельно направлению прокатки по нормали к плоскости прокатки.

Фазовые превращения исследовались при непрерывном охлаждении и деформационном воздействии, имитирующем условия производства, с построением термокинетических диаграмм на dilatометре «BÄHR Thermoanalyse». Определялась температура Ar_3 . Имитация крупного и мелкого аустенитного зерна заключалась в нагреве образцов до 1000 °C и 1200 °C соответственно.

Механические свойства при растяжении листового проката определялись по ГОСТ 1497 на образцах типа 6 № 3. Испытания на ударный изгиб проводились по ГОСТ 9454 на образцах сечением 10 × 10 мм с острым надрезом (тип 11), вырезанных в поперечном прокатке на направлении. Количество вязкой составляющей определялось по излому проб натурной толщины.

Исследование фазовых превращений

При выборе химического состава стали для эксплуатации в условиях Крайнего Севера необходимо обеспечить хорошую свариваемость и, в первую очередь, минимальную концентрацию углерода.

В связи с этим необходимо было изучить влияние содержания углерода и предварительной пластической деформации аустенита на особенности фазовых превращений в марганцевой стали.

Для изготовления листового проката низколегированных сталей была выбрана схема двустадийной термомеханической обработки, которая предусматривает проведение первой стадии прокатки при температурах, обеспечивающих прохождение рекристаллизации аустенита. Для изучения влияния крупного нерекристаллизованного аустенитного зерна на структуру построены термокинетические диаграммы превращения аустенита марганцевой стали с содержанием углерода 0,05 % масс. и 0,08 % масс., марганца – около 0,80 % масс., микролегированной ванадием и ниобием (рис. 1 и 2).

Анализ термокинетических диаграмм показал, что во всем интервале исследованных скоростей охлаждения $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращение начинается с выделения свободного феррита. Для марганцевой стали с содержанием углерода 0,05 % масс. и исходным мелкозернистым аустенитом (рис. 1) перлитное превращение происходит в интервале ско-

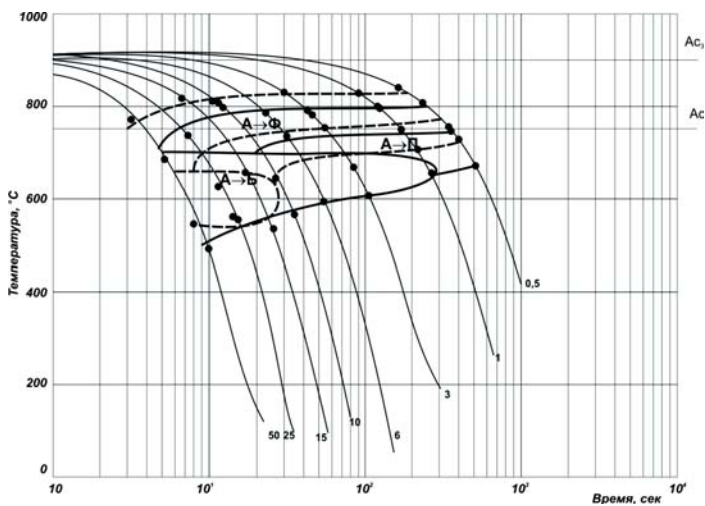


Рис. 1

Термокинетическая диаграмма превращения деформированного крупнозернистого (——) и мелкозернистого (----) аустенита марганцевой стали типа 05ГФБ

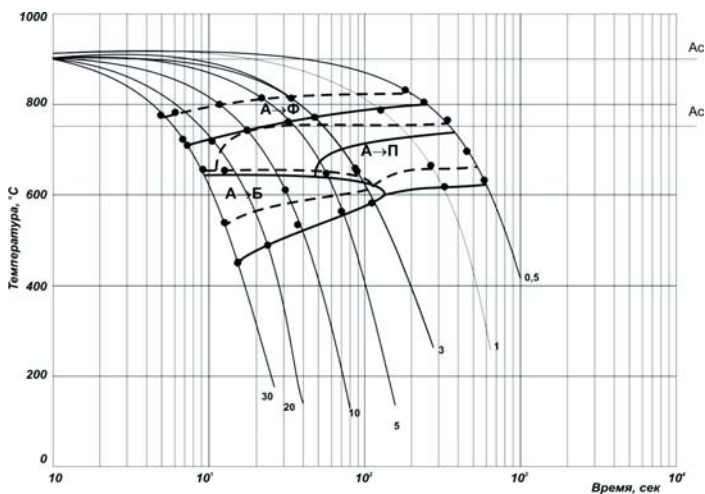


Рис. 2

Термокинетическая диаграмма превращения деформированного крупнозернистого (——) и мелкозернистого (----) аустенита марганцевой стали типа 08ГФБ

ростей охлаждения менее 30 – 40 °С/с при температурах 780 – 670 °С. Бейнит образуется при скоростях охлаждения 12–50 °С/с в диапазоне температур 670 – 580 °С. В интервале промышленных скоростей охлаждения 6 – 15°/с (для проката толщиной до 50 мм) будет сформирована феррито-перлитная структура с незначительным содержанием бейнита (рис. 3 а).

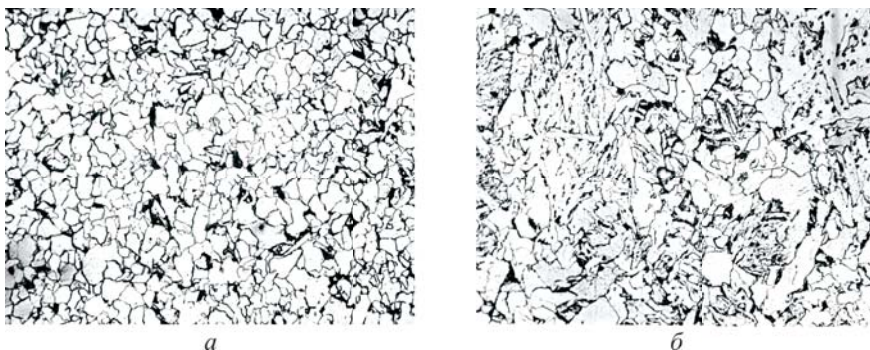


Рис. 3

Структура марганцевой стали с содержанием углерода 0,05 % масс. при охлаждении со скоростью 10 – 15 °С/с после деформации со степенью 25 % при 920 °С с исходной мелкозернистой (а) и крупнозернистой (б) структурой аустенита после нагрева до 1000 °С и 1200 °С соответственно

Формирование исходной крупнозернистой аустенитной структуры до начала охлаждения приводит к снижению начальной температуры превращения, к расширению температурного диапазона бейнитного превращения за счет снижения приблизительно на 50 °С его конечной температуры и к его сдвигу вправо, в область низких скоростей охлаждения (до 1 °С/с). В результате этого в интервале промышленных скоростей охлаждения в структуре увеличивается количество бейнита, причем образовавшийся бейнит имеет преимущественно реечную морфологию (рис. 3 б), что, как было показано, вызывает снижение сопротивления хрупким разрушениям [4].

При увеличении содержания углерода до 0,08 % на термокинетических диаграммах начальная температура выделения феррита снижается на 20 – 30 °С (рис. 2). Интервал скоростей образования бейнита расширяется вправо в сторону меньших скоростей охлаж-

дения (от 10 °C/с до 3 °C/с), в структуре увеличивается содержание бейнита (рис. 4 а). Формирование крупного аустенитного зерна приводит к значительному (~100 °C) снижению конечной температуры бейнитного превращения, и в этом случае образуется бейнит реечной морфологии.

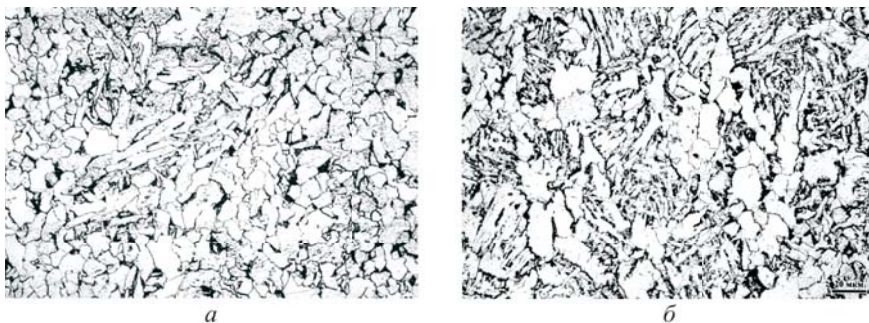


Рис. 4

Структура марганцевой стали с содержанием углерода 0,08 % масс. при охлаждении со скоростью 10 – 15 °C/с после деформации со степенью 25 % при 920 °C с исходной мелкозернистой (а) и крупнозернистой (б) структурой аустенита после нагрева до 1000 °C и 1200 °C соответственно

Анализ фазовых превращений в марганцевой стали с различным содержанием углерода показал, что феррито-перлитная структура с небольшим содержанием бейнита образуется в интервале промышленных скоростей охлаждения (5 – 16 °C/с) стали с низким содержанием углерода и мелким зерном аустенита после пластической деформации. В связи с этим температура нагрева под прокатку и температурный интервал проведения первой стадии прокатки, должны обеспечивать формирование мелкозернистого аустенита.

Исследование влияния термодиформационных параметров термомеханической обработки на структуру и свойства стали

Изготовление листового проката толщиной 40 – 50 мм из стали марки 05ГФБ (состав 1) проводилось по схеме двустадийной термомеханической обработки, включающей:

аустенизацию;

первую стадию прокатки, обеспечивающую прохождение процессов рекристаллизации для обеспечения мелкого зерна аустенита;

промежуточное подстуживание в установке ускоренного охлаждения и последующее выравнивание температуры на воздухе;

вторую стадию прокатки в области температур точки A_{r3} , обеспечивающей максимальное количество центров зарождения α -фазы при последующем охлаждении;

охлаждение в установке контролируемого охлаждения до температуры, обеспечивающей формирование структуры оптимальной морфологии;

замедленное охлаждение на воздухе для прохождения процессов самоотпуска.

Анализ влияния технологических параметров термомеханической обработки на микроструктуру стали, выполненный при изготовлении опытно-промышленной партии, показал следующее.

Микроструктура всех прокатанных листов толщиной 40–50 мм, представляет феррито-перлитную смесь, при этом общее содержание перлита в структуре не превышает 5 – 8 %.

Проведение второй стадии прокатки несколько выше точки A_{r3} листа № 1 толщиной 40 мм обеспечивает формирование феррито-перлитной структуры (рис. 5 а, б) со средним размером зерна феррита, соответствующего 8 номеру по ГОСТ 5639 (22 мкм), и равномерным распределением перлита.

Сталь с такой структурой характеризуется высоким уровнем прочностных свойств: $\sigma_T = 355\text{--}365$ МПа, $\sigma_B = 430\text{--}445$ МПа, однако уже при температуре испытаний минус 40 °С наблюдается снижение отдельных значений работы удара до 37 Дж, а при минус 60 °С – до 19 Дж.

При снижении температуры второй стадии прокатки в межкритический интервал температур $A_{r3}\text{--}80$ °С (лист № 2) формируется структура в виде чередующихся полос с очень мелкими (13 – 14 номер по ГОСТ 5639 (3 – 4 мкм)) и крупными (4 номер по ГОСТ 5639 (88 мкм)) сильно деформированными зернами феррита. Перлит в структуре располагается в виде тонких полос, крупные зерна феррита имеют хорошо развитую субструктуру (рис. 5 в, г). Сталь с такой структурой обеспечивает высокие прочностные характеристики: $\sigma_T = 365\text{--}375$ МПа, $\sigma_B = 460\text{--}475$ МПа, при этом также, как и в случае окончания прокатки при температуре A_{r3} , наблюдаются нестабильные значения работы удара. Разброс значений работы удара при температуре испытаний минус 60 °С составляет от 281 до 11 Дж. Наиболее вероятной причиной этого является наличие в структуре крупных ферритных зерен.

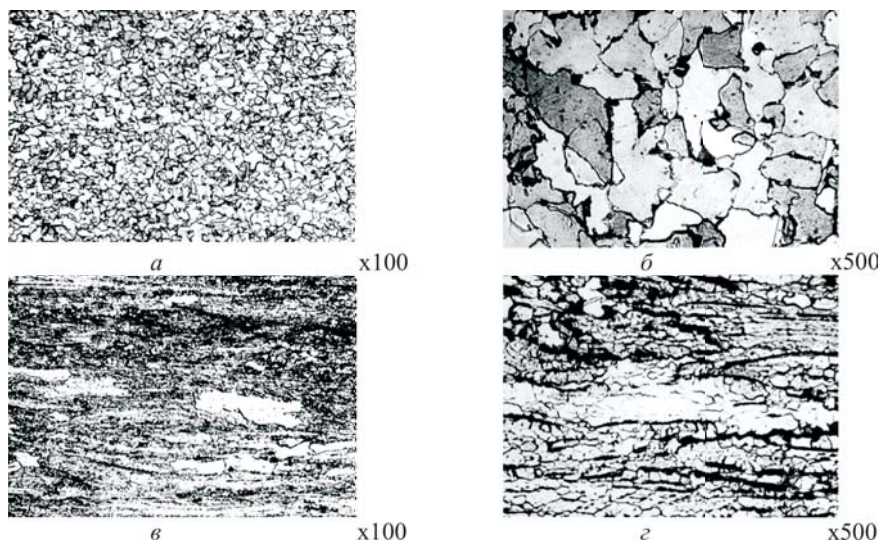


Рис. 5

Микроструктура листов из стали состава 1 толщиной 40 мм с конечной температурой прокатки $A_{13} + 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ – лист № 1 (а, б) и $A_{13} - 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ – лист № 2 (в, г)

В связи с этим необходимо было откорректировать температурно-деформационные параметры термомеханической обработки и окончательного охлаждения для обеспечения максимального измельчения зерна феррита.

Изготовление листового проката стали марок FW, F32W толщиной до 50 мм для сертификации Российским морским регистром судоходства.

С учетом анализа фазовых превращений и результатов, полученных при прокатке опытно-промышленной партии стали нормальной и повышенной прочности с пределом текучести 235 МПа и 315 МПа состава 1, была выплавлена и прокатана на стане «5000» ЧерМК ОАО «Северсталь» партия листового проката из марганцевой стали состава 2 (табл. 1).

Прокат изготавливался по откорректированной технологии термомеханической обработки. Для обеспечения требуемого соответствия

прочностных характеристик и вязкости была откорректирована температура чистовой стадии прокатки:

для листов толщиной 40 мм – была задана в интервале ($A_{r3} - 40\text{ °C}$) – ($A_{r3} - 60\text{ °C}$);

для листов толщиной 50 мм с учетом большей толщины подката температура второй стадии прокатки составляла $A_{r3} - 70\text{ °C}$.

На всех листах толщиной 40 мм выбранные параметры термомеханической обработки обеспечили формирование высокого комплекса прочностных и пластических свойств: $\sigma_T = 350\text{--}415\text{ МПа}$, $\sigma_B = 460\text{--}500\text{ МПа}$, $KV^{60} = 274\text{--}334\text{ Дж}$, $KV^{80} = 232\text{--}334\text{ Дж}$ и плотное волокнистое строение изломов технологических проб натурной толщины.

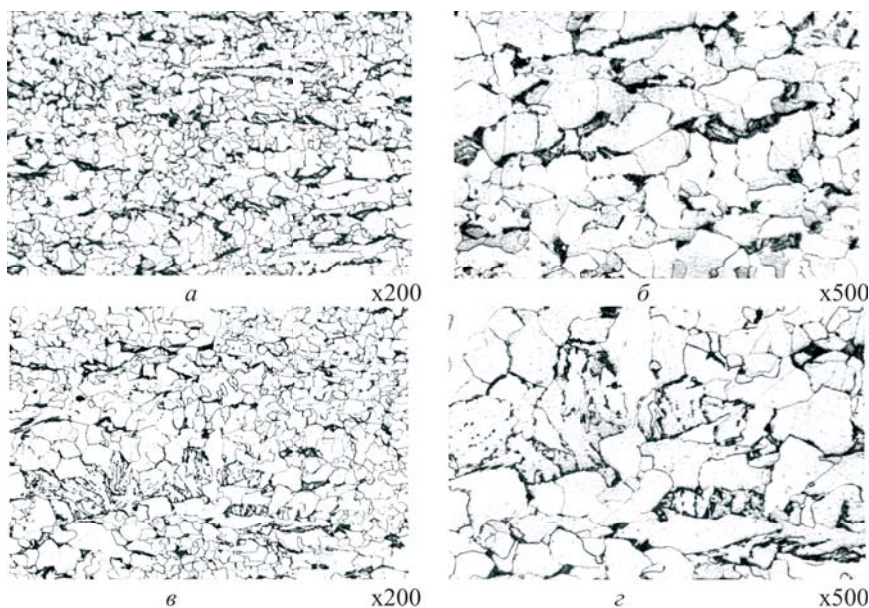


Рис. 6

Микроструктура середины толщины листов из стали состава 2 толщиной 50 мм с конечной температурой прокатки $A_{r3} - 70\text{ °C}$ и ускоренным охлаждением до феррито-перлитной области – лист № 5 (а, б) и феррито-бейнитной области – лист № 4 (в, г)

На двух из четырех изготовленных листах толщиной 50 мм при высоком уровне прочностных свойств: $\sigma_T = 350\text{--}400\text{ МПа}$,

$\sigma_T = 445\text{--}490$ МПа наблюдалось снижение работы удара (лист № 3, 5) как в исходном состоянии, так и после механического старения KV⁻⁶⁰ – до 20 Дж (табл. 2).

Исследования микроструктуры (рис. 6), в том числе сравнительная оценка размеров ферритных зерен (рис. 7) показали, что в структуре листа № 3, на котором наблюдалось снижение работы удара, присутствуют отдельные бейнитные области, размер которых соответствует 4 номеру по ГОСТ 5639 (88 мкм). Размер этих областей коррелирует с

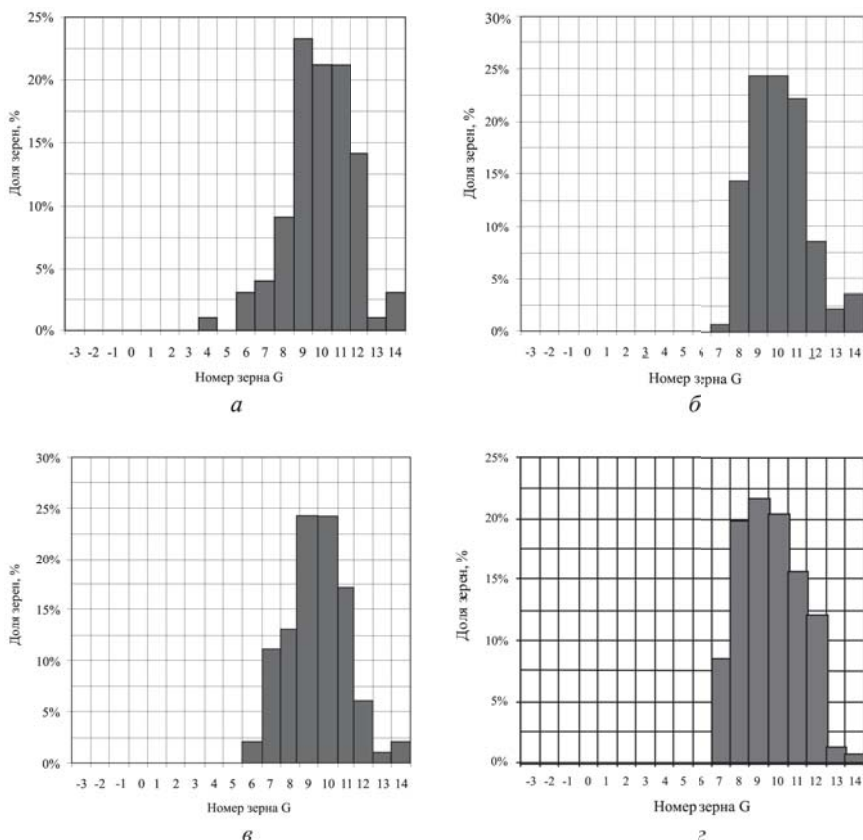


Рис. 7
Результаты статистической оценки величины действительного зерна на листах №№ 3(а), 4(б), 5(в), 6(г)

Таблица 2
Режимы прокатки и механические свойства листового проката толщиной 40 и 50 мм

№ листа	Толщина листа, мм	Конечная температура второй стадии прокатки	Конечная температура ус-коренного охлаждения, °С	Предел текучести, МПа	Временное сопротивление, МПа	Относительное удлинение, %	Работа удара, Дж					Работа удара после механического старения, Дж		% волокна в изломе
							1/4 тол-щи-ны листа	1/2 тол-щи-ны листа	1/4 тол-щи-ны листа	1/2 тол-щи-ны листа	минус 80 °С	поверх-ность по толщине	минус 60 °С	
1	40	$A_3 + 10\text{ °C}$	470	355/365	440/445	32/32	264 – 19 204	264 – 240 253	–	–	–	278 – 8 146	–	–
2		$A_3 - 80\text{ °C}$	445	355/375	470/465	28/32	281 – 16 95	265 – 11 142	–	–	–	19 – 9 13	–	–
3	50	$A_3 - 80\text{ °C}$	510	390/370	490/470	34/34	337 – 20 141	334 – 25 271	263 – 7 62	318 – 6 69	–	327 – 12 170	100	100
4		$A_3 - 70\text{ °C}$	530	360/350	465/445	40/39	339 – 312 325	321 – 288 309	315 – 95 211	321 – 124 282	–	345 – 327 336	100	100
5		$A_3 - 60\text{ °C}$	570	370/400	450/480	36/36	350 – 323 334	357 – 20 191	329 – 7 87	345 – 10 174	–	357 – 24 282	100	100
6		$A_3 - 60\text{ °C}$	535	395/390	480/460	37/37	327 – 284 312	320 – 195 281	303 – 262 278	325 – 124 213	–	361 – 320 343	100	100

размером исходного нерекристаллизованного аустенитного зерна. Лист № 3 охлаждался до самой низкой температуры (510 °С), что и привело к образованию бейнита, который образуется во всем объеме аустенитного зерна в отличие от диффузионного ферритного превращения, которое обуславливает разбиение нерекристаллизованного аустенитного зерна, в том числе из-за влияния повышенной плотности несовершенств кристаллического строения после пластической деформации.

Средний размер ферритного зерна в листах № 6 и № 4, имеющих высокие значения работы удара при минус 60 °С, соответствует 9 – 10 номеру по ГОСТ 5639 (10 – 8 мкм). Приблизительно третью часть структуры составляют зерна, размером 3 – 8 мкм (11–14 номер по ГОСТ 5639).

Таким образом, структура листов, изготовленных по оптимальным режимам, отличается гомогенностью и обеспечивает высокий уровень работы удара.

Проведенная корректировка режимов деформации и охлаждения, позволила обеспечить прочностные характеристики стали с пределом текучести не менее 315 МПа и хладостойкостью до минус 60 °С. Результатом работы явилось изготовление опытно-промышленной партии листового проката сталей FW и F32W, проведение сертификационных работ и аттестация производства на класс Регистра.

Заключение

При изготовлении листового проката толщиной до 50 мм по технологии двустадийной термомеханической обработки с окончанием прокатки при температуре (A_{r3} – 40 °С) – (A_{r3} – 60 °С) для стали с содержанием углерода 0,05 – 0,07 % масс., экономнолегированной никелем (до 0,25 %) и марганцем (до 0,95 %), обеспечивается формирование мелкозернистой феррито-перлитной структуры с размером ферритного зерна 8 – 12 номера по ГОСТ 5639 (6 – 15 мкм) по всему сечению проката больших толщин, что удовлетворяет требованиям по хладостойкости и прочностным характеристиками, предъявляемым к стали FW и F32W.

Проведена сертификация на соответствие Правилам Российского морского регистра судоходства листового проката стали нормальной и повышенной прочности с пределом текучести 235 и 315 МПа в толщинах до 50 мм, показавшая пригодность разработанных сталей и технологий их производства для строительства арктических технических сооружений.

Список литературы

1. Солнцев Ю.П., Пряхин Е.И., Пирайнен В.Ю. Специальные материалы в машиностроении. – СПб.: Химиздат, 2004. – 640 с.

2. Одесский П.Д., Рудченко В.В., Шабалов И.П. Термомеханическое и термическое упрочнение строительных сталей // Металловедение и термическая обработка металлов. – № 3. – 2005. – С. 34 – 44.

3. Счастливцев В.М., Табатчикова Т.И., Яковлева И.Л., Умова В.М., Виноградова Н.И., Егорова Л.Ю., Семичева Т.Г., Круглова А.А., Хлусова Е.И. Влияние режимов термомеханической обработки на структуру и механические свойства листового проката из низкоуглеродистых низколегированных сталей. // Вопросы материаловедения. – № 3 (43). – 2005. – С.13 – 23.

4. Смагоринский М.Е. и др. Справочник по термомеханической и термоциклической обработке металлов. – СПб.: Политехника, 1992. – 416 с.

5. Рыбин В.В., Малышевский В.А., Хлусова Е.И., Нестерова Е.В., Орлов В.В., Калинин Г.Ю. Экономнолегированные стали с наномодифицированной структурой для эксплуатации в экстремальных условиях // Сборник докладов IX Международного научно-технического конгресса термистов и металлоспециалистов. – Харьков, 2008. – Т. 2. – С. 128 – 138.

В.А. Малышевский, Е.И. Хлусова, А.В. Ильин, В.К. Башаев

КОМПЛЕКСНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ НОВЫХ МАРОК ХЛАДОСТОЙКОЙ СТАЛИ С ПРЕДЕЛОМ ТЕКУЧЕСТИ ОТ 235 ДО 690 Н/ММ² ДЛЯ АРКТИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ

Среди приоритетных направлений развития экономики России в XXI веке важное место отводится ускоренному освоению природных ресурсов северных регионов страны и, прежде всего, уникальных месторождений нефти и газа на Арктическом шельфе.

Работы, запланированные в рамках освоения месторождений, предусматривают комплексное развитие территорий северных регионов и Дальнего Востока. Для этого необходимо строительство нефтегазодобывающих платформ, танкеров, газозовов, судов технического флота, в т. ч. ледового плавания, систем транспортировки нефти и газа, а также резервуаров, цистерн и терминалов для хранения углеводородов, заводов по переработке сжиженного природного газа, береговых технологических комплексов, грузоподъемных кранов, мостов и других конструкций различного назначения.

К сталям, используемым для строительства морских сварных конструкций, ледокольно-транспортного флота, ледостойких буровых платформ, плавучих атомных станций и др. предъявляется целый ряд особых требований: широкий интервал прочностных характеристик (от 235 до 690 Н/мм²) в сочетании с высокими пластичностью и вязкостью, высокое сопротивление хрупким разрушениям при температурах эксплуатации до минус 40 °С, сопротивление воздействию статических, динамических и циклических нагрузжений, отсутствие коррозионно-механических повреждений при расчетном сроке эксплуатации в морской воде, сопротивление слоистым разрушениям в узлах сварных конструкций, достаточная технологичность при изготовлении (гибке, правке) и сварке элементов конструкций, обеспечивающая возможность изготовления крупными блоками и сборку на открытых площадках в условиях низких температур (в отдельных случаях до минус 20 °С).

В 2001 г. были разработаны Правила классификации, постройки и оборудования плавучих буровых установок и морских стационарных

платформ [1], определяющие систему требований к объемам, методам испытаний, к характеристикам вязкости, трещиностойкости и хладостойкости основного металла и металла зоны термического влияния сталей, предназначенных для эксплуатации при предельно низких температурах. В связи с этим к качеству стали предъявляются более жесткие требования. Введена категория «W» для сталей улучшенной свариваемости с особыми требованиями по химическому составу, требованиями по свариваемости и энергии удара, стойкости к слоистым разрушениям.

До недавнего времени повышение хладостойкости и трещиностойкости сталей достигалось преимущественно за счет дополнительного легирования никелем в сочетании с хромом и молибденом и совершенствования режимов термической обработки (закалки с отпуском). Однако повышение уровня легирования и использование энергоемких технологических процессов приводило к существенному росту затрат, а конструкции для арктического шельфа имеют огромную материалоемкость.

Другим менее затратным направлением решения задачи повышения свойств и качества хладостойких свариваемых сталей стало создание сталей со структурой заданной морфологии и измельчение структурных составляющих, в том числе на субмикроровне, путем применения методов термомеханической обработки при одновременном снижении содержания углерода, вредных примесей, рациональном легировании, использовании элементов, измельчающих зерно, а также модификаторов формы неметаллических включений. Это направление стало возможным в последние годы благодаря достижениям металлургической технологии, использованию вакуумирования, рафинирования, внепечной обработки стали и т. п.

Итогом этих работ, выполненных совместно с ЧерМК ОАО «Северсталь», ООО «ОМЗ-Спецсталь», ФГУП ЦНИИ Чермет и рядом других, стало создание новых хладостойких (до температуры минус 60 °С) высокотехнологичных марок стали с пределом текучести от 235 до 690 Н/мм² [2–6]:

нормальной, повышенной и высокой прочности улучшенной свариваемости с гарантией сопротивляемости слоистым разрывам для эксплуатации в конструкциях при температурах до минус 20 °С – минус 30 °С марок DW, EW, D32W, E32W, D36W, E36W, D40W, E40W, D460W, E460W, D500W, E500W, D620W, E620W, D690W, E690W;

нормальной, повышенной и высокой прочности улучшенной свариваемости с гарантией сопротивляемости слоистым разрывам для эксплуатации в конструкциях при температурах до минус 40 °С – минус 50 °С марок FW, F32W, F36W, F40W, F420W, F460W, F500W, F620W, F690W.

Разработан новый Национальный стандарт РФ «Прокат стальной для судостроения из стали нормальной, повышенной и высокой прочности». Новые стали и технологии защищены патентами РФ [7–9].

Разработана и внедрена в промышленности технология термомеханической обработки низкоуглеродистых хладостойких свариваемых сталей, заключающаяся в целенаправленном формировании высокодисперсной, квазиизотропной фрагментированной структуры заданного состава и морфологии по сечению листового проката толщиной до 60–70 мм на всех стадиях технологического передела. Впервые внедрена технология термомеханической обработки листового проката толщиной до 60 мм из хладостойких сталей категории F, обеспечивающая высокий уровень их физико-механических свойств.

Целью настоящей работы являлась оценка качества и характеристик работоспособности листового проката и сварных соединений из хладостойких марок стали для конструкций, эксплуатирующихся на арктическом шельфе.

Для подтверждения стабильности свойств, требуемых характеристик прочности и деформационной способности при статическом нагружении, коррозионной стойкости и коррозионно-механической прочности, циклической прочности листового проката и сварных соединений, а также технологичности, для листового проката каждого уровня прочности в соответствии с требованиями Российского морского регистра судоходства проведены:

- определение механических характеристик листового проката с оценкой изотропности их свойств: при растяжении и ударном изгибе в диапазоне температур минус 20 °С – минус 80 (100) °С, в том числе после деформационного старения, с определением относительного сужения при испытании образцов, вырезанных в направлении толщины листа;

- оценка вида излома технологических проб;

- исследование металлургического качества с оценкой макроструктуры, серных отпечатков и структуры стали;

- определение критических температур хрупко-вязкого перехода T_K , T_{KB} и NDT: при динамическом нагружении по критерию поглощенной энергии при разрушении образцов типа Шарпи с острым надрезом, вырезанных в продольном и поперечном направлении (T_K); при динамическом нагружении образцов толщиной 19 мм с предварительно нанесенной хрупкой наплавкой с концентратором напряжений (NDT); при статическом нагружении технологических проб толщиной, равной толщине листа (T_{KB});

- определение характеристик трещиностойкости (CTOD);

оценка свариваемости по результатам сварки крупногабаритных «жестких» проб, разработанных ЦНИИТС, и определение механических свойств стыковых сварных соединений;

контроль твердости HV металла ЗТВ;

контроль технологической пластичности при испытаниях на изгиб сварных соединений;

коррозионно-механические испытания.

Для испытаний хладостойких сталей был отобран листовой прокат из стали марок FW и F32W толщиной 20 и 40 мм, F36W толщиной 20 и 40 мм, F40W толщиной 30, 40 и 50 мм, изготовленный с использованием термомеханической обработки, и из стали марок F500W толщиной 30 и 40 мм, F690W толщиной 25 мм, изготовленный после закалки с прокатного нагрева с отпуском на стане «5000» ЧерМК ОАО «Северсталь», а также (для сравнения) – листовой прокат из стали марок F40W толщиной 30, 40 и 50 мм, F500W толщиной 30 и 40 мм, F690W толщиной 35 мм, изготовленный закалкой с высоким отпуском.

1 Исследование механических характеристик хладостойких марок стали различной категории прочности при понижающихся температурах

Результаты определения временного сопротивления, предела текучести, относительного удлинения, относительного сужения в Z-направлении при комнатной температуре и работы (энергии) удара при температуре испытания минус 60 °С, в том числе после механического старения, для стали после термомеханической обработки по результатам сертификационных испытаний приведены на рис. 1 – 3. Установлено, что для стали исследованных марок после термомеханической обработки характеристики прочности при снижении температуры испытания до минус 60 °С изменяются не более чем на 10 %, а пластичность и вязкость сохраняются на высоком уровне, что позволяет рекомендовать применение стали для эксплуатации при низких температурах. Относительное сужение на образцах, вырезанных перпендикулярно поверхности листа (в Z-направлении), практически не изменяется при понижении температуры испытания и составляет не менее 60 %.

Вид изломов технологических проб после испытания при комнатной температуре, рис. 4, характеризуется отсутствием значительных расслоений, что свидетельствует об однородности и изотропности структуры стали после термомеханической обработки.

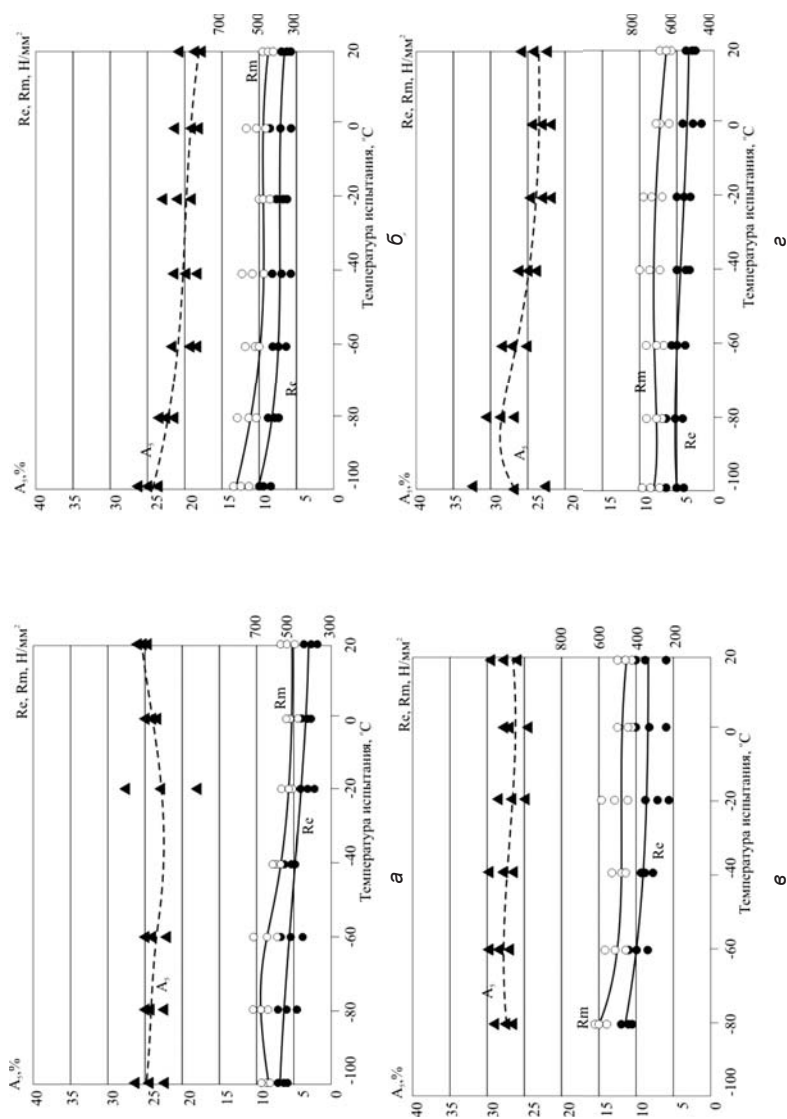


Рис. 1

Влияние температуры испытания на изменение характеристик прочности и пластичности листового проката толщиной 40 мм из стали марок: а – F32W, б – F36W, в – F40W, г – F500W

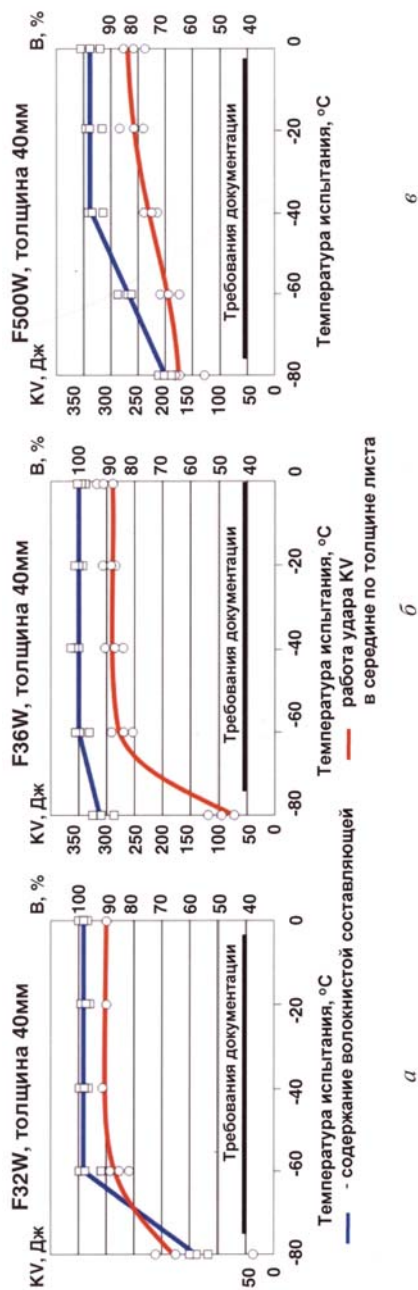
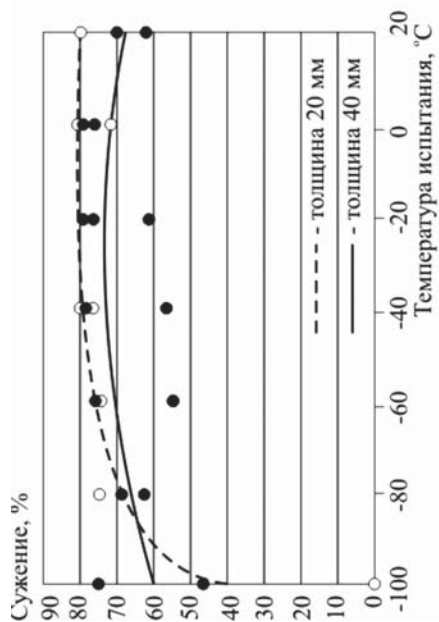
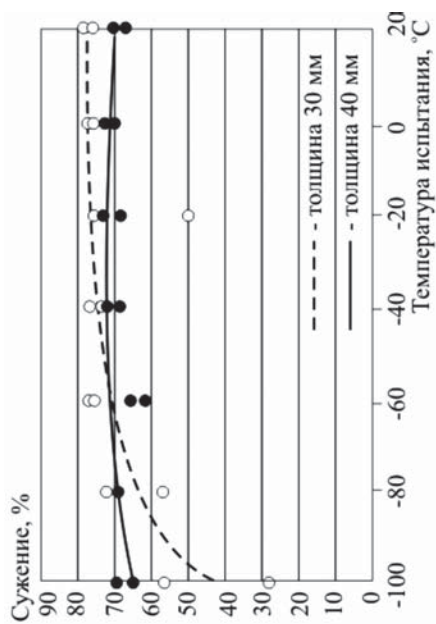


Рис. 2

Работа удара и содержание волокнистой составляющей в изломе ударных образцов из хладостойких сталей (а – F32W, б – F36W, в – F500W, листовая прокат толщиной 40 мм) при понижающихся температурах испытаний



а



б

Рис. 3

Влияние температуры испытания на изменение относительного сужения при растяжении образцов, вырезанных в направлении листов 40 мм, из стали марок: а – F32W, б – F36W

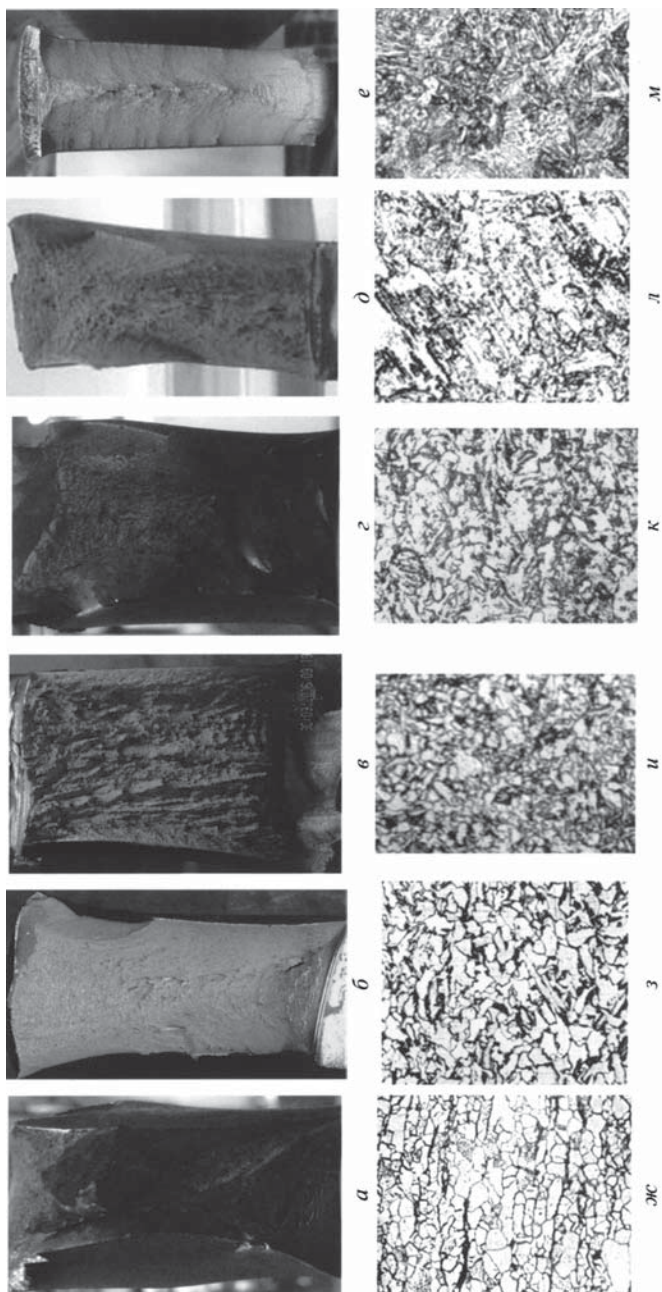


Рис. 4

Вид излома (а-е) и структура (ж-м, х500) технологических проб из стали марок:

F32W (а) толщиной 50 мм, F36W (б) толщиной 40 мм, F40W (в) толщиной 60 мм, F450W (г) толщиной 50 мм, F500W (д) толщиной 30 мм, F690W (е) толщиной 25 мм после ТМО

2 Сопротивление новых марок хладостойкой стали хрупким разрушениям при низких температурах и возможности расширения температурного диапазона их использования

2.1 Определение критических температур хрупкости.

Критические температуры хрупкости стали приведены в табл. 1, серийные зависимости работы (энергии) удара при понижающихся температурах испытания – на рис. 2.

Таблица 1

Вязкость и трещиностойкость хладостойких сталей и их сварных соединений

Марка стали	Толщина, мм	Технология изготовления	NDT, °C	T _{кв} , °C	CTOD, мм, среднее значение при температуре, °C		KV по линии сплавления, Дж среднее значение при T=-60 °C, низкое/высокое тепловложение
					основной металл	сварное соединение	
1	2	3	4	5	6	7	8
F32W	40	TMO	-45	-20	0,88 при -80	-	212*
F36W	40	TMO	-40	-5	0,88 при -40	-	-
		3+O	-65	-5	0,82 при -70	0,18 при -50	118/75
F40W	40	TMO	-85	-30	0,57 при -70	0,42 при -50	233*
		3+O	-65	-31	-	-	-
	50	TMO	-70	+10	1,02 при -40	0,45 при -30	89/88
		3+O	-70	+4	1,39 при -70	0,60 при -40	141/144
	60	TMO	-65	-	1,36 при -70	0,48 при -40	102/148
		3+O	-70	-22	-	0,58 при -50	-
F460W	30	TMO	-80	-11	-	-	-
		3+O	-70	-22	-	0,58 при -50	-
	50	TMO	-75	+15	0,42 при -75	0,28 при 0	-
		3+O	-70	-23	0,84 при -70	0,39 при -50	123/73

1	2	3	4	5	6	7	8
F500W	30	ТМО	-73		–	–	–
		3+О	-50	-15	0,38 при -60	0,34 при -40	124/70
	40	ТМО	-60	-58	0,80 при -70	0, при -40	203*
		3+О	-65	-5	–	–	90/81
F690W	25	ЗПН+О	-50	-40	0,27 при -60	–	89*
* – на расстоянии 2 мм от линии сплавления							

Температура вязко-хрупкого перехода T_K , определенная по критерию количества вязкой составляющей (не менее 50 %) или по заданному минимальному значению 50 Дж, находится ниже минус 60 °С – минус 80 °С. Вязкость стали, несмотря на повышение значений предела текучести (рис. 2) сохраняется на высоком уровне (не менее 150–200 Дж). Температура NDT для листов толщиной менее 40 мм составляет минус 60 °С и ниже, что позволяет рекомендовать листовой прокат для применения в основных и специальных элементах конструкций при циклических нагрузках с непосредственным приложением динамических ледовых или сейсмических нагрузок или при циклических с преобладанием растягивающих или изгибных нагрузок.

В отличие от критических температур вязко-хрупкого перехода T_K и NDT результаты определения температуры T_{K6} обладают большим рассеянием. Для большинства исследованных сталей после термической обработки температура T_{K6} составляет минус 40 °С – плюс 10 °С, после термомеханической обработки – от минус 50 °С до плюс 15 °С (табл. 1). Обнаружено, что такая нестабильность всегда обусловлена очень широким температурным диапазоном, в котором доля волокнистой составляющей в изломах проб из низкоуглеродистой стали со смешанной структурой плавно изменяется от 100 до 0 %. С этим связаны и трудности точного определения температуры T_{K6} по критерию 70 % волокнистой составляющей в изломе крупногабаритных проб. Отсутствие корреляции результатов этих испытаний с другими видами испытаний, например, по определению критического раскрытия трещины, делает целесообразным дополнительный анализ представительности данной пробы для оценки работоспособности толстолистового проката повышенной и высокой прочности.

2.2 Вязкость разрушения и критическое раскрытие трещины основного металла и сварных соединений новых сталей.

Согласно требованиям Регистра, представленным в Правилах классификации, постройки и оборудования плавучих буровых установок и морских стационарных платформ, для металла в толщине большей, чем регламентировано [1], требуется проведение испытаний на трещиностойкость. Регламентируемым параметром является деформационный параметр критического раскрытия трещины CTOD. Полученные значения величины критического раскрытия трещины для основного металла и для металла зоны термического влияния представлены в табл. 1. Для основного металла полученные характеристики значительно превышают требования, которые в ряде случаев выполняются до температуры минус 80 °С, для металла ЗТВ – соответствуют требованиям.

Полученные результаты показывают, что за счет более равномерной структуры по толщине листового проката величина критического раскрытия трещины CTOD для основного металла после закалки и отпуска выше, однако и уровень, полученный для стали после термомеханической обработки, отвечает требованиям Российского морского регистра судоходства, причем для металла ЗТВ влияние способа производства оказывается несущественным.

3 Проверка работоспособности хладостойкой стали при циклическом нагружении и коррозионном воздействии морской воды

3.1 Испытания при циклических нагружениях.

Для определения сопротивления циклическому нагружению стали с гарантируемым пределом текучести 315, 390 и 500 Н/мм² были выбраны методики испытаний, позволяющие определить наиболее консервативные оценки. Поскольку пластичность стали в Z-направлении из-за возможной структурной неоднородности может снижаться, испытания выполнены на образцах, приведенных на рис. 5, с приложением нагрузки именно в этом направлении. Для этого изготавливались сварные крестообразные заготовки, которые затем были состроганы заподлицо до образования плоской рабочей части.

Нагружение производилось при отнулевом растяжении на воздухе и в морской воде при $\sigma_{\max} = 0,7\sigma_{0,2}$ при частоте нагружения на воздухе – 1 Гц, в морской воде – 0,1 Гц. Результаты испытаний приведены на рис. 6.

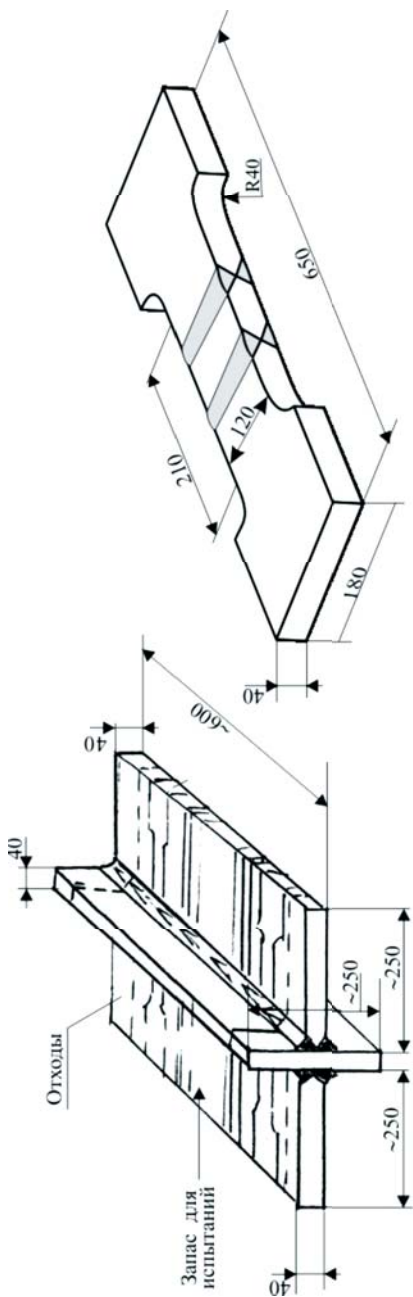


Рис. 5
Эскиз крестообразного сварного образца для циклических испытаний

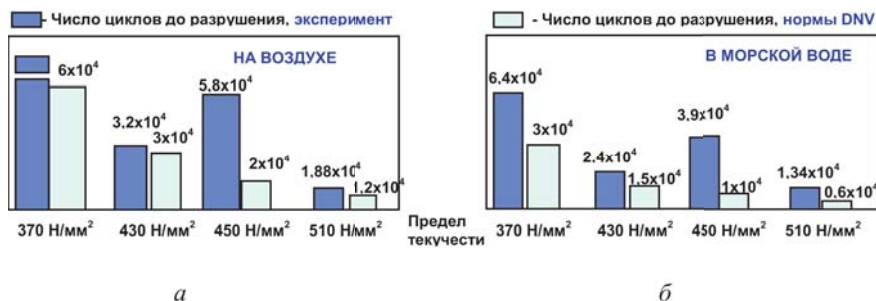


Рис. 6
 Результаты испытаний на сопротивление циклическому нагружению,
 а – на воздухе, б – в морской воде

Все стали показали высокое сопротивление разрушению при циклической нагрузке – разрушение произошло по сварному соединению. Это свидетельствует о том, что в листовом прокате была сформирована изотропная структура, без расслоений, которая и обеспечивает высокую циклическую долговечность сталей. Полученные значения числа циклов до разрушения во всех случаях превысили допускаемые нормативным документом Det Norske Veritas (использовались нормативные кривые усталости для основного металла) [10]. Полученные результаты позволяют прогнозировать достаточную работоспособность стали после термомеханической обработки в составе морских технических сооружений, судов и надводных кораблей.

3.2 Испытания на сопротивление коррозии и коррозионно-механическим повреждениям.

Испытания на коррозионное растрескивание образцов с введенной усталостной трещиной из хладостойких сталей с пределом текучести от 235 до 690 Н/мм² после термомеханической обработки проводились в соответствии с ГОСТ 9.903 по схеме медленного (ступенчатого) нагружения по методике, разработанной ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей» с соблюдением требований указанного стандарта применительно к сталям, предназначенным для эксплуатации в морской воде в составе сварных корпусных конструкций.

Полученные результаты испытаний приведены на рис. 7.

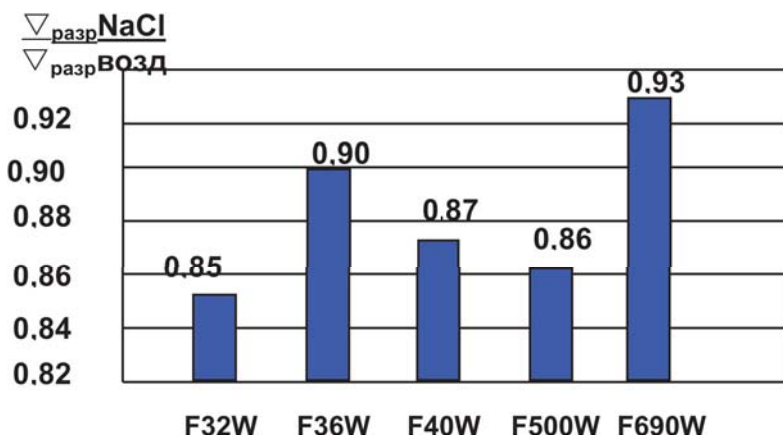


Рис. 7

Результаты испытаний хладостойких сталей различной категории прочности на коррозионное растрескивание

Предшествующими исследованиями экспериментально было показано, что при соотношении разрушающих напряжений в коррозионной среде (σ_{NaCl}) и на воздухе ($\sigma_{\text{возд}}$), большем или равном 0,85, материал может рассматриваться как не склонный к коррозионному растрескиванию под напряжением. В связи с небольшими размерами испытываемого образца (10×10 мм в сечении) испытания не позволяют непосредственно определять величину K_{Isc} при больших ее значениях. Однако приближенная оценка этой величины может быть сделана по указанному соотношению разрушающих нагрузок (через расчет величины J -интеграла при разрушении):

$$\text{при } \sigma_{\text{NaCl}} / \sigma_{\text{возд}} = 0,85 \quad K_{\text{Isc}} \approx 5,6 \text{ мм}^{1/2} \cdot \sigma_{0,2}.$$

Эта величина обеспечивает отсутствие продвижения трещины при напряжениях до предела текучести при наличии исходного дефекта глубиной не менее 15 мм.

Как следует из рис. 7, значения $\sigma_{\text{NaCl}} / \sigma_{\text{возд}}$ для всех сталей превышают пороговый критерий 0,85 и не имеют определенной зависимости от предела текучести. Исследуемые стали с пределом текучести от 235 до 690 Н/мм² после термомеханической обработки не проявляют склонности к коррозионному растрескиванию в синтетической морской воде.

4 Оценка свариваемости стали

Сварка стыковых сварных соединений осуществлялась при двух уровнях погонной энергии: 0,8 и 3,5 кДж/мм. Отбор ударных образцов от пробы стыкового соединения для проведения испытаний проводили в поперечном сварке направлении. Результаты испытаний при температуре минус 60 °С представлены на рис. 8.



Рис. 8

Работа удара стыковых сварных соединений

Сварку жестких проб проводили на открытом воздухе без предварительного подогрева. Погонную энергию сварки определили с учетом максимального тепловложения, использующегося на ФГУП «ПО «Севмашпредприятие» при сварке крупногабаритных конструкций – 2,5 кДж/см². Жесткую пробу изготавливали автоматической сваркой, использовали сварочную проволоку 10ГНА и флюс 48АФ53. После сварки верхней части пробы ручной дуговой сваркой приваривали ребра жесткости и переворачивали для сварки нижней части пробы. Межпроходная температура задавалась не более 120 °С.

В соответствии с приведенными технологическими параметрами изготовлены жесткие пробы из стали марок F32W, F36W, F40W.

После изготовления произведен контрольный осмотр поверхности шва, линии сплавления и прилегающего металла, проведены исследования на шлифах. Трещин и дефектов сварного соединения не обнаружено.

Таким образом, результаты сертификационных испытаний стали, в том числе большой толщины (30–60 мм), и квалификационных испытаний сварочных процедур, проводимых по программам Российского морского регистра судоходства, в том числе в производственных условиях ФГУП «ПО «Севмашпредприятие», подтвердили возможность применения этих материалов при температурах ниже минус 30 °С – минус 40 °С, характерных для арктических и дальневосточных морей России, а в ряде случаев позволили расширить их применение до еще более низких температур. Сварные соединения, выполненные из разработанных сталей низколегированными сварочными материалами, показали высокое сопротивление коррозионно-механическим разрушениям и циклическим нагрузкам.

Производство разработанных сталей освоено на станах «2800» (г. Череповец) и «5000» (г. Колпино) ОАО «Северсталь» и на ООО «ОМЗ-Спецсталь».

В первую очередь крупнейшим объектом внедрения новых марок стали стала морская ледостойкая платформа для эксплуатации на нефтяном месторождении «Приразломное» в Печорском море, рис. 9 а. Общая металлоемкость конструкции составляет 75000 т, при этом для самых ответственных узлов конструкции поставлено около 38000 т ледостойкой стали марок E36CB, E36W, E40W, F36SCB, F36SW, F40W, толщиной от 15 до 45 мм. Новые стали хорошо зарекомендовали себя в производстве, подтверждена их высокая технологичность. При этом высокая структурная устойчивость новых сталей при технологических переделах – гибке, правке, резке и сварке, позволила обеспечить получение высококачественных конструкций, которые в соответствии с оценкой сопротивлению воздействиям низких температур, морской воды, ветроволновым и циклическим нагрузкам несомненно обеспечат их надежную эксплуатацию и экологическую безопасность на весь срок службы (более 30 лет).

Вторым крупным объектом внедрения новых сталей являлось проектирование и строительство самоподъемной плавучей платформы «Арктическая» (рис. 9 б) на ФГУП МП «Звездочка» (г. Северодвинск). Уникальность этой разведывательной платформы состоит в проведении работ в самых суровых условиях Арктики. В связи с этим для основных ее узлов, работающих при температурах до минус 40 °С



а



б



в

Рис. 9

Применение хладостойких сталей для арктических конструкций:

- а – ледостойкая платформа для эксплуатации на нефтяном месторождении «Приразломное»;
- б – самоподъемная плавучая платформа «Арктическая»;
- в – многофункциональная платформа типа «MOSS MARITIME»

– минус 50 °С, использована сталь марок D500W, E500W, F500W толщиной от 20 до 50 мм.

Признанием высоких служебных характеристик новых сталей явилось их использование для строительства на класс DNV трех многофункциональных платформ типа «MOSS MARITIME» (проект CS50 МКII, рис. 9 в), предназначенных для эксплуатации в Арктике, на ФГУП ПО «Севмашпредприятие» по заказу Норвегии. Для них использова-

ны стали марки F36W толщиной 35 – 60 мм в объеме более 2500 т и марки E36W толщиной до 60 мм в объеме более 6000 т на одну платформу. Аттестация процедур сварки подтвердила полное соответствие разработанных сталей международным требованиям. Листовой прокат из стали марки F36W толщиной 50 и 60 мм использован также для отгрузочного причала Варандейского месторождения, опор грузоподъемного крана.

Применение новых сталей будет существенно возрастать в связи с предстоящим активным освоением арктического шельфа России в соответствии с программой превращения страны в мирового лидера по обеспечению углеводородами.

Выводы

1. Выполнен комплекс исследований работоспособности новых марок стали, в том числе стали категории F, по программам Российского морского регистра судоходства, Det Norske Veritas, подтвердивший их соответствие российским и международным требованиям, предъявляемым к сталям для судов арктического плавания, технических средств разведки и добычи углеводородов.

Показано, что разработанные стали обладают достаточно высокой трещиностойкостью при низких температурах, при этом стали повышенной хладостойкости устойчиво обеспечивают требуемый уровень CTOD основного металла до температур минус 50 °С – минус 70 °С, а сварные соединения – до температур минус 40 °С – минус 45 °С.

2. Высокий комплекс свойств исследованных сталей обеспечивается благодаря формированию изотропной однородной структуры по всей толщине и по площади листового проката за счет оптимизированной технологии производства.

3. Выполнен комплекс специальных коррозионно-механических, циклических и динамических испытаний листового проката из хладостойких марок стали и их сварных соединений и установлено их соответствие требованиям технической документации для эксплуатации в экстремальных условиях.

Дополнительные специальные испытания характеристик сопротивления хрупким разрушениям, циклической прочности, стойкости к слоистым разрушениям, динамические испытания позволяют расширить область возможного использования толстолистового проката больших толщин в составе конструкций морских ледостойких платформ при температурах ниже минус 30 °С.

4. Новые хладостойкие стали отличаются высокой устойчивостью структуры к сварочному циклу, сварные соединения отличаются высоким уровнем физико-механических свойств. Сертификация сварочных процедур показала равнопрочность сварных соединений и высокое сопротивление хрупким разрушениям при ручной, механизированной и автоматической сварке как в лабораторных, так и в производственных условиях при строительстве плавучих и стационарных буровых платформ, корпусов судов и глубоководной техники.

5. Разработанные стали и технологии освоены на крупнейших российских заводах ЧерМК ОАО «Северсталь» и ООО «ОМЗ-Спецсталь», использованы при строительстве МЛСП «Приразломная», СПБУ «Арктическая», серии многофункциональных платформ для Норвегии типа «MOSS», востребованы на российском и международном рынках.

Список литературы

1. Правила классификации, постройки и оборудования ПБУ и МСП. – СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2006.

2. Горынин И.В., Малышевский В.А., Семичева Т.Г., Хлусова Е.И. Создание новых экономнолегированных хладостойких сталей для судостроения и морской техники // Вопросы материаловедения. – № 2 (42). – 2005. – С. 27 – 29.

3. Владимиров Н.Ф., Семичева Т.Г., Хлусова Е.И., Голованов А.В. Разработка технологии и освоение производства новых хладостойких свариваемых сталей для ледостойких буровых платформ // Производство проката, 2005. – № 10. – С. 6 – 13.

4. Рыбин В.В., Малышевский В.А., Хлусова Е.И. Структура и свойства хладостойких сталей для конструкций северного исполнения // Вопросы материаловедения, 2006. – № 1 (45). – С. 24 – 44.

5. Башаев В.В., Круглова А.А., Орлов В.В., Подтелков В.В., Хлусова Е.И. Освоение технологии термомеханического упрочнения стали марок Е36W и F36W толщиной до 60 мм на ОАО «Северсталь» // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. Вып. 29. – СПб., 2006. – С. 158 – 174.

6. Горынин И.В., Рыбин В.В., Малышевский В.А., Хлусова Е.И. Принципы легирования, фазовые превращения, структура и свойства хладостойких свариваемых судостроительных сталей // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2007. – № 1. – С. 9–15.

7. Горынин И.В., Семичева Т.Г., Малахов Н.В., Хлусова Е.И. и др. Способ производства хладостойкого листового проката. Патент № 2265067 // Бюллетень изобретений № 33 от 27.11.2005.

8. Горынин И.В., Рыбин В.В., Владимиров Н.Ф., Хлусова Е.И. и др. Хладостойкая сталь повышенной прочности. Патент № 2269587 // Бюллетень изобретений № 4 от 10.02.2006.

9. Горынин И.В., Рыбин В.В., Малышевский В.А., Хлусова Е.И. и др. Хладостойкая сталь высокой прочности. Патент № 2269588 // Бюллетень изобретений № 4 от 10.02. 2006.

10. Det Norske Veritas. Classification Notes. – Note 30. – 2. Fatigue Strength Analysis for Mobile Offshore Units, 1984.

В.В. Рыбин, М.М. Пронин, В.Н. Старцев, В.П. Леонов

ТЕХНОЛОГИЯ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ СОТОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СУДОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ И ОЦЕНКА ИХ РАБОТОСПОСОБНОСТИ

Введение

Проектирование и строительство судов на базе безнаборных конструкций является перспективным направлением в современном мировом судостроении, о чем свидетельствует большой объем публикаций [1], [3], [4], [5], [6].

Крупнейшие фирмы – Kvaerner Massa Yard (Финляндия) [1], Fincantieri (Италия) и другие проводят исследования в области создания подобных конструкций и их практического применения. При этом отдается предпочтение новым высокопроизводительным технологиям сварки – в частности, с применением мощных лазерных установок. Проект широкого внедрения лазерных технологий резки и сварки при производстве крупногабаритных элементов корпусов контейнеровозов с 1997 г. осуществлялся в Дании на базе консорциума, включающего 5 судостроительных предприятий (Danyard, Aarhus Dockyards, AD Trans, Danish Steelworks, Aalborg Boiler Production). В качестве экспертов при оценке результатов привлекался Технический Университет Дании, Университет Ааборга, ряд оборонных институтов [2]. До этого периода в течение 10 лет накапливался опыт применения лазерных технологий на уровне фундаментальных исследований и экспериментов. Проведенный анализ производственных затрат на предприятиях консорциума выявил, что применение лазерных технологий позволило на 30 % уменьшить трудозатраты, в основном за счет более точного раскрытия заготовок с применением лазерной резки и снижения уровня остаточных деформаций при лазерной сварке. Внедрение лазерной сварки позволило сократить тепловложение в металл в 7–10 раз по сравнению со сваркой под флюсом и в 2–4 раза – по сравнению с аргоно-дуговой сваркой и получить точность размеров крупногабаритных изделий до 0,5 мм при размерах конструкций до 16 м.

Для успешной конкуренции с зарубежными производителями судостроительные предприятия России должны быть обеспечены столь же эффективными и соответствующими мировому уровню новейшими технологиями изготовления судовых конструкций и их элементов. Настоящая работа посвящена одной из таких технологий – лазерной сварке тонкостенных панелей из листовой стали и титановых сплавов для безнаборных судовых конструкций.

Лазерная сварка объемных тонкостенных панелей является новым перспективным методом изготовления подобных конструкций и имеет ряд преимуществ по сравнению с традиционными сварочными технологиями. Особенности конструктивного исполнения панелей предполагают применение сварки внахлест со сквозным проплавлением внешнего и внутреннего листов в зоне их соприкосновения – по площадкам в вершинах сгибов армирующего листа. Очевидно, что при столь высокой плотности сварных соединений (до 60 погонных метров шва на 1 м² площади) режим кинжального проплавления, характерный для лазерной сварки, обеспечивает минимальную ширину зоны теплового воздействия на металл, более равномерный нагрев внешнего и внутреннего листов и, следовательно, наиболее низкий уровень временных и остаточных напряжений и деформаций.

Полученные результаты, характеризующие параметры разработанной технологии и свойства сварных соединений элементов объемных панелей, могут быть использованы при проектировании палубных и корпусных безнаборных конструкций для новых типов судов. Выявленные преимущества лазерных технологий позволят более широко использовать стальные и титановые элементы безнаборных конструкций в судостроении и организовать их серийное производство на отечественных предприятиях.

Лазерная сварка и механические испытания опытных образцов сварных соединений

Первый этап работ включал исследование возможности лазерной сварки внахлест тонколистовых материалов с качественным формированием швов и определение прочностных характеристик таких соединений. Были подобраны оптимальные режимы сварки (табл.1), а затем сварены опытные образцы соединений. Образцы были испытаны на статическое растяжение в аккредитованной лаборатории «Промтест КМ» ЦНИИ КМ «Прометей». Результаты

испытаний (табл. 2) показали, что разрушение происходит по основному металлу, а швы, работающие на отрыв и на сдвиг, оказываются прочнее, несмотря на наличие концентраторов напряжений в щелевом зазоре между листами. Характер разрушения образцов показан на рис. 1.

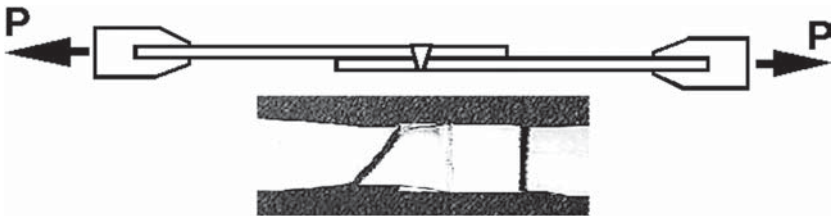


Рис. 1
Образцы нахлесточных сварных соединений после испытаний

Таблица 1
Режимы лазерной сварки нахлесточных соединений
объемных тонкостенных панелей для безнаборных судовых конструкций

Материал	Толщина материала, мм		Мощность излучения, кВт	Скорость сварки, мм/мин	Диаметр пятна, мм	Заглубление фокуса, мм
	Боковые листы	Армирующий лист				
Сталь3	0,5	0,5	2,5	900	0,3	0,5
	1,0	0,5	3,5	750		
	1,0	1,0	3,5	720		
08X18H10T	0,5	0,5	2,5	900		
	1,0	0,5	3,5	750		
	1,0	1,0	3,5	720		
ВТЗ	0,5	0,5	2,5	900		
	1,0	0,5	3,5	750		
	1,0	1,0	3,5	720		

Таблица 2

**Результаты испытаний на статический разрыв
образцов нахлесточных соединений объемных тонкостенных панелей**

№	Материал образцов	Сечение образца ($B \cdot h$), мм	Усилие разрыва, кгс	Временное сопротивление, кгс/мм ²	Место разрыва
1	Ст3	27,35 · 1,2	1187,6	36,2	Основной металл
2		27,35 · 1,2	1202,9	36,3	Основной металл
3		27,50 · 1,2	1177,3	35,7	Отрыв в захвате по основному металлу
4	12X18H10T	26,90 · 0,95	1396,5	54,6	Основной металл
5		26,90 · 0,95	1396,5	52,7	Основной металл
6		26,90 · 0,95	1467,9	55,1	Основной металл
7	Вт3	31,25 · 1,05	1416,9	43,2	Основной металл
8		33,00 · 1,05	1452,6	41,9	Линия разрыва идет от непровара по границе шва и выходит в основной металл

Разработка технологии лазерной сварки типовых элементов сотовых панелей

На следующем этапе была отработана технология изготовления фрагментов сотовых тонкостенных панелей. В ходе разработки вариантов исполнения подобных конструкций с учетом технологичности выполнения сварки было установлено, что для обеспечения работоспособности и стабильности формирования соединений необходимо формировать в вершинах загиба армирующего листа плоские площадки, препятствующие угловым деформациям сварных соединений. Плоскость контакта двух листов, прошитых сварным швом, аналогична трещине, направленной перпендикулярно продольному сечению шва и имеющей острый концентратор напряжений в вершине. В то же время конструктивное исполнение панелей

с притуплением в зонах контакта внутреннего армирующего листа с внешними позволяет существенно ограничить угловые перемещения этого узла и уменьшить опасность развития трещины от этого концентратора. Конструкция панелей выбиралась на основании рекомендаций ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова и результатов расчетного анализа, приведенных в публикациях Maritime and Mechanical Engineering Institute (Helsinki) [1].

В ходе отработки технологии автоматизированной лазерной сварки объемных тонкостенных панелей наиболее сложной задачей было проектирование и изготовление приспособлений, обеспечивших сборку и фиксацию элементов панелей, обеспечение газовой защиты швов и перемещение собранной конструкции в процессе сварки. Собранная под сварку панель показана на рис. 2.

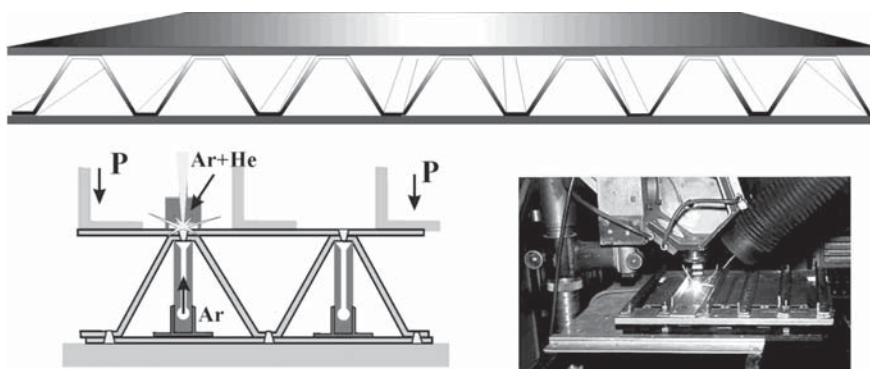


Рис. 2
Типовая сотовая панель, собранная под сварку

Были изготовлены 2 партии образцов панелей из стали марки 12Х18Н10Т и титанового сплава ВТ1-0 толщиной 0,8 – 1,0 мм. Они были сварены на лазерной установке с выходной мощностью излучения 3,5 кВт при скоростях от 70 м/ч до 90 м/ч. Использовался зеркальный объектив с фокусным расстоянием 150 мм и возможностью фокусировки до пятна диаметром 0,25 мм. Получены сварные соединения со сквозным проваром на полную толщину материала. Ширина швов для стали 08Х18Н10Т составляла 2–3 мм со стороны сварки,

0,5–1,0 мм – с обратной стороны внутреннего армирующего листа. Швы на панелях из титанового сплава были на 1 мм шире. Газовая защита зоны сварки и поверхности шва на участке охлаждения осуществлялась гелием, а защита обратной стороны шва – аргоном, с применением специализированной оснастки. Длина участка газовой защиты шва определялась по наиболее активному материалу (сплав ВТ1-0) и составляла 60 мм.

Партия из 8 стандартных образцов панелей (4-из – стали 12Х18Н10Т и 4 – из сплава ВТ1-0) прошла испытания на трехточечный изгиб в условиях статического нагружения и при циклических нагрузках (рис. 3).

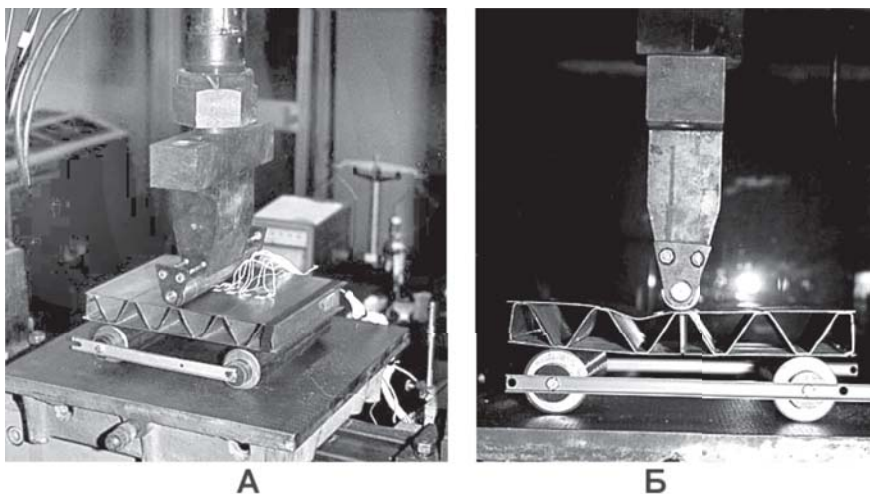


Рис. 3

Образец сотовой панели, установленный для испытаний на трехточечный изгиб (А) и в момент потери устойчивости (Б)

Статические испытания показали, что потеря устойчивости сжатых элементов конструкции наступает при нагрузках, соответствующих 20–30 % предела прочности сварных соединений. При испытаниях на циклическое нагружение образцы из стали 12Х18Н10Т выдержали 4×10^5 циклов, а образцы из титанового сплава ВТ1-0 – $7,42 \times 10^5$ циклов без разрушения и потери несущей способности.

Разработка технологий лазерной сварки при соединении сотовых панелей между собой и при их стыковке с конструкциями традиционных типов

Дальнейшая задача – создание технологии сварки, позволяющей с высокой точностью соединять между собой стандартные сотовые панели и укрупнять их до размеров, соответствующих сборочным фрагментам конструкции судна. Технология должна была обеспечивать устойчивое формирование швов при сопряжении элементов панелей друг с другом в продольном и поперечном направлении, а также соединять их с более массивными силовыми элементами конструкции судна. Для соединения элементов тонкостенных панелей в продольном направлении требовалось отработать технологию сварки нескольких типов соединений.

Технология лазерной сварки традиционных стыковых и нахлесточных швов была создана на предыдущем этапе работ и трудностей не вызывала, но при сопряжении панелей с массивными силовыми элементами возникали достаточно сложные сварные узлы. Примеры таких соединений показаны на рис. 4 а. Возникла необходимость сквозного провара двух и более слоев листового материала и приварки их к массивному элементу. При чисто лазерной сварке для выполнения таких соединений требовалось значительное увеличение мощности или снижение скорости. Задача была решена введением гибридного лазерно-дугового способа сварки. Суть метода заключалась в использовании для нагрева и проплавления материала совместного воздействия концентрированного лазерного источника энергии и более экономичного дугового. Физические процессы в дуге при ее взаимодействии с лазерным лучом были теоретически и экспериментально исследованы в работе [7]. Лазерный луч точно фиксировал дугу на линии шва, повышал температуру и величину теплового потока в пятне нагрева и обеспечивал более эффективное проплавление. Схема процесса гибридной лазерно-дуговой сварки показана на рис. 4 б.

Стыковка панелей в торцевом (поперечном) направлении представляла гораздо более сложную проблему, связанную со сваркой непрерывным стыковым швом гофрированного внутреннего листа. Для обеспечения технологии сварки гофрированных элементов была спроектирована и изготовлена автоматизированная система вертикального перемещения фокусирующего объектива и блока газовой защиты на высоту до 60 мм, отслеживающая геометрию гофра и обес-

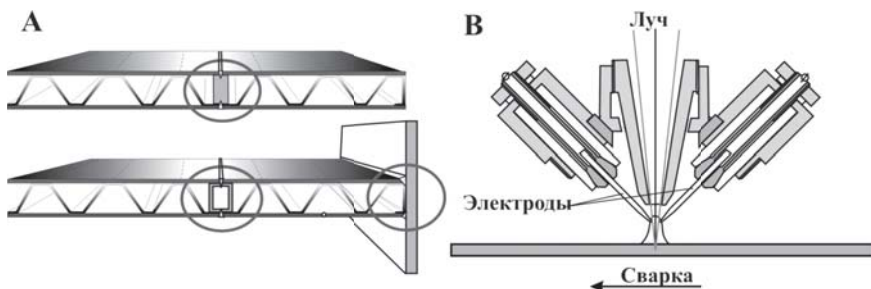


Рис. 4
Узлы сопряжения тонкостенных панелей с массивными силовыми элементами
судовых конструкций (а) и схема их лазерно-дуговой сварки (б)

печивающая сварку по линии стыка. Схема установки и работа ее элементов в процессе сварки показана на рис. 5.

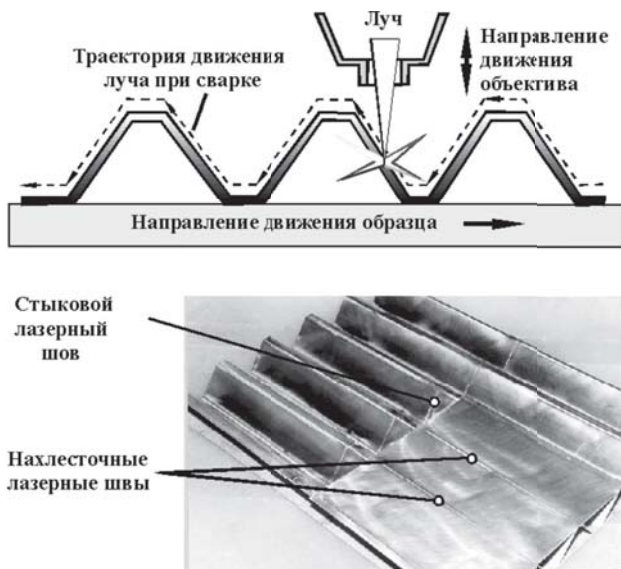


Рис. 5
Схема устройства и работы установки для лазерной сварки
стыковых соединений гофрированных листов сотовых панелей

С помощью данной установки удалось получить швы со стабильным формированием и проплавлением на полную толщину листа, без прожогов и непроваров. После отработки режимов сварки в различных пространственных положениях была проведена сварка встык опытных образцов типовых элементов гофрированных листов из стали 12Х18Н10Т толщиной 1 мм. Стыковое соединение гофров было собрано на жесткой направляющей, имеющей канал для газовой защиты корня шва, и закреплено прижимными планками. Линия стыка фиксировалась прихватками, выполненными точечной лазерной сваркой. После этого выполнялась лазерная сварка соединения непрерывным швом.

Решение задачи укрупнения трехслойных панелей не ограничивалось разработкой технологии сварки гофров. После сварки гофрированного внутреннего листа необходимо было зашить участок стыка панелей внешними плоскими листами. При этом вставной плоский элемент приваривается нахлесточными швами к соединенным гофрам и сваривается встык с плоскими листами обеих панелей. Нахлесточные швы выполнялись по той же технологии, что и сварка отдельных типовых элементов трехслойных панелей при их серийном изготовлении.

В результате последовательной сварки между собой типовых элементов трехслойных панелей были получены укрупненные блоки, которые уже могли использоваться как сборочные фрагменты при монтаже судовых конструкций. Последовательность операций по укрупнению панелей показана на рис. 6.

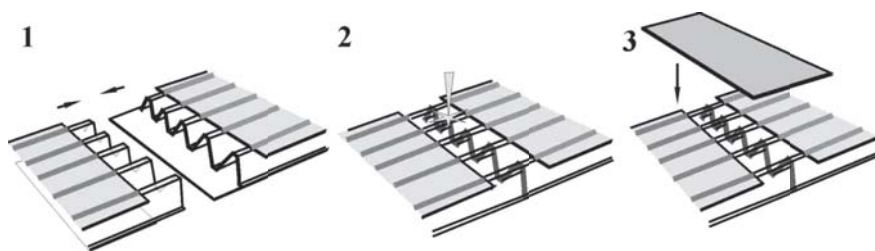


Рис. 6
Последовательность сборки и сварки соединений сотовых панелей
в торцевом направлении

Таким образом, в результате проведенных исследований возможности эффективного использования лазерной сварки для изготовле-

ния судовых сотовых панелей разработана принципиальная технология их сварки на всех этапах производства конструкций. Предложены и отработаны в лабораторных условиях технологические решения, обеспечивающие качественную сборку и соединение гофрированных элементов панелей при высокой производительности процесса сварки. Разработанные технологические приемы сборки и сварки сотовых конструкций для судов различного назначения могут быть успешно адаптированы для промышленных условий при наличии соответствующего оборудования на судостроительных предприятиях.

Заключение

На базе проведенных исследований разработана совокупность последовательных технологических процессов лазерной сварки типовых элементов легких объемных судовых конструкций, соединения этих элементов между собой в продольном и поперечном направлении и формирования из них укрупненных блоков, входящих в конструкцию судна в качестве сборочных единиц. На все разработанные процессы выпущена соответствующая технологическая документация, которая может быть использована на судостроительных заводах с учетом особенностей технологического процесса постройки конкретного судна и оснащенности предприятия необходимым оборудованием.

Список литературы

1. Kuyala P., Metsa A., Nallikari M. All metal Sandwich Panel for Ship Applications. Shipyard 2000, spin-off project, Otaniemi, 1995, M-196, p. 66.
2. M. Sellerup. Odense, Denmark "Experiences of laser welding and cutting in hull production" <http://www.eureka.be>
3. Sikora J., Dinsenbacher A. SWATH Structure: Navy Research and development applications. Marine Technology. 1990, 27, 4. – p. 211–220.
4. Norris P., Montague P., Tan K. All steel structural panel to carry lateral load: experimental and theoretical behavior. The Structural Engineer, 1989, 67, 9. – p. 167–176.
5. Smith E., Cowling M., Winkle I. Adhesively bonded sandwich structures in marine technology. Proc. 2-d Int. Conf. On "Sandwich Constructions", Florida, 1992. – p. 347–362.
6. Oikawa M., Minamida K., Goto N., Tendo M. Development of all laser welded honeycomb structures for high speed civil transports. Proc. Of the laser materials processing conference, Orlando, 1993.
7. Старцев В. Н. Численное моделирование взаимодействия лазерного излучения с плазмой сварочной электрической дуги // Материалы конференции: Лазерная технология и средства ее реализации- 97. – 1997.

УДК 621.431.74.004:621.43-53

В.А. Шишкин, М.Ю. Иванов, С.А. Кравченко

ВОПРОСЫ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТРЕБОВАНИЙ МАКО К ИСПЫТАНИЯМ СУДОВЫХ ДИЗЕЛЕЙ

Анализ действующих требований МАКО и КО к испытаниям судовых дизелей

Испытания судовых дизелей при постройке являются завершающей и наиболее ответственной стадией проверки их качества и соответствия требованиям технической и конструкторской документации. Целью и результатом испытаний должно быть получение информации, достаточной для оценки возможности использования двигателя (или типа двигателей – при их массовом производстве) на судне с точки зрения безопасности и эффективности эксплуатации.

Вопросам безопасности, рассматриваемым в соответствии с решениями ИМО по методологии формализованной оценки безопасности (ФОБ), в настоящее время уделяется особое внимание [1]. При этом оцениваются риски причинения вреда человеку, природе и техническим объектам – судам и береговым сооружениям. Для первоначальной ФОБ судовых дизелей исходной базой должны служить, прежде всего, результаты стендовых, швартовных и ходовых испытаний при их постройке, а также данные анализа конструктивных особенностей двигателя и статистики по эксплуатационным показателям надежности этого типа ДВС и их аналогов [2].

Результаты оценки показателей надежности, полученные при ограниченных по времени стендовых испытаниях одного образца двига-

теля, не являются достаточно репрезентативными. Для получения более надежных оценок безотказности и долговечности дизелей необходимы данные опытной эксплуатации большого количества образцов двигателя одного типа. Отсюда вытекает задача обеспечения сопоставимости всех этих данных, связанная с единообразием построения и адаптации систем контроля технического состояния и автоматического сбора, регистрации и передачи эксплуатационной информации на базе современных технологий уже на стадии испытаний [3].

Таким образом, по сути дела уже в ходе испытаний должна решаться задача формирования целостной и объективной оценки эксплуатационных качеств двигателя при условиях ограничения продолжительности и стоимости работ.

По указанным причинам классификационные общества (КО) и Международная ассоциация классификационных обществ (МАКО) обращают особое внимание на требования к методам и программам испытаний, которые содержатся в соответствующих Правилах всех КО и Унифицированных требованиях (УТ) МАКО. По мере появления новых конструктивных и технологических решений в ДВС, а также развития средств и методов использования современных информационных технологий при проведении испытаний и при последующей обработке и сохранении полученных результатов УТ МАКО необходимо периодически корректировать.

Испытания судовых дизелей при постройке и классификации подразделяются на типовые – для головных образцов новых и модернизируемых двигателей, периодические – для выборочных образцов двигателей (типовые при массовом производстве), приемо-сдаточные стендовые (контрольные), приемо-сдаточные в составе СЭУ: швартовные и ходовые. Испытания каждого из перечисленных видов отличаются по задачам, условиям проведения, состоянию двигателей в ходе приработки по мере ее завершения, продолжительности, режимам работы, объему и методам измерений, объему ревизии по завершении испытаний и т. д. При этом различные виды испытаний могут иметь сходное по многим позициям содержание. В то же время требования к содержанию испытаний должны быть адаптированы к конструктивным особенностям двигателей, к условиям их эксплуатации.

По сравнению с УТ МАКО требования КО могут быть более конкретными и жесткими, с учетом особенностей судов поднадзорного флота, их энергетических установок и судового оборудования, а также традиций и уровня развития процедур и технологий освидетельствования. В Правилах КО наиболее развитых стран и стран с развиваю-

щейся экономикой находят отражение перспективные методы дефектации и оценки технического состояния и другие технические аспекты испытаний и эксплуатации судовых дизелей и судового оборудования. В Правилах многих КО содержатся также требования, связанные с актуальными вопросами современного судоходства, судостроения и дизелестроения: контроль и снижение токсичности отработавших газов (ОГ), техническое диагностирование и организация прогрессивных форм технического обслуживания, внедрение и использование методов управления, контроля, сбора и анализа эксплуатационной информации.

Анализ этих требований представляется обязательным условием для получения объективной информации о современном состоянии и тенденциях решения вопросов организации испытаний, развития применяемых при их проведении технических средств и методов. Попытка систематизации этих требований приведена в таблице.

Таблица

**Основные требования МАКО и КО
к испытаниям ДВС при постройке и классификации**

Основные требования к испытаниям	Наличие требований в УТ МАКО и Правилах КО									
	МАКО	PC	ABS	BV	GL	DNV	KR	LR	NK	RINA
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Выделение этапов типовых испытаний	+	+	+	+	+	+	-	-	+	+
Выделение испытаний для массовой и немассовой продукции	+	-	+	+	+	-	-	-	+	+
Выделение этапов испытаний в составе ЭУ	-	+	-	+	+	-	-	-	-	+
Состояние дизеля по уровню приработанности деталей	+	-	+	-	+	-	-	-	-	-
Внешние условия при испытаниях	+	-	+	+	-	+	+	-	-	+
Состав измерений при испытаниях	+	+	+	+	+	+	+	-	+	+
Дополнительные условия проведения измерений	+	+	+	+	+	+	+	-	-	+
Режимы работы двигателя	+	+	+	+	+	+	+	-	+	+

Продолжение табл.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Аварийные режимы	+	+	+	+	+	+	–	–	–	+
Наработка общая и по режимам	+	+	+	+	+	+	+	–	+	+
Ревизия после стендовых испытаний	+	+	+	+	+	+	+	–	+	+
Ревизия после испытаний на судне	–	+	–	+	–	+	+	–	–	+
Контроль вибрации	–	+	+	+	–	+	+	+	–	
Контроль крутильных колебаний	–	+	+	+	+	+	–	–	–	–
Применение методов технического диагностирования ¹⁾	–	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Испытания дизелей с электронным управлением ²⁾	–	–	–	–	–	+	+	–	–	–
Контроль токсичности ОГ	+	–	+	+	–	–	–	–	+	+

¹⁾ Наличие указаний на использование методов технического диагностирования как при испытаниях, так и в эксплуатации, а также на применение методов и средств измерений, которые могут быть использованы при диагностировании СДВС.

²⁾ Наличие требований к испытаниям дизелей с электронным управлением или к испытаниям их компонентов.

В строках таблицы указаны основные положения требований МАКО и КО к проведению различных видов испытаний двигателей при их изготовлении и при постройке судов и их реализация в УТ МАКО и Правилах КО.

Критерием выбора положений требований, давших наименования строкам таблицы, послужила рубрикация содержания УТ МАКО и Правил КО, а также актуальность и перспективность выделенных вопросов.

Наличие соответствующего требования в УТ или Правилах отмечено «+», отсутствие – «–».

Результаты такого сравнительного анализа, наряду с анализом вопросов, связанных с особенностями испытаний дизелей, значительно отличающихся по конструкции и составу оборудования от традиционных (в частности, двигателей с электронным управлением), были

положены в основу предложений по совершенствованию Правил КО и УТ МАКО.

Стендовые испытания

Большинство КО в своих Правилах стендовые испытания судовых дизелей подразделяют на:

типовые для головных образцов дизелей, производимых как индивидуальная – немассовая продукция, и периодические (типовые) для двигателей, производимых серийно или как массовая продукция; приемо-сдаточные.

Содержание типовых периодических и приемо-сдаточных испытаний двигателей различных типов по существу сходно. По этой причине требования к таким испытаниям в УТ МАКО и в Правилах большинства КО оформлены в виде основных положений программ испытаний. Типовые испытания (в соответствии с УТ МАКО и Правилами подавляющего большинства КО) включают в себя 3 этапа: предварительные испытания, проводимые изготовителем, испытания для освидетельствования (оформления СТО) и ревизия узлов и деталей после испытаний.

В УТ МАКО и Правилах КО с различной степенью конкретизации определяются:

- внешние условия проведения испытаний;
- состояние двигателя по степени приработанности его деталей;
- перечень измеряемых параметров;
- условия и организация проведения измерений;
- режимы нагружения;
- работа на нештатных режимах (при отключении ГТК);
- продолжительность работы на режимах;
- проверка пусковых и реверсивных качеств;
- проверка работы регуляторов и устройств защиты;
- подход к оценке состояния деталей двигателя после испытаний.

Эти вопросы имеют большое значение для полноты и достоверности оценки качества конструкции, технологии изготовления деталей и узлов, сборки и регулировки двигателей, прогноза параметров их надежности.

Так, продолжительность испытаний в значительной мере определяет возможности проведения достаточного количества измерений для корректной статистической оценки результатов и точность оценки параметров надежности; степень завершения приработки влияет как

на достоверность результатов, так и на последствия работы при номинальных параметрах нагрузки для состояния двигателя.

Рациональное проведение завершающего этапа типовых испытаний – контроля состояния деталей двигателя после испытаний: соответствие перечня выделенных для ревизии деталей особенностям конструкции, репрезентативность выборки деталей, ограниченный объем демонтажных работ и т. д. обеспечивает необходимую достоверность оценки при минимальных дополнительных приработочных износах.

Испытания в составе СЭУ

Испытания двигателей в составе СЭУ относятся к разряду приемно-сдаточных и являются завершающим звеном в процессе проверки качества двигателей перед их передачей в эксплуатацию. Составной частью программ испытаний являются специальные испытания двигателей и СЭУ, производимые до сдачи СЭУ в эксплуатацию. К таким испытаниям можно отнести испытания, в ходе которых определяются параметры токсичности ОГ, оценка крутильных колебаний валопроводов и т. д. Определение параметров токсичности ОГ должно производиться в соответствии с документами МК МАРПОЛ 73/78 (Приложение VI). Эти испытания проводятся на регламентированных режимах, соответствующих назначению двигателей.

Пока проведение подобных испытаний предусмотрено только в Правилах НКК без привязки к типовым или приемно-сдаточным испытаниям. Такие испытания могут проводиться как в стендовых, так и в судовых условиях. При организации испытаний используется так называемая «концепция группы» [4, 5], когда по результатам оценки токсичности ОГ представителя типа двигателей судят об экологических качествах всего типа с периодическим контролем других выборочных двигателей. Это прямая аналогия с подходом к испытаниям серийных двигателей.

Указания на проверку крутильных колебаний валопроводов имеются в Правилах многих ведущих КО – Российского морского регистра судоходства (РС), Американского бюро судоходства (ABS), Бюро Веритас (BV), Германского Ллойда (GL), Норвежского бюро Веритас (DNV). Крутильные колебания в значительной мере определяют надежность и безопасность СЭУ, а также отражают фактическое состояние системы «двигатель – валопровод с подшипниками – дейдвудное устройство – гребной винт». Однако в документах не всех отмеченных

КО вопросы измерения крутильных колебаний увязаны с процедурой ходовых испытаний.

Основное содержание программ испытаний

Во всех случаях программами испытаний, подлежащими одобрению КО, регламентируются структура испытаний, методики и условия их проведения, перечень контролируемых параметров и другие вопросы. В УТ МАКО и Правилах большинства КО отражены основные положения программ. Эти основные положения включают в себя режимы работы двигателей при испытаниях, продолжительность работы на режимах, указания на контролируемые параметры и т. д.

Важным условием для корректности результатов измерений, особенно при испытаниях при оформлении свидетельства типового одобрения (Type approval test) и приемо-сдаточных, является завершенность процесса приработки. До завершения приработки мощность механических потерь, расход масла на угар, содержание токсичных компонентов отработавших газов превышают нормальные значения [6]. Кроме того, вывод двигателя до завершения основной части приработки на нагрузки, близкие к номинальным, чреват нарушениями нормальных режимов трения и возможностью возникновения предзадиристых состояний (сопровождающихся повышенным тепловыделением [7]) и задиров. Это объясняется ограниченной (до завершения приработки) площадью контакта сопрягаемых деталей и, следовательно, высокими удельными нагрузками. Завершение приработки определяется стабилизацией скоростей изнашивания и косвенных параметров, в том числе и экономических. Условие завершения приработки отражено в разделе судовых испытаний как в УТ МАКО, так и в требованиях к приемо-сдаточным испытаниям ABS и GL. Методы контроля хода и завершения приработки, учет степени приработанности при назначении режимов испытаний в существующих УТ МАКО и Правилах КО не указываются. При типовых испытаниях завершенность приработки практически обеспечивается за счет наработки во время испытаний, проводимых изготовителем.

Режимы работы и продолжительность испытаний

Уровни нагрузки, на которых работают двигатели во время всех видов испытаний, являются сходными, с небольшими отличиями для двигателей, имеющих разное назначение (главных, работающих на

винт, главных или вспомогательных дизель-генераторов). Во всех случаях указывается на работу при 100 % и 110 % номинальной мощности. Более широким спектром режимов (включая 25 %, 50 %, 75 % номинальной мощности и т. д., также в зависимости от назначения двигателя) отличаются типовые испытания, что объясняется объемом задач испытаний.

В УТ МАКО и Правилах большей части КО (за исключением Регистра судоходства Ллойда (LR), Японского классификационного общества (NKK), Корейского регистра (KR)) уделено внимание экстремальным режимам, имеющим важное значение для обеспечения безопасности при движении судна – работе с отключением турбокомпрессоров. Лишь в примечаниях содержится указание на то, что (по тексту М 50 УТ) «For engines, intended to be used for emergency services supplementary tests according to the regulations of administration may be required» («для двигателей, используемых в аварийных ситуациях, инспектором Регистра могут быть потребованы дополнительные испытания» – по тексту РС). Такую формулировку трудно считать достаточно определенной. При этом отсутствуют указания на проверку работы с отключенными цилиндрами, неработающим воздухоохладителем и формирование рекомендаций по назначению режимов нагружения двигателя в этих и других нештатных ситуациях.

Программами регламентируется минимальная продолжительность работы на режимах, при которой могут быть произведены необходимые измерения. При этом иногда указываются конкретные значения наработки. Так, в УТ МАКО для типовых испытаний при массовом производстве, также, как в Правилах ABS, BV, NKK, Итальянского регистра (RINA) (у этих КО требования к типовым испытаниям идентичны УТ МАКО), указана общая минимальная продолжительность испытаний, составляющая 100 ч. В программах приемо-сдаточных стендовых испытаний, испытаний на борту судна, так же как и в программах контрольных испытаний дизелей при индивидуальном производстве, отмечается привязка наработки на режимах ко времени, необходимому для проведения измерений, и конкретная минимально необходимая наработка. Такое содержание имеют требования Правила РС, ABS, BV, DNV, GL, NKK, RINA, KR, подобные УТ МАКО.

Степень завершенности приработки к началу испытаний и к началу работы двигателя на нагрузках, близких к номинальным, определяет как корректность результатов измерений функциональных (энергетических, экономических и экологических) параметров, так и возможные искажения оценок показателей надежности и безопасности.

Контроль протекания приработки и степени ее завершенности может быть осуществлен с применением методов диагностирования по содержанию продуктов изнашивания в масле – по стабилизации оцениваемой скорости изнашивания деталей, а для деталей цилиндропоршневой группы и по концентрации продуктов неполного сгорания топлива и масла (окиси углерода [6, 8], углеводородов, сажи).

Контроль параметров работы двигателей при испытаниях

Заметную часть требований к проведению испытаний составляют указания на условия проведения и объем измерений, они содержатся в Правилах почти всех представленных в анализе КО (за исключением LR) и в УТ МАКО. В случаях оформления требований КО и УТ в виде программ или основных положений программ (для типовых испытаний массовой продукции, приемо-сдаточных испытаний) приводятся перечни параметров, регистрируемых в обязательном порядке. В то же время в разделах УТ и Правил КО, относящихся к типовым испытаниям немассовой продукции, в УТ и требованиях Правил ряда КО (BV, GL, NKK, RINA, KR), посвященных приемо-сдаточным испытаниям, указывается на условия проведения и регистрацию необходимых параметров без их конкретного перечня.

В подавляющем большинстве Правил КО (за исключением NKK) отсутствуют указания на измерения параметров, необходимых для оценки экологических показателей двигателей. В документах NKK в «Guidance for the Survey and Construction of Steel Ships» лишь упоминается о необходимости контроля эмиссии токсичных газов с судов, а требования по контролю токсичности ДВС, соответствующие Приложению VI к МАРПОЛ 73/78, содержатся в отдельных документах, посвященных системам предотвращения загрязнения окружающей среды – «Rules for Marine Pollution Prevention Systems» и «Guidance for Marine Pollution Prevention Systems». В УТ МАКО в разд. М.21 «Mass production of internal combustion engines: type test conditions» и в Правилах ABS, BV и RINA в пункте, содержащем перечень измеряемых параметров при испытаниях массовой продукции, указывается на необходимость контроля дымности отработавших газов (этот параметр, отражающий содержание одного из токсичных компонентов ОГ – сажи, не является в настоящее время нормируемым IMO).

Как видно из приведенной выше таблицы, большей степенью конкретизации требований к испытаниям отличаются ABS, GL, BV, RINA, РС. Содержание УТ МАКО к испытаниям судовых дизелей включено

в их документы. В то же время, при четкости и конкретности требований GL (а также NKK и LR) в них обоснованно отсутствуют достаточно очевидные указания на внешние условия, обусловленные задачами оценки энергетических и экономических параметров. Менее подробно изложены требования к испытаниям, приведенные в Правилах LR и DNV.

По ряду таких вопросов, как указания на этапы судовых испытаний, ревизию после них, вибрационные измерения, контроль крутильных колебаний, требования PC, BV, GL, RINA являются более полными, чем УТ. В Правилах большинства КО требований по испытаниям на токсичность ОГ нет.

В Правилах DNV, LR и KR уже отражена современная тенденция в дизелестроении – разработка и производство двигателей с электронным управлением. При этом в Правилах KR непосредственно говорится об испытаниях двигателей с электронным управлением, а в Правилах DNV – об испытаниях двигателей с системой Common Rail.

Требования DNV, GL и NKK можно отметить как наиболее уравновешенные по своему содержанию: в соответствующих разделах их Правил отсутствует излишняя детализация, и в то же время по актуальным вопросам даны конкретные указания. В Правилах этих же КО присутствуют четкие требования по новым аспектам испытаний: в Правилах GL – по системам технического диагностирования, в документах DNV – к испытаниям дизелей с электронным управлением, а в Правилах NKK – по оценке токсичности отработавших газов (правда, в других разделах).

Предложения по корректировке УТ МАКО

Из проведенного сравнительного анализа материалов МАКО и КО можно сделать вывод о наличии двух подходов к формированию требований к испытаниям:

подробного детального изложения (требования GL, ABS, по некоторым вопросам – DNV, PC, BV, RINA);

менее подробного изложения, без излишней детализации, с передачей права принятия решений по конкретным вопросам представителям КО при реализации испытаний (LR, NKK, KR).

Оба подхода имеют свои преимущества и недостатки. При первом подходе в Правилах прописаны практически все аспекты испытаний. Требования, по сути, становятся изложением программы испытаний. Недостатком такого подхода является то, что избыточная детализация

не позволяет оперативно корректировать программы испытаний при адаптации их к различным вариантам. Излишняя детализация, например, за счет перечней параметров, необходимость регистрации которых вытекает из задач испытаний, а возможность – из контролепригодности дизелей, лишь создает информационную перегруженность. При этом все равно не удастся предусмотреть все возможные случаи, обусловленные спецификой конструкции двигателей и новыми возникающими проблемами и задачами такими, как оценка экологических характеристик, внедрение новых информационных технологий [3], построение диагностических моделей по результатам испытаний и т. д. Второй подход является более универсальным и приспособленным к решению таких задач, однако, при этом существует возможность упустить важные моменты содержания испытаний.

Для совершенствования Правил КО и УТ МАКО более целесообразным представляется объединение обоих подходов. Например, по таким вопросам, как выполнение требований МК МАРПОЛ 73/78, оценка ФОБ и другим, следует отразить в УТ все определяющие моменты, а в тех случаях, когда возможны различные способы решения – указать общее направление.

Как следует из рассмотрения современных требований МАКО и КО к испытаниям двигателей при постройке, существуют предпосылки для их совершенствования и развития с учетом опыта КО, современных тенденций в развитии судового дизелестроения, методов освидетельствования и технического диагностирования, методов оценки безопасности и информационных технологий.

Так, с учетом того, что техническое диагностирование судовых дизелей находит все более широкое применение в эксплуатации (о чем свидетельствует наличие требований к системам диагностирования в Правилах РС, GL, NKK и другие материалы), в настоящее время имеются реальные возможности использования методов и средств технического безразборного диагностирования не только в эксплуатации, но и при испытаниях. Следовательно, необходима разработка и включение в УТ МАКО требований, определяющих условия применения технического диагностирования при испытаниях (типовых и приемо-сдаточных).

С вопросами технического диагностирования связаны задачи контроля приработки (контроля протекания ее процесса и степени завершенности).

Как было отмечено выше, в УТ МАКО и в рассмотренных Правилах КО отсутствуют указания на проверку работы двигателей с отклю-

ченными цилиндрами, воздухоохладителем и на других возможных аварийных или предаварийных режимах.

Для повышения безопасности эксплуатации СДВС и СЭУ в целом представляется необходимым формирование рекомендаций проектанта и изготовителя дизелей по выбору допустимых режимов их работы в этих условиях. С этой целью в требования к испытаниям следует включить указания на проверку работы двигателя на аварийных режимах с целью формирования рекомендаций по эксплуатации в этих условиях с учетом специфики его конструкции и предназначения, конкретное содержание проверки – по согласованию с представителем КО.

В ходе типовых испытаний должны осуществляться измерения токсичности отработавших газов по методике и на режимах, указываемых Приложением VI к МК МАРПОЛ 73/78.

Для корректности результатов измерения должны производиться после завершения приработки деталей цилиндропоршневой группы. Может появиться необходимость дополнительных режимов работы двигателя в соответствии со спектрами цикла экологических испытаний.

Для повышения точности управления работой двигателя на испытаниях, точности и объективности измерений представляется целесообразным использование во время испытаний современных компьютерных технологий управления, сбора, регистрации, накопления и передачи информации.

Для придания большей универсальности применения УТ, в частности, для включения в программу типовых испытаний разделов контроля токсичности, построения диагностических моделей и т. д., конкретные перечни режимов должны быть дополнены примечаниями о возможном их расширении.

Более кардинальным предложением по этому вопросу может быть, например, формулировка: «режимы, на которых работает двигатель, определяются конкретными задачами испытаний».

Продолжительность режимов также должна определяться в УТ более гибко: не просто с указанием минимальной продолжительности работы при установившихся параметрах, при которой обеспечивается регистрация измеряемых параметров, а с требованием формирования при измерениях представительной статистики результатов.

Попытка жестко регламентировать перечни параметров в УТ (что имеет место в М 21 – для типовых испытаний массовой продукции)

заранее обречена на неудачу: невозможно предусмотреть все конструктивные возможности двигателей и специфику задач испытаний.

Предлагается вместо этого применить формулировки, имеющиеся в тех же УТ:

в М 50 (для типовых испытаний немассовой продукции) «the investigations and measurements required for reliable engine operation have been carried out» – должны быть выполнены необходимые для надежной работы исследования и измерения;

в М 51 (для приемо-сдаточных испытаний) «the data to be measured and recorded, when testing the engine at various load points are to include all necessary parameters for the engine operation» – в число данных, подлежащих измерению и регистрации при испытаниях двигателя на различных режимах нагрузки, должны быть включены все параметры, необходимые для эксплуатации двигателя.

В УТ МАКО и Правилах некоторых КО отсутствует выделение в отдельный этап швартовных испытаний. В то же время в требованиях РС, BV, GL RINA есть указания на такие испытания.

Так как швартовные испытания в значительной мере определяют безопасность выхода судна в море, предлагается включить в М 51 УТ раздел о швартовных испытаниях, аналогичный соответствующему разделу в Правилах РС.

Для повышения эффективности оценки состояния двигателя после испытаний можно рекомендовать следующее:

оценивать состояние двигателя с использованием систем безразборного диагностирования;

указать формулировки, примененные в Правилах многих КО и М 51 (для приемо-сдаточных испытаний): «Random checks of components to be presented for inspection after the works trials are left to the discretion of each Society» – рандомизированные (по случайным образом организованной выборке) компоненты должны быть представлены для инспекции по предписанию КО.

Кроме того, в качестве рекомендаций для КО при проведении испытаний можно указать на целесообразность использования, кроме методов диагностирования при испытаниях, способов осмотра с минимальной разборкой двигателя: с помощью эндоскопии, через окна газораспределения двухтактных двигателей и т. д.

Если же представитель КО признает целесообразность проведения освидетельствования деталей и узлов с их демонтажем, следует иметь в виду отсутствующие пока в УТ МАКО и в Правилах КО указания на первоочередность проверки состояния деталей, имеющих по

результатам расчетов наименьшие запасы усталостной прочности, а также тех деталей, которые имеют худшие показатели надежности по опыту эксплуатации двигателей этого типа или близких аналогов.

В Правилах РС, BV, RINA, DNV, KR содержатся требования ревизии после работы двигателя на завершающей стадии приемо-сдаточных испытаний – ходовых испытаниях.

При этом только Правила РС содержат требование о проведении после ревизии дополнительных контрольных испытаний с целью проверки качества сборочных и регулировочных работ после ревизии, и таким образом готовности двигателя к эксплуатации.

Подход перечисленных КО к задаче оценки состояния в заключительной стадии испытаний является целесообразным с точки зрения безопасности эксплуатации.

Возможным вариантом редакции раздела М 51 может быть следующая формулировка: «если представителем КО признано необходимым проведение ревизии выбранных узлов двигателя после ходовых испытаний, после сборки двигателя требуется проведение контрольных испытаний, содержание которых определяется по согласованию с КО».

Как было отмечено, в Правилах DNV и KR есть положения об испытании дизелей с электронным управлением. Правила других КО и УТ МАКО также нуждаются в таких положениях в виде раздела с достаточной конкретизацией (в связи с новизной и отсутствием у большинства КО опыта испытаний этих двигателей).

В результате выполненной проработки вопросов состояния требований КО и УТ МАКО к испытаниям судовых дизелей при постройке, произведенной на основе системного анализа, показана необходимость и возможность совершенствования этих требований:

путем включения в них дополнений, отражающих современные тенденции дизелестроения, технической эксплуатации и информационных технологий;

путем редакции существующих требований с учетом опыта ведущих КО.

Осуществлено формирование содержания предложений по обоим направлениям.

Сравнительный анализ УТ МАКО и требований КО позволил также предложить представляющийся перспективным более гибкий подход к методике построения требований к испытаниям, при котором органически сочетаются обобщенность и необходимая в некоторых ситуациях детализация.

Список литературы

1. Решетов Н.А., Захаров А.А. Формализованная оценка безопасности (ФОБ) и ее влияние на судоходную индустрию // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – Вып. 27. – СПб., 2005. – С. 7 – 13.
2. Румб В.К., Медведев В.В., Серов А.В., Хижняк А.А. Применение методики формализованной оценки безопасности для определения остаточного ресурса главного судового дизеля // Судостроение. – № 5. – 2005. – С. 42 – 47.
3. Шишкин В.А., Иванов М.Ю., Петров А.П. Применение электронных информационных технологий при испытаниях судовых дизелей // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – Вып. 29. – 2006. – С. 43 – 57.
4. Обозов А.А. Судовой малооборотный дизель 7S50MC-C Брянского машиностроительного завода // Судостроение. – № 5. – 2005. – С. 40 – 42.
5. Новиков Л.А. Контроль вредных выбросов двигателей, установленных на объектах применения // Двигателестроение. – № 2. – 2007. – С. 19 – 23.
6. Быстров А.И., Кравченко С.А. Диагностирование высокооборотных судовых ДВС на основе газового анализа // Сб. НТО им. акад. А.Н. Крылова. – Вып. 408. – 1985. – С. 13 – 19.
7. Шишкин В.А. Анализ неисправностей и предотвращение повреждений судовых дизелей. – М: Транспорт, 1986. – 192 с.
8. Горшков В.Ф., Лянной В.Б., Голованов А.И., Кравченко С.А. Техническое диагностирование корабельных двигателей внутреннего сгорания. – СПб.: ВМА, 1996. – 184 с.

ОСОБЕННОСТИ КРУТИЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ ВИНТО- РУЛЕВЫХ КОЛОНОК С ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПРИВОДОМ

При расчете крутильных колебаний дизельных силовых установок основным элементом их крутильной схемы является группа масс дизеля. Этот элемент располагается в начале системы, и именно в нем возникают возмущающие моменты, которые создают опасные напряжения в элементах установки. Принято считать, что возмущающие моменты от других возможных источников (например, от гребного винта) существенно ниже возмущающих моментов дизеля и поэтому в расчетах ими обычно пренебрегают.

При наличии в системе зубчатых передач часть системы за редуктором приводится к частоте вращения двигателя. При этом порядки возмущающего момента дизеля не требуют редуцирования.

Однако указанные традиции расчета не отвечают особенностям конструкции силовых установок нового типа – винторулевых колонок (ВРК) с приводом от электродвигателя.

Эти особенности были выявлены при экспертизе расчетов крутильных колебаний (TVA – Torsional Vibration Analysis), выполненных фирмой Вулкан по заказу проектанта ВРК с применением метода Хольцера (а не «метода цепных дробей» [4], принятого в отечественном судостроении для расчета свободных колебаний).

Поскольку в отчете не была приведена методика указанных расчетов (связанных с оценкой амплитуд), то была поставлена задача обоснования собственных алгоритмов и программ поверочных расчетов крутильных колебаний ВРК на основе метода Хольцера.

Для решения задачи были использованы данные о расчете ВРК типа АКВАМАСТЕР, имеющих следующие характеристики.

Электродвигатель ВРК мощностью 2000 кВт при 1000 об/мин работает в диапазоне от 0 до 1260 об/мин по винтовой характеристике. Редуктор имеет передаточное отношение на винт 0,2078. Между электродвигателем и редуктором установлена упругая муфта фирмы Вулкан марки RATO-DS 27D5 (см. рис. 1).

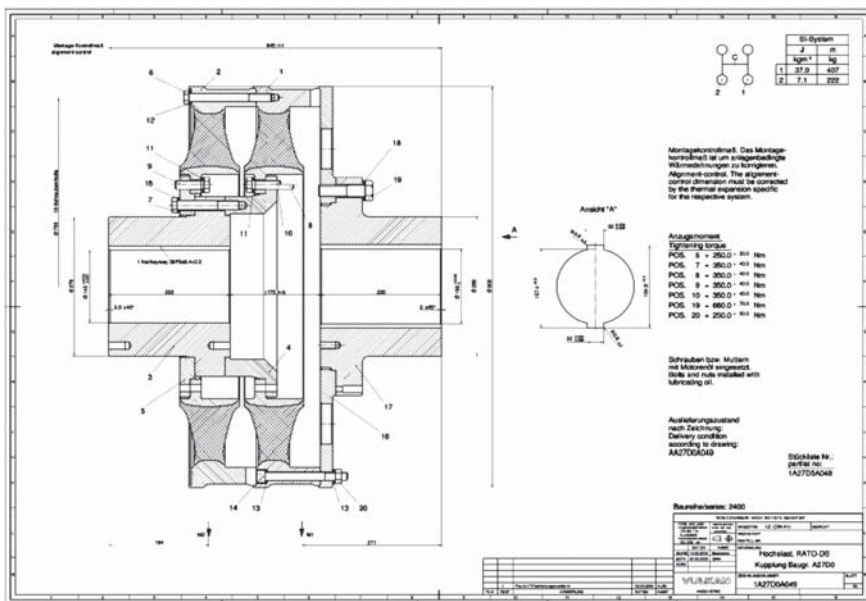


Рис. 1
Чертеж упругой муфты RATO-DS 27D5

Следует обратить внимание на то, что в этой установке колебания возбуждаются не электродвигателем, а возмущающими моментами гребного винта первого и второго лопастного порядка. В отчете показано, что первый лопастной порядок равен 0,8312, а второй – 1,6623. Образование таких дробных порядков требует следующего разъяснения. Дело в том, что речь идет о порядках возмущений от четырехлопастного гребного винта, которые равны 4 для первого лопастного порядка и 8 – для второго лопастного порядка при частоте вращения гребного винта. Расчет же крутильных колебаний будет выполняться для частоты вращения электродвигателя и поэтому данные порядки надо привести к этим оборотам путем умножения на передаточное отношение, равное 0,2078. Отсюда следует, что $4 \cdot 0,2078 = 0,8312$ и $8 \cdot 0,2078 = 1,6623$.

При этом амплитуда гармонического возбуждения принята 6 % и 2 % от передаваемого крутящего момента в движителе соответственно. Важно отметить, что при векторном суммировании амплитуд дан-

ных гармоник используется их алгебраическая, а не геометрическая сумма. Это существенно упрощает расчеты при сохранении приемлемой достоверности результата, как было показано в работе [1].

В фирменном расчете приводится таблица основных характеристик упруго-массовой системы для двух режимов включения ВРК. Таблица содержит данные о номере и названии элемента, моменте инерции массы, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$, жесткость (а не податливость!!) элемента между массами, Мнм/рад , а так же – о передаточном отношении.

На рис. 2 приводится копия этой таблицы, которая включена в разработанную нами программу расчета для Российского морского регистра судоходства.

$B_0 =$

	0	1	2	3
0	"Элемент"	"МИМ, кгм^2 "	"ЖСТК, Мнм/рад "	"ПО"
1	"Элдвиг"	274,68	"inf"	1
2	"Вал"	0	4,02	1
3	"Муфта (1)"	37,9	0.21	1
4	"Муфта (2)"	7,1	"inf"	1
5	"Фланец"	0,91	"inf"	1
6	"Вал"	0	0,89	1
7	"Фланец"	3,02	"inf"	1
8	"Вал"	0	3,55	1
9	"Фланец"	6	"inf"	1
10	"Вал"	0	17.37	1
11	"Колесо, $z=24$ "	4,2	"inf"	1
12	"Колесо, $z=33$ "	14,66	"inf"	0,7273
13	"Вал"	0	12,1	0,7273
14	"Зуб"	4,38	"inf"	0,7273
15	"Вал"	0	69,93	0,7273
16	"Зуб"	5,19	"inf"	0,7273
17	"Вал"	0	8,34	0,7273
18	"Колесо, $z=14$ "	5,16	"inf"	0,7273
19	"Колесо, $z=49$ "	226.4	"inf"	0,2078
20	"Вал"	0	63,76	0,2078
21	"Фланец"	7,1	"inf"	0,2078
22	"Винт"	$1,413 \cdot 10^{-3}$	"inf"	0,2078

Рис. 2

Следует отметить следующие особенности этой 22-массовой системы данного ВРК.

Во-первых, в составе масс (столбец 1) имеются элементы с нулевыми значениями масс (2, 6, 8 и др.), что связано с необходимостью оценки эластических моментов в зубчатых или шлицевых соединениях. Отметим, что введение таких элементов не приводит к усложнению расчетов.

Во-вторых, по той же причине в составе упругих соединений масс так же введено 12 участков с бесконечной «Infinite» жесткостью (т. е. с нулевой податливостью). Напомним, что величины жесткости по методике [1] надо преобразовать в податливость, как обратную величину жесткости.

В третьих – для элемента № 3 «Муфта 1» применена линейная характеристика, поскольку она составляет постоянную величину 0,210 МНм/рад при всех долевыми значениях крутящего момента. В общем случае податливость упругих резинометаллических муфт может быть нелинейной величиной, т. е. зависящей от передаваемого крутящего момента. Это значительно и неоправданно усложнило бы расчетные процедуры.

Четвертая особенность заключается в том, что первый номер жесткости, так же как в нашей методике [1], совпадает с номером массы ее присоединения.

В таблице не показаны два последних столбца с характеристиками демпфирования элементов. В нашей методике [1] они добавлены в процедуру приведения системы к безразмерному виду.

Рассмотренная таблица системы на рис. 2 нужна для расчета свободных колебаний по методу Хольцера как в фирменном, так и нашем (см. рис. 3) расчете.

Результаты расчета свободных колебаний шести форм практически совпали (см. табл. 1), что подтверждает корректность разработанной методики [1].

Таблица 1

Узлы	TVA	Наш расчет	%
1	416,23	416,341	0,0267
2	2328,6	2329,172	0,0246
3	3359,93	3360,136	0,0061
4	3763,02	3765,977	0,0785
5	6680,9	6680,943	0,0006

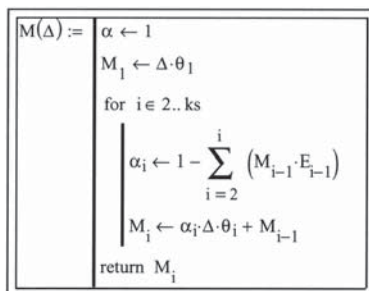


Рис. 3

При оценке результатов расчета свободных колебаний данного ВРК были определены резонансные частоты лопастных порядков n_{fv} , которые могут попасть в рабочий диапазон вращения двигателя.

Эта задача решается по известному выражению:

$$n_{fv} = N_f / v, \quad (1)$$

где N_f – частота свободных колебаний f – й формы, кол/мин;
 v – порядок колебаний.

Результаты расчета сведены в табл. 2.

Таблица 2

Номер порядка	Порядок	Резонансные об/мин для форм колебаний				
		1 (416,23)	2 (2328,60)	3 (3359,93)	4 (3763,02)	5 (6680,9)
1	0,8312	500,76	2801,49	4042,26	4527,20	8037,6
2	1,6624	250,38	1400,78	2021,13	2263,60	4018,8

Данные таблицы подтверждают, что практическое значение имеют только резонансы лопастных порядков одноузловой формы при 500,76 об/мин (первый лопастной порядок) и 250,38 об/мин (второй лопастной порядок). Резонансы от других форм не попадают в рабочий диапазон оборотов и их далее рассматривать не следует.

Разработанная программа позволила оценить основные характеристики этой формы свободных колебаний (рис. 4).

После расчета свободных колебаний были определены амплитуды первой массы систем при резонансах лопастных порядков, а затем

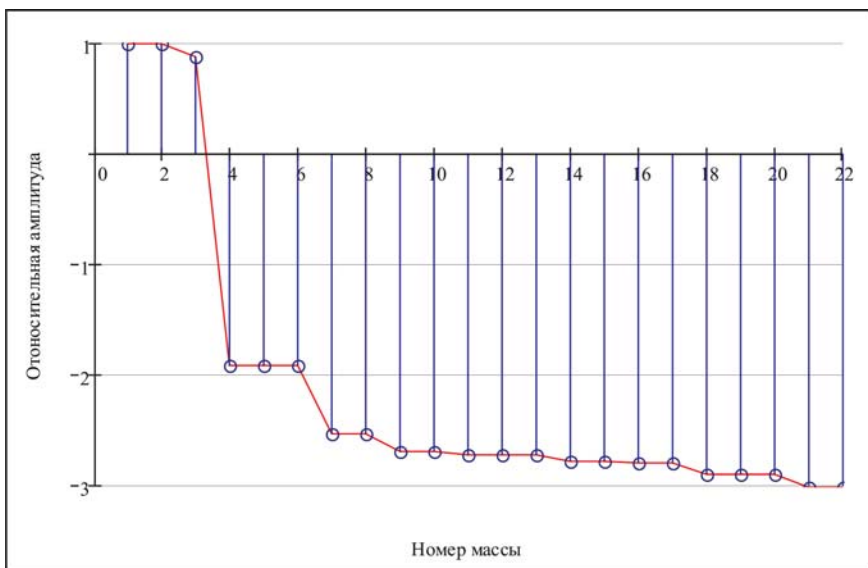


Рис. 4

сделана оценка эластических моментов от резонансных и вынужденных колебаний тех же порядков в наиболее напряженных участках системы: № 3 – «Муфта 1», № 11 – «зубчатое зацепление $z = 24$ » и № 18 – «зубчатое зацепление $z = 14$ » (по табл. рис. 2).

Для упругой муфты типа Вулкан RATO-DS 27D5 (элемент № 3) кроме того рассчитывалась и оценивалась величина так называемой потери мощности (на нагрев резины) PKV.

Таблица 3

№ порядка	1	2
$N_{рез}, \text{ об/мин}$	500,91	250,45
β	6,34	7,52
$A_1, \text{ рад}$	0,00244	0,00024
$M_e, \text{ Нм}$	1425,7	141
$M_{доп}, \text{ Нм}$	12000	12000
PKV	0,037	0,00036
$PKV_{доп}$	0,87	0,87

Отметим, что в фирменном отчете приводятся результаты расчета этих параметров, но без методических пояснений. Поэтому принципиальное значение имело сравнение этих результатов с нашими расчетами по новой методике и программе с целью проверки эффективности последних.

В первую очередь рассмотрим табличные (табл. 3) и графические (рис. 5) параметры нагрузки от крутильных колебаний в упругой муфте, полученные по нашему расчету. Из приведенных данных следует, что указанные нагрузки намного меньше допустимых (по данным фирмы Вулкан) и не представляют опасности для муфты.

Аналогичные выводы следуют и относительно нагрузок в зубчатых зацеплениях (рис. 6 и табл. 4).

Таблица 4

Элемент	№ порядка	Параметр	Величина	Допуск
Зубчатое зацепление (№ 11)	1	Эл. мом., КНм	1,197	5,73
		Момент (КНм)	$4,8 \pm 1,19$	19,1
	2	Эл. мом., КНм	0,12	5,73
		Момент (КНм)	$4,8 \pm 1,2$	19,1
Зубчатое зацепление (№ 18)	1	Эл. мом., КНм	1,363	7,88
		Момент (КНм)	$6,59 \pm 1,36$	26,27
	2	Эл. мом., КНм	0,134	7,88
		Момент (КНм)	$1,2 \pm 0,13$	19,1

Следует с удовлетворением отметить, хорошее совпадение наших расчетов не только частот свободных колебаний, но и приведенных выше нагрузок в муфте и зубчатых зацеплениях.

В табл. 5 приведено сравнение расчетов для параметров крутильных колебаний лопастного порядка № 1.

Таблица 5

Элемент	Параметр	Расчет фирмы	Наш расчет	%
№ 3	Эл. мом., КНм	1,353	1,426	5,1
	PKV	0,035	0,037	5,4
№ 11	Эл. мом., КНм	1,082	1,197	8,8
№ 18	Эл. мом., КНм	1,306	1,363	4,2

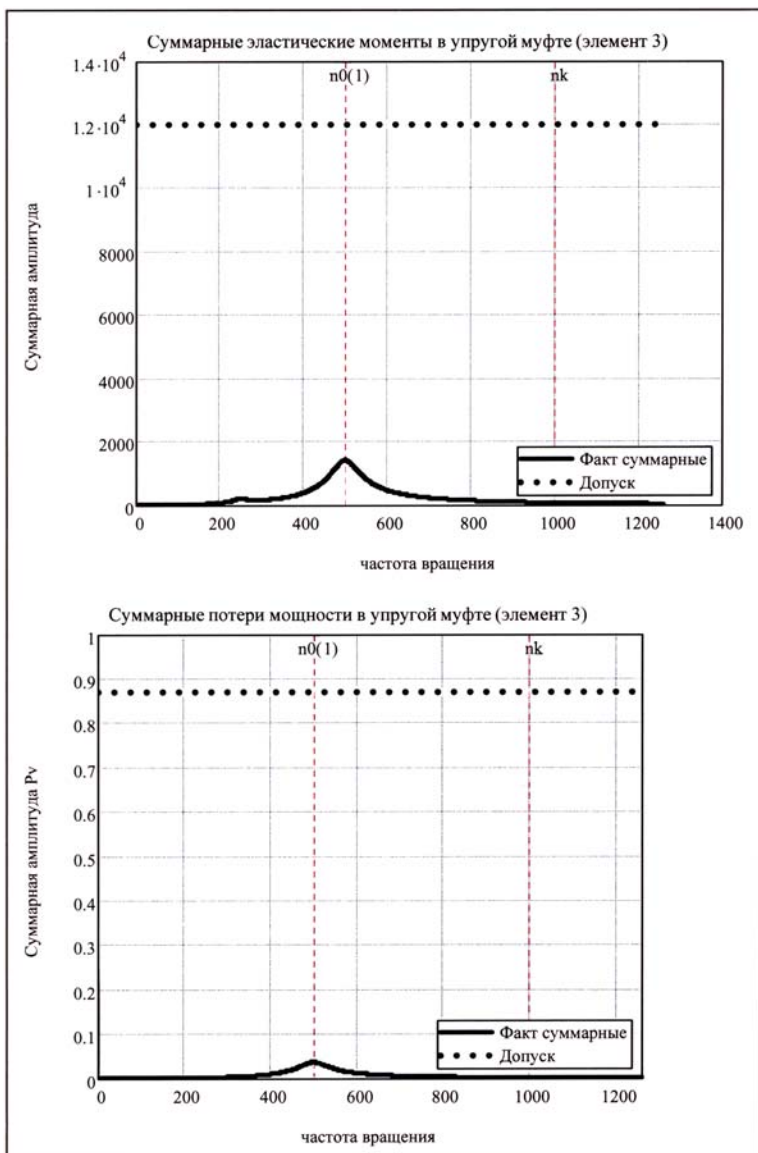


Рис. 5

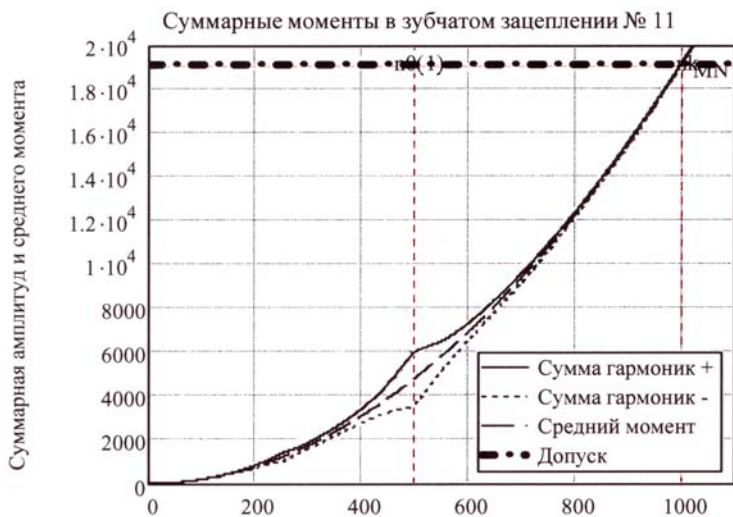
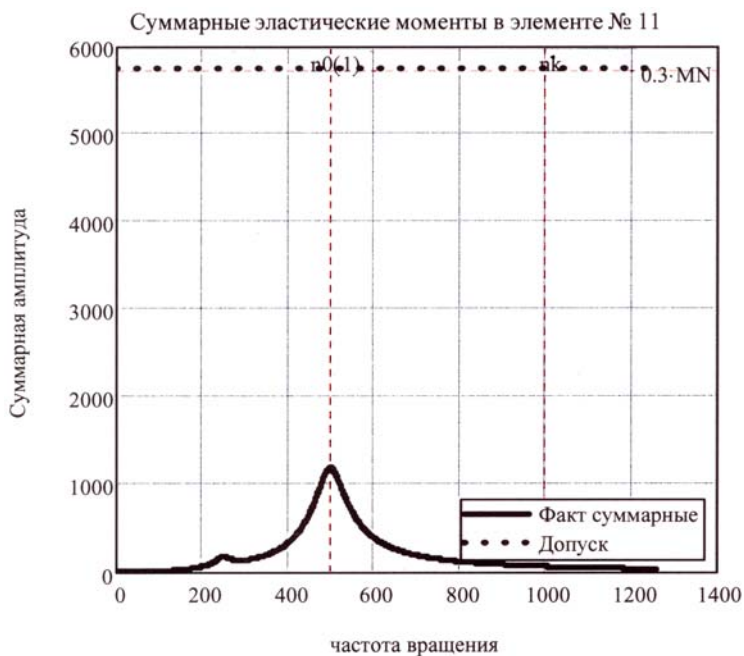


Рис. 6

Выполненное исследование позволило сделать следующие выводы.

1. Во-первых, выявлены особенности расчета крутильных колебаний ВРК с электрическим приводом, а во-вторых, подтверждены эффективность и универсальность разработанных программ для экспертизы подобных расчетов Регистром.

2. К наиболее важным выводам из анализа фирменного расчета крутильных колебаний ВРК, которые целесообразно было учесть при разработке новой программы, можно отнести:

выполнение расчетов не напряжений в валах, а эластических моментов для упругой муфты и зубчатых зацеплений, а так же потери мощности на нагрев резины упругой муфты;

учет в качестве основных возмущающих моментов гармоник первого и второго лопастных порядков от гребного винта, приведенных к частоте вращения электродвигателя;

учет при оценке опасности крутильных колебаний только свободных колебаний одноузловой формы, поскольку резонансы от более высокочастотных форм колебаний выходят за пределы рабочего диапазона оборотов электродвигателя;

использование для оценки упругих элементов между массами податливости, а не ее обратной величины – жесткости;

введение в схему системы вращающихся масс нулевых масс и бесконечных жесткостей (нулевых податливостей) для оценки нагрузки в шлицевых и зубчатых зацеплениях;

при расчете жесткости упругой муфты не учитывается нелинейность ее характеристики (т. е. жесткость принята постоянной величиной при любом крутящем моменте);

применение при расчете векторных сумм колебаний различных порядков нулевых значений фазовых углов (алгебраическое сложение);

применение для расчета свободных колебаний метода Хольцера (HOLZER Analysis).

3. Выполненный расчет крутильных колебаний ВРК по разработанной программе с применением метода Хольцера в редакторе MATHCAD подтвердил ее корректность и универсальность. Это следует из сравнения результатов расчета с расчетными данными фирмы Вулкан. Табл. 1 показывает, что различие в частотах свободных колебаний составило сотые доли процента и является естественным фактом, поскольку оба расчета базируются на одной и той же классической теории свободных колебаний упругих систем.

Более важно отметить хорошее совпадение результатов расчета амплитуд и нагрузок в элементах системы от резонансных колебаний лопастных порядков. Положительным явлением можно считать наличие информации о возмущающих моментах лопастных порядков гребного винта, которые были однозначно использованы в наших расчетах. Отмечается одинаковый подход к суммированию гармоник разных порядков при нулевом сдвиге по фазе между гармониками.

Данные табл. 5 позволяют сделать заключение о достоверности разработанной программы, ибо различие между расчетными величинами составило всего 5 – 9 %, что является хорошим показателем при оценке амплитуд резонансных колебаний, когда допустимый разброс их значений может достигать до 30 % и более [1].

Расчет амплитуд крутильных колебаний ВРК косвенно подтверждает корректность и универсальность принятой концепции учета демпфирования в системе и расчета резонансных и вынужденных крутильных колебаний для любых типов силовых установок, а не только для дизельных.

Список литературы

1. Е ф р е м о в Л . В . Теория и практика исследований крутильных колебаний силовых установок с применением компьютерных технологий. – СПб.: Наука, 2007. – 276 с.
2. И с т о м и н П . А . Крутильные колебания в судовых ДВС. – Л.: Судостроение, 1968. – 303 с.
3. О ч к о в В . Ф . «Mathcad 14 для студентов, инженеров и конструкторов» BHV-Петербург, 2007 г. (ISBN 978-5-9775-0129-3).
4. Т е р с к и х В . П . Крутильные колебания валопровода силовых установок // Судостроение. – 1971. – 300 с.

ПРОБЛЕМА ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ СУДОВЫХ СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ С ЗАБОРТНЫМИ ОХЛАДИТЕЛЯМИ

В настоящее время на морских судах и судах типа «река-море» наметилась новая тенденция развития систем охлаждения. Кратко ее можно изложить следующим образом: при проектировании и строительстве судов верфи и судовладельцы отказываются от применения двухконтурных систем охлаждения, используя, в качестве альтернативы системе заборной воды, расположенные в кингстонных ящиках охладители пресной воды либо корпусные конструкции двойного борта и двойного дна, охлаждаемые непосредственно заборной водой. Обычная типовая схема системы охлаждения с расположенными в кингстонном ящике охладителями показана на рис. 1 и 2. На рис. 3

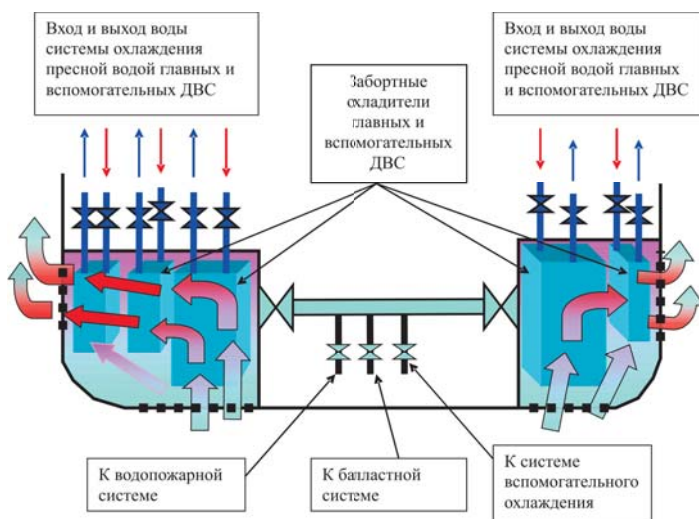


Рис. 1

Общая схема системы охлаждения с заборными охладителями в кингстонных ящиках

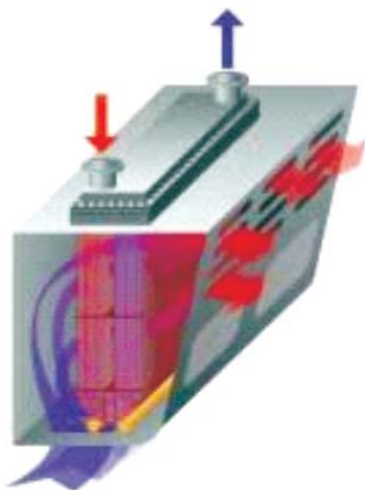


Рис. 2
Схема расположения охладителя
в кингстонном ящике
(по материалам фирмы BLOKSMA)

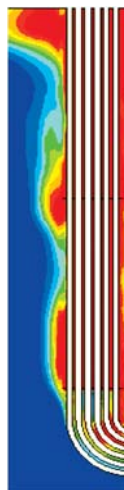


Рис. 3
Поле температур при обтекании
водой охладителя внутри кингстонного
ящика, полученное путем
математического моделирования
(по материалам фирмы BLOKSMA)

показано поле температур при обтекании водой охладителя внутри кингстонного ящика, полученное путем математического моделирования (по материалам фирмы BLOKSMA).

Преимущества систем охлаждения с применением кингстонных охладителей очевидны.

1. Существенно уменьшается потребление электроэнергии в процессе эксплуатации судна, так как исключаются затраты на работу насосов охлаждения забортной водой. На работу насосов охлаждения забортной водой приходится приблизительно 20 % всей вырабатываемой на ходу судна электроэнергии или примерно 0,4 – 1,0 % мощности главного двигателя (меньшее значение для двигателей большей мощности), т. е. для среднетоннажного судна мощность привода насоса охлаждения забортной водой составляет 15–20 кВт. Если учесть, что для привода насоса мощностью 15 кВт требуется приблизительно 3 литра топлива в час, то можно подсчитать, что годовая экономия топлива для судна с коэффициентом ходового времени 0,5 составит 13–15 т.

2. Значительно упрощается система охлаждения и, как следствие, повышается ее надежность. Опыт деятельности по техническому наблюдению показывает, что на судах, находящихся под техническим наблюдением Регистра, одним из наименее надежных элементов механической установки являются системы охлаждения забортной водой. Частота возникновения отказов в этих системах говорит о недостаточной надежности их элементов, а затраты на их восстановление весьма значительны. По данным [1] стоимость ремонта систем забортной воды составляет в среднем около 10 % общей стоимости ремонта судна за все время его эксплуатации. Наименее надежными элементами систем охлаждения забортной водой являются трубы, затем, в порядке возрастания надежности, следуют запорная арматура, насосы, теплообменные аппараты, контрольно-измерительные приборы. Отсутствие основных элементов системы охлаждения забортной водой значительно повышает надежность механической установки. При этом некоторые опасности, прежде всего связанные с потерей хода судна и затоплением машинного отделения, значительно уменьшаются.

3. Существенно снижаются затраты при постройке, за счет отказа от закупок насосов забортной воды и арматуры. При этом необходимо учесть, что для уменьшения коррозионного износа в системах охлаждения забортной водой часто используют трубы и арматуру из цветных сплавов, а если используются стальные трубы, то они, согласно требованиям Регистра, должны иметь горячее цинковое покрытие. Существенно снижается общая трудоемкость на постройку судна за счет уменьшения затрат на монтаж оборудования и изготовление труб. Кроме того, уменьшается насыщенность МКО механическим оборудованием.

4. Существенно уменьшается количество донно-бортовой арматуры (ДБА) и приварных приемных и отливных донно-бортовых патрубков. Не случайно, проанализировав аварии, связанные с затоплением машинных отделений, и рассмотрев опасности, связанные с отказами трубопроводов, Регистр определил два наиболее опасных объекта на судне: донно-бортовые патрубки и межкингстонные перемычки, к которым в настоящее время предъявляются требования по обязательным периодическим замерам толщин стенок. Требование о замерах донно-бортовых патрубков появилось в связи с большой опасностью затопления помещений после их выхода из строя, так как в этом случае невозможно остановить поступление воды путем закрытия донно-бортовой арматуры. С учетом большого диаметра донно-бортовых патрубков и расположения их значительно ниже ватерлинии вероятность

затопления машинного отделения (МО) после аварии патрубка составляет практически 100 %. Примером может служить затопление МО на теплоходе «Аскания Нова», когда приемный патрубок был изношен до толщины бумаги. Требование о замерах толщин стенок межкингстонных перемычек появилось так же в связи с большой опасностью затопления МО, хотя в данном случае поступление воды можно остановить путем закрытия приемной донно-бортовой арматуры. Но в этом случае происходит неизбежная остановка главных и вспомогательных двигателей и, как следствие, потеря хода, управляемости, электропитания от всех источников кроме АДГ, т. е. судно попадает в ситуацию, когда до катастрофы остается один шаг. Для того чтобы произошла потеря судна, в этом случае достаточно появления в период ремонта трубопроводов еще одного опасного события, например плохой погоды или другого судна, с которым невозможно избежать столкновения из-за отсутствия хода. Хотя на судне при использовании забортных охладителей зачастую сохраняются донно-бортовые патрубки и межкингстонная перемычка, но, учитывая их назначение только для вспомогательных нужд и значительно меньшую интенсивность износа, последствия и вероятность наступления такого отказа значительно меньше.

Ниже, в табл. 1, приводятся типовые отказы системы охлаждения, опасности, связанные с ними, и дается оценка вероятности реализации этих опасностей для двух вариантов систем охлаждения.

Таблица 1

Описание отказа	Следствия отказа	Опасности	Оценка вероятности реализации опасности после наступления отказа	
			Обычная схема охлаждения забортной водой	Схема с забортным охладителем
1	2	3	4	5
Выход из строя труб системы охлаждения забортной воды	1. Прием воды в МО в течение времени, необходимого на закрытие ДБА 2. Остановка ГД и дизель-генераторов	1. Затопление машинно-котельного отделения (МКО) 2. Потеря хода и электропитания на время ремонта	1. Возможно при неверных действиях экипажа или одновременном отказе ДБА 2. Весьма вероятно	1. Исключено 2. Исключено

1	2	3	4	5
Выход из строя межкингстонной перемычки	1. Прием воды в МО в течение времени, необходимого на закрытие ДБА 2. Остановка ГД и дизель-генераторов (кроме АДГ)	1. Затопление МКО 2. Потеря хода и электропитания на время ремонта и осушения МКО	1. Возможно при неверных действиях экипажа. Весьма вероятно при одновременном отказе ДБА 2. Неизбежно	1. Исключено 2. Исключено
Выход из строя приемного или отливного патрубка	1. Прием воды в МО 2. Остановка ГД и дизель-генераторов (кроме АДГ)	1. Затопление МКО 2. Потеря хода и электропитания 3. Потеря судна	1. Весьма вероятно 2. Весьма вероятно 3. Возможно при неблагоприятных обстоятельствах	1. Исключено 2. Исключено 3. Исключено
Забивание кингстонных ящиков битым льдом и шугой	1. Нарушение охлаждения	1. Потеря хода на время очистки фильтров и обогрева кингстонных ящиков	1. Возможно при плавании в весеннем битом льду	1. Маловероятно. Возможно при производстве балластных операций. На мощность и скорость хода не влияет
Выход из строя теплообменного аппарата (ТА) охлаждения пресной воды	1. Потери пресной воды 2. Попадание забортной воды в контур охлаждения пресной водой	1. Переход на резервный ТА. Ремонт ТА 2. Сокращение ресурса дизеля. Внеплановое техобслуживание	1. Возможен ремонт в рейсе или порту путем заглушки или подвальцовки трубок ТА. Возможна замена трубных элементов на плаву. 2. Возможно при неверных действиях экипажа	1. Возможен ремонт в рейсе или порту путем заглушки поврежденных трубок ТА. Замена ТА возможна только в доке 2. Возможно при неверных действиях экипажа

1	2	3	4	5
Обрастание ТА морскими организмами	1. Перегрев главных и вспомогательных двигателей. Срабатывание защит ГД	1. Уменьшение мощности двигателей, как следствие – уменьшение скорости хода	1. Весьма вероятно. В о з м о ж н а очистка во время рейса	1. Весьма вероятно. Очистка возможна только в доке

Как следует из табл. 1, большинство наиболее опасных событий, связанных с отказами системы забортной воды, при применении схемы с забортными охладителями либо полностью исключается, либо значительно уменьшается вероятность их наступления и тяжесть последствий. Только в последнем случае последствия аварии для систем охлаждения с забортными охладителями могут быть более тяжелыми, чем для обычных систем охлаждения. Учитывая, что характер отказа, возникающего в результате обрастания теплообменного аппарата, является постепенным, необходимо периодически контролировать эффективность его работы в процессе эксплуатации. Производить это простым измерением температуры воды охлаждения малоэффективно, так как судно может эксплуатироваться при различных температурах забортной воды, а не учитывать этот фактор было бы некорректно. Для его учета возникла необходимость создать специальную методику, которая позволяла бы определить эффективность работы системы охлаждения в процессе эксплуатации судна. Кроме того, такая методика необходима при швартовных и ходовых испытаниях судна, так как по требованиям Регистра механическая установка должна надежно работать при температуре забортной воды 32 °С, что практически невозможно проверить непосредственно при испытаниях и необходимо делать специальный пересчет. Учитывая важность изложенных проблем, а так же то, что в настоящее время более половины судов, строящихся под техническим наблюдением Регистра, строится с использованием забортных охладителей, ГМА и ГУР в 2006 г. разработали специальную методику оценки теплотехнических характеристик забортных охладителей.

Основные положения методики оценки теплотехнических характеристик заборных охладителей, располагающихся в кингстонных ящиках

Охлаждение двигателя внутреннего сгорания при использовании заборного охладителя, расположенного в кингстонном ящике, можно представить как многоступенчатый процесс теплообмена:

процесс переноса тепла от воды системы охлаждения к стенкам теплообменных элементов;

процесс переноса тепла через стенку ТА;

процесс переноса тепла от стенок теплообменных элементов (обычно трубок) к заборной воде внутри кингстонного ящика;

процесс теплообмена между заборной водой внутри кингстонного ящика (КЯ) и заборной водой снаружи КЯ.

Отдельно рассмотрим этапы процесса теплообмена.

Процесс теплообмена между заборной водой внутри кингстонного ящика (КЯ) и заборной водой снаружи КЯ

Процесс теплообмена между заборной водой внутри кингстонного ящика (КЯ) и заборной водой снаружи КЯ осуществляется за счет теплопередачи через стенку КЯ и путем обмена воды за счет естественной циркуляции.

Естественная циркуляция воды через кингстонный ящик возникает за счет перепада давления:

$$\Delta P = \rho \beta \Delta t g h, \quad (1)$$

где ΔP – перепад давления, создаваемый тепловым расширением;

ρ – плотность жидкости;

β – коэффициент объемного расширения;

Δt – средняя разница температур воды внутри кингстонного ящика и заборной воды;

g – ускорение свободного падения;

h – высота кингстонного ящика.

Массовый расход воды G через решетку будет равен:

$$G = \mu \omega \sqrt{2 \Delta P \rho}, \quad (2)$$

где ΔP – потеря давления в результате сопротивления решеток и пучка теплообменника;

μ – коэффициент расхода, может быть определен по формуле (3):

$$\mu = 1 / \sqrt{1 + \xi_{\text{пучка}} + 2 \xi_{\text{решетки}}}; \quad (3)$$

ω – площадь проходного сечения решетки.

Если подставить (1) в (2), то получится формула, определяющая массовый расход воды через кингстонный ящик в результате естественной циркуляции:

$$Q = \mu \omega \rho \sqrt{2 \cdot \beta \cdot \Delta t \cdot g \cdot h}. \quad (4)$$

Тепловой поток q через кингстонный ящик в результате естественной циркуляции будет равен:

$$q = Q \cdot c \cdot \Delta t = \mu \cdot \omega \cdot \rho \cdot c \cdot \Delta t \sqrt{2 \cdot \beta \cdot \Delta t \cdot g \cdot h}, \quad (5)$$

где C – удельная теплоемкость воды.

Если принять, что

$$A = \rho \cdot c \sqrt{2 \cdot \beta \cdot g}, \quad (6)$$

то q примет следующий вид:

$$q = A \cdot \mu \cdot \omega \cdot \Delta t^{3/2} \sqrt{h}. \quad (7)$$

Как следует из последнего выражения, тепловой поток зависит от: параметров, характеризующих геометрическое совершенство кингстонного ящика (высота h , площадь проходного сечения решетки ω и коэффициента расхода μ);

параметра A , характеризующего свойства жидкости (для морской воды с соленостью 30 % при температуре 14 °С $A = 2,19 \cdot 10^5$);

средней разницы температур воды внутри кингстонного ящика и забортной воды Δt .

На рис. 4 показаны графики разницы температуры воды внутри кингстонного ящика и забортной воды Δt в зависимости от тепловой мощности для высоты кингстонного ящика 2 м и 4 м, построенные на основе формулы (7). При этом коэффициент расхода μ получен согласно формуле (3) с использованием коэффициентов сопротивления различных решеток и трубных пучков по данным [3]. Для забортного теплообменного аппарата, имеющего 10 рядов труб и две решетки, суммарный коэффициент расхода был получен равным 0,214. Площадь проходного сечения решетки ω принята равной 1 м².

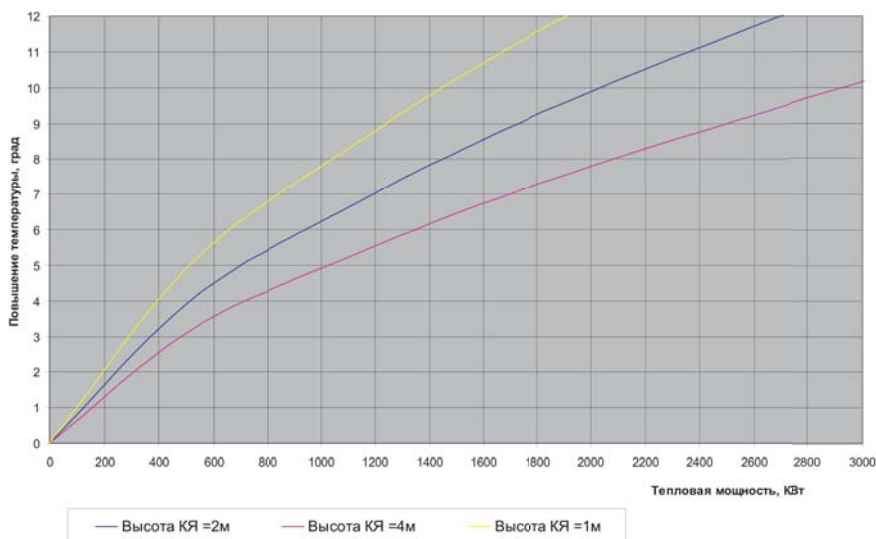


Рис. 4
Зависимость повышения температуры внутри кингстонного ящика (КЯ)
от тепловой мощности

Как видно из графика, температура воды внутри кингстонного ящика с заборным охладителем приблизительно на 5 – 7 °С выше, чем за бортом, что не может не сказываться на температуре воды охлаждения главных двигателей. Вместе с тем это говорит о том, что, в отличие от схемы с принудительной циркуляцией, попадание льда и шуги в кингстонный ящик при такой схеме не требует принятия каких-либо специальных мер.

По результатам рассмотрения первой ступени предлагаемой математической модели можно сделать промежуточный вывод о том, что на эффективность работы заборного охладителя влияет не объем, а высота КЯ и площадь проходного сечения его решеток.

Процесс теплообмена между водой охлаждения и заборной водой внутри кингстонного ящика

Количество теплоты, которое необходимо отвести от горячей воды $Q_{\text{с+м}}$, определяется номинальной мощностью двигателя N_0 и долевой нагрузкой $N_e/N_0 = 0 \div 100 \%$.

Количество теплоты, отводимое в охлаждающую воду двигателя и в масло $Q_{\text{в+м}}$, составляет 20 ÷ 25 % от теплоты, выделившейся при сгорании топлива Q_m :

$$Q_m = N_e + Q_{\text{в+м}} + Q_{\text{азвз}}.$$

В забортных кингстонных охладителях рассеивается тепло $Q_{\text{охл}}$, отводимое в охлаждающую воду двигателя и в масло, т. е. $Q_{\text{в+м}}$. Для нормальной работы двигателя необходимо, чтобы $Q_{\text{в+м}} = Q_{\text{охл}}$ [Вт].

Температура горячей воды на выходе из охладителя t''_e определяется:

температурой горячей воды на входе в охладитель t'_e ;

температурой забортной воды внутри кингстонного ящика $t_{3\text{в}}$ (как показано, она на 10–12 °С выше, чем за бортом);

коэффициентом теплопередачи K [$\text{Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К})$] или погонным коэффициентом теплопередачи K_e [$\text{Вт} / (\text{м} \cdot \text{К})$];

площадью теплообменной поверхности F или размерами (d_1 ; d_2 ; l) и количеством трубок в охладителе.

Температура горячей воды на выходе из охладителя может быть определена по формуле:

$$t''_e = t'_e - (Q_{\text{охл}} / c_p G_{\text{вг}}), \quad (8)$$

где $G_{\text{вг}}$ – расход горячей воды, (кг/с);

c_p – удельная изобарная теплоемкость воды (Дж/(кг К)).

Для кингстонных теплообменников, состоящих из круглых гладких труб с диаметром d_1 / d_2 и длиной l :

$$Q_{\text{охл}} = K_e \cdot l \cdot N_{\text{тр}} \frac{(t'_e - t_{3\text{в}}) - (t''_e - t_{3\text{в}})}{\ln \frac{t'_e - t_{3\text{в}}}{t''_e - t_{3\text{в}}}} = K_e \cdot l \cdot N_{\text{тр}} \frac{t'_e - t''_e}{\ln \frac{t'_e - t_{3\text{в}}}{t''_e - t_{3\text{в}}}},$$

поскольку температуру забортной воды на входе и выходе из теплообменника можно считать одинаковой, а перепад температур по горячей воде обычно составляет не более 10 °С, температурный перепад между теплоносителями можно оценить как:

$$\Delta t = (t'_e + t''_e) / 2 - t_{3\text{в}} = (\bar{t}_e - t_{3\text{в}}), \quad (9)$$

где $\bar{t}_e = (t'_e + t''_e)/2$ – средняя температура горячей воды в охладителе.

Таким образом:

$$Q_{охл} = K_l \cdot l \cdot N_{mp} \Delta t.$$

Оценка коэффициента теплопередачи

Оценим погонный коэффициент теплопередачи кингстонных теплообменников, состоящих из круглых гладких труб с диаметром d_1/d_2 и длиной l :

$$K_e = \frac{2\pi}{\frac{1}{\alpha_{зоп} r_1} + \frac{1}{\lambda_w} \ln r_2/r_1 + \frac{1}{\alpha_{зв} \cdot r_2}}. \quad (10)$$

В случае отсутствия обрастания и при условии турбулентного движения воды в трубах первые два слагаемых в знаменателе будут существенно меньше третьего, так как теплоотдача со стороны заборной воды ($\alpha_{зв}$) определяется свободной конвекцией, а в трубах ($\alpha_{зоп}$) – вынужденной, и металлические трубы обладают высоким коэффициентом теплопроводности λ_w .

Умножим числитель и знаменатель в выражении (10) на $(\alpha_{зв} \cdot r_2)$ и получим:

$$K_e = 2\pi\alpha_{зв}r_2/(1 + A),$$

где $A = (\alpha_{зв}/\alpha_{зоп} \cdot r_2/r_1 + \alpha_{зв}r_2/\lambda_w \cdot \ln r_2/r_1) < 1$.

Поскольку A существенно меньше 1, коэффициент $B = 2\pi r_2/(1 + A) \approx \text{const}$ для конкретного охладителя.

Таким образом:

$$K_e \approx B \cdot \alpha_{зв}, \quad (11)$$

$$Q_{охл} = B \cdot \alpha_{зв} \cdot l \cdot N_{mp} \cdot (\bar{t}_e - t_{зв}).$$

Учитывая, что для конкретного теплообменника $l \cdot N_{mp} = \text{const}$:

$$Q_{охл} = B_0 \cdot \alpha_{зв} (\bar{t}_e - t_{зв}),$$

где $B_0 = 2\pi r_2 N_{mp} / (1 + A) = B \cdot l \cdot N_{mp}$.

Оценка коэффициента теплоотдачи со стороны заборной воды

$$\alpha_{3\theta} = Nu_{3\theta} \cdot \lambda_{3\theta} / l_0, \quad (12)$$

где $l_0 = l/2$ – высота теплообменных труб для петлевых теплообменников;

$\lambda_{3\theta} = 0,553 \cdot (1 + 0,003 \cdot t_{3\theta})$ Вт/м · К – коэффициент теплопроводности пресной воды.

Число Нуссельта в случае свободной конвекции $Nu_{3\theta} = c(P_r G_r)^n$, где для вертикальных поверхностей $C = 0,15$; $n = 1/3$.

$$\text{Здесь } Gr_{3\theta} = [g \cdot \beta_0 \cdot (t_w - t_{3\theta}) \cdot \beta_t] / \nu^2 - \text{Число Грасгофа}, \quad (13)$$

где $g = 9,8$ м/с²;

t_w – температура поверхности стенки теплообменной трубки;

β_t – коэффициент температурного расширения заборной воды.

Учитывая, что $\alpha_{2\theta}$ существенно больше $\alpha_{3\theta}$, можно считать, что $t_w \approx t_{3\theta}$ и тогда $t_w - t_{3\theta} \approx t_2 - t_{3\theta} = \Delta t$.

Кинематический коэффициент вязкости пресной воды оценивается эмпирической формулой:

$$\nu = \frac{1,78 \cdot 10^{-6}}{1 + 0,0337 \cdot t_{3\theta} + 0,000221 \cdot t_{3\theta}^2}, \quad \text{м}^2/\text{с}. \quad (14)$$

Коэффициент температурного расширения заборной воды оценивается эмпирической формулой:

$$\beta_t = \frac{3 \cdot 10^{-4}}{1 + 3 \cdot 10^{-4} \cdot (t_{3\theta} - 10)}.$$

Таким образом, получим:

$$G_r = \frac{9,47 \cdot 10^7 \cdot g \cdot \beta_0 \cdot (1 + 0,0337 \cdot t_{3\theta} + 0,000221 \cdot t_{3\theta}^2)^2 \cdot \Delta t}{1 + 3 \cdot 10^{-4} \cdot (t_{3\theta} - 10)}. \quad (15)$$

Учитывая, что число Прандтля для пресной воды можно определить по формуле:

$$Pr = \nu/a = \frac{13,48}{(1 + 0,0337 \cdot t_{3\theta} + 0,000221 \cdot t_{3\theta}^2) \cdot (1 + 0,003 \cdot t_{3\theta})}, \quad (16)$$

где $a = 1,32 \cdot 10^{-7} \cdot (1 + 0,003 \cdot t_{3\theta})$, M^2/c – коэффициент температуропроводности пресной воды.

Найдем:

$$\begin{aligned} Pr \cdot G_r &= \frac{g \cdot \beta_0 \cdot \beta_t \cdot \Delta t}{\nu^2} \cdot \nu/a = \frac{g \cdot \beta_0 \cdot \Delta t (1 + 0,0337 \cdot t_{3\theta} + 0,000221 \cdot t_{3\theta}^2) \cdot 3 \cdot 10^4}{2,35 \cdot 10^{-13} (1 + 0,003 \cdot t_{3\theta}) \cdot (1 + 0,0003 \cdot (t_{3\theta} - 10))} = \\ &= \frac{g \cdot \beta_0 \cdot 1,276 \cdot 10^9 \cdot \Delta t (1 + 0,0337 \cdot t_{3\theta} + 0,000221 \cdot t_{3\theta}^2)}{(0,997 + 3,291 \cdot 10^{-3} t_{3\theta} + 9 \cdot 10^{-7} t_{3\theta}^2)}; \end{aligned}$$

$$Nu = C \cdot (Pr \cdot G_r)^{1/3} = 0,15 l_0 \cdot 10^3 \cdot 1,084 \left(\frac{g \cdot \Delta t (1 + 0,0337 \cdot t_{3\theta} + 0,000221 \cdot t_{3\theta}^2)}{(1 + 0,003 \cdot t_{3\theta}) \cdot (1 + 0,0003 \cdot (t_{3\theta} - 10))} \right)^{1/3}.$$

Подставляя полученное выражение в формулу (5) и учитывая выражение $\lambda_{3\theta} = 0,553 \cdot (1 + 0,003 \cdot t_{3\theta})$, получим что:

$$\begin{aligned} \alpha_{3\theta} &= 162,6 \cdot g^{1/3} \cdot \frac{\Delta t^{1/3}}{(1 + 0,003 \cdot t_{3\theta})^{1/3}} \cdot \\ &\cdot \frac{(1 + 0,0337 \cdot t_{3\theta} + 0,000221 \cdot t_{3\theta}^2)^{1/3} \cdot 0,553 \cdot (1 + 0,003 \cdot t_{3\theta})}{(1 + 0,0003 \cdot (t_{3\theta} - 10))^{1/3}} = \\ &= 89,9 \cdot g^{1/3} \cdot \frac{\Delta t^{1/3}}{(1 + 0,0003 \cdot (t_{3\theta} - 10))^{1/3}} \cdot (1 + 0,0337 \cdot t_{3\theta} + 0,000221 \cdot t_{3\theta}^2)^{1/3} \cdot \\ &\cdot (1 + 0,003 \cdot t_{3\theta})^{2/3}. \quad (17) \end{aligned}$$

Учитывая, что для конкретного двигателя $\bar{t}_a$ меняется незначительно, в 1-м приближении можно считать $\bar{t}_a \approx const$, тогда:

$$\alpha_{3\theta} = f(t_{3\theta}) \cdot \Delta t^{1/3}; \quad (18)$$

$$\text{где } f(t_{3\theta}) = 89,9 \cdot g^{1/3} \cdot \frac{(1 + 0,0337 \cdot t_{3\theta} + 0,000221 \cdot t_{3\theta}^2)^{1/3} \cdot (1 + 0,003 \cdot t_{3\theta})^{2/3}}{(1 + 0,0003 \cdot (t_{3\theta} - 10))^{1/3}} \quad (19)$$

– температурный фактор, учитывающий влияние температуры заборной воды в кингстонном ящике на коэффициент теплоотдачи.

График функции $f(t)$ (19) представлен на рис. 5.

Подставив (11) в выражение $Q_{охл} = B_0 \cdot \alpha_{3\theta} (\bar{t}_2 - t_{3\theta})$, получим формулу, которая позволяет произвести оценку эффективности заборного теплообменного аппарата в процессе работы:

$$Q_{охл} = B_0 \cdot f(t_{3\theta}) \cdot \Delta t^{4/3}, \quad (20)$$

где B – эффективная площадь теплообмена;

Δt – температурный перепад между средней температурой воды охлаждения и средней температурой заборной воды в кингстонном ящике;

$f(t)$ – температурный фактор, учитывающий влияние температуры заборной воды в кингстонном ящике на коэффициент теплоотдачи (см. рис. 5).

Температурный фактор $f(t)$

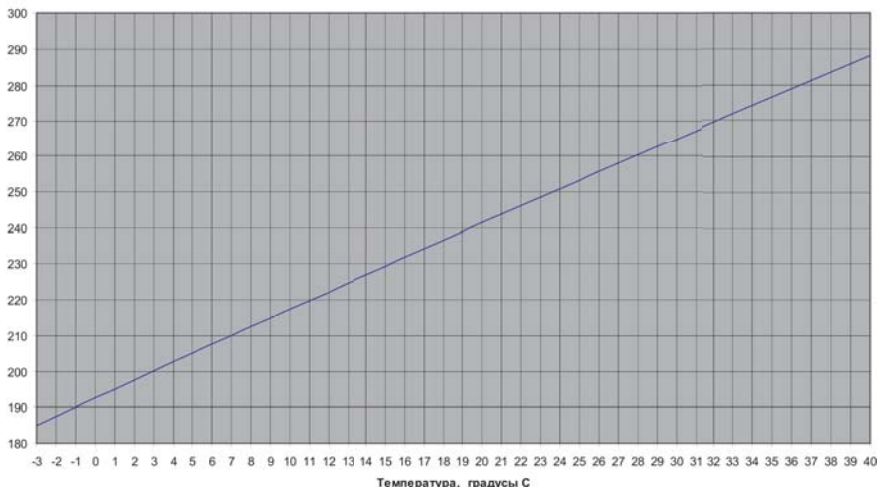


Рис. 5

Температурный фактор $f(t)$, учитывающий влияние температуры заборной воды в кингстонном ящике на коэффициент теплоотдачи

Процесс оценки эффективности теплообмена

Учитывая, что эффективная площадь теплообмена B_0 – величина постоянная и не зависящая от температуры забортной воды, а величина теплового потока при одинаковой мощности главного двигателя не меняется, можно, используя выражение (18), произвести прогнозирование температуры воды охлаждения при изменении температуры забортной воды. При этом получаем $f(t_{\text{зб1}}) \cdot \Delta t_1^{4/3} = f(t_{\text{зб2}}) \cdot \Delta t_2^{4/3}$, или

$$\Delta t_2 = [f(t_{\text{зб1}})/f(t_{\text{зб2}})]^{3/4} \cdot \Delta t_1. \quad (21)$$

Таким образом, используя выражение (21) и зная значения температурного перепада и температуры забортной воды, при испытаниях судна можно определить температурный перепад при такой же мощности главного двигателя и более высокой температуре забортной воды.

Выводы

1. Сравнительная оценка риска показывает, что при применении схемы с забортными охладителями в системах охлаждения большинство наиболее опасных событий, связанных с отказами системы забортной воды, либо полностью исключается, либо значительно уменьшается вероятность их наступления и тяжесть последствий.

2. Анализ процесса теплообмена в кингстонном ящике показывает, что какие-либо ограничения по применению забортных кингстонных охладителей для судов ледового плавания не обоснованы.

Список литературы

1. Смирнов О. Р., Юдицкий Ф. Л. Надежность судовых энергетических установок // Судостроение. – Л., 1974.
2. Hochhaus, K. - H.: Trends in ship auxiliary systems. German Marine Equipment 2000. VDMA, HANSA 9/1999, p. 34 – 38.
3. Справочник по гидравлическим расчетам / Под ред. П. Г. Киселева. – М.: Энергия, 1974. – 312 с.

УДК 629.7.067.8; 629.5.011:061.6

В.Т. Аксенов

МЕРОПРИЯТИЯ ПО ПРЕДОТВРАЩЕНИЮ ВЗРЫВОВ НА НЕФТЕНАЛИВНЫХ СУДАХ И ХИМОВОЗАХ, ПЕРЕВОЗЯЩИХ ГРУЗЫ С НИЗКОЙ ТЕМПЕРАТУРОЙ ВСПЫШКИ (О РАССМОТРЕНИИ В РАМКАХ ИМО ВОПРОСА ОБ ОБОРУДОВАНИИ ТАНКЕРОВ ДЕДВЕЙТОМ МЕНЕЕ 20 000 ТОНН СТАЦИОНАРНОЙ СИСТЕМОЙ ИНЕРТНЫХ ГАЗОВ)

В настоящее время, в связи с высокой активностью Российской Федерации в сфере нефтяного бизнеса и перспективами его дальнейшего развития в рамках программ освоения морских месторождений, вопросы безопасной транспортировки жидких углеводородов и химических веществ приобретают особую актуальность. Прежде всего, это касается нефтеналивных судов и химовозов: как новых, в проектировании и строительстве которых в последние годы наблюдается заметное оживление, так и построенных ранее, в связи с их модернизацией и расширением сферы эксплуатации.

В последние годы строительство крупнотоннажных танкеров для российских судовладельцев осуществляется, в основном, на зарубежных верфях, а именно – в Южной Корее и Китае, и – под наблюдением иностранных классификационных обществ. Однако сектор малых танкеров, дедвейтом менее 20 000 т, о которых пойдет речь далее, в России весьма значителен и имеет тенденцию к развитию. Большинство таких судов строилось и продолжает строиться на отечественных верфях и в классе Российского морского регистра судоходства. В част-

ности, в последнее время малотоннажный танкерный флот активно пополняется за счет строительства на верфях Нижнего Новгорода, Волгограда, а также в Турции серий нефтеналивных судов и химовозов новых проектов: 19619, RST22, 005RST01, 00230 и т. п.

Таким образом, мероприятия по обеспечению пожаро- и взрывобезопасности танкеров дедвейтом менее 20 000 т, рассмотрение которых осуществляется ИМО и в настоящее время близится к завершению, напрямую касаются значительной части отечественного танкерного флота и заслуживают самого пристального внимания.

Большинство взрывов и пожаров на нефтеналивных судах и химовозах, перевозящих грузы с низкой температурой вспышки, связано с воспламенением паров в грузовых танках. Одним из эффективных средств, предупреждающих такие аварии, является создание и поддержание в порожних объемах грузовых танков взрывобезопасной атмосферы, путем подачи туда в процессе приема, перевозки и выдачи груза инертного газа, вырабатываемого специальной стационарной системой инертных газов (далее – СИГ).

Назначением СИГ является решение следующих задач:

- поддержание в грузовых танках судна в любое время нахождения его в порту или в море избыточного давления и атмосферы с содержанием кислорода не более 8 %;

- обеспечение компенсации разряжения, возникающего в процессе выдачи груза, а также продувка порожних грузовых танков посредством подачи в них инертного газа, который, согласно требованиям Правил Регистра, должен иметь концентрацию кислорода не более 5 % и температуру не более 65 °С.

В соответствии с решаемыми задачами, основными элементами СИГ являются:

- источник инертного газа;

- средства транспортировки газа в грузовые танки, включающие вентиляторы или компрессоры, трубопроводы и арматуру;

- система управления и сигнализации, в которую входят, в частности, устройства газоанализа. Состав и конструкция системы определяется, в основном, видом применяемого инертного газа, в качестве которого могут использоваться газы, уходящие от судовых котлов и вспомогательного оборудования, газы, вырабатываемые специальной камерой сгорания в составе СИГ, либо азот, вырабатываемый специальным азотным генератором.

Международные требования по оборудованию нефтеналивных судов и химовозов СИГ действуют, начиная с 1984 г. В настоящее время

они регламентированы Правилами II-2/ 4.5.5.1 и II-2/ 4.5.5.2 МК СОЛАС-74 «Системы инертных газов. Применение», а также Резолюцией ИМО А.567(14) «Требования к системам инертных газов на химовозах». В соответствии с ними СИГ требуется на всех танкерах дедвейтом 20 000 т и более, а также на химовозах и газовозах, перевозящих нефтепродукты и прочие воспламеняющиеся грузы с температурой вспышки менее 60 °С.

Наряду с вышеуказанными требованиями необходимость наличия СИГ определяется МК СОЛАС-74 в зависимости от объема танков и характеристик моечных машинок, в случае если очистка грузовых танков на судне производится путем мойки сырой нефтью.

Требования ведущих классификационных обществ, включая Регистр, по оборудованию судов СИГ базируются, в основном, на вышеуказанных Правилах МК СОЛАС-74.

Существующий подход к оборудованию судов СИГ в зависимости от тоннажа танкера основывается на предположении, что больший объем танков, обуславливающий более продолжительные операции, связанные с их мойкой, а также с транспортировкой среды по трубопроводам, увеличивает вероятность образования при этом статического электричества, что может привести к искрообразованию, являющемуся потенциальным источником взрыва.

В последнее время в ИМО рассматривается вопрос о целесообразности распространения на нефтеналивные суда и химовозы дедвейтом менее 20 000 т. требования МК СОЛАС-74 о наличии СИГ. Этот ключевой вопрос находится под пристальным вниманием Комитета по безопасности на море ИМО (КБМ) и отнесен к категории высокоприоритетных со сроком завершения в 2009 г.

Рассмотрение различных аспектов данной проблемы поручено КБМ профильным Подкомитетам, входящим в его состав, а именно: по конструкции и оборудованию судов (ДЕ), по противопожарной защите (ПЗ), по наливным грузам и газовозам (НГГ), по подготовке и дипломированию моряков (СТВ), по выполнению требований ИМО государствами флага (ВТГ), с включением соответствующих пунктов в их рабочую программу и повестку очередных сессий.

В рамках деятельности Подкомитета ПЗ статус рассмотрения данного вопроса от сессии к сессии возрастает. Так, на 51 сессии 2007 г. он проходил в качестве информации в разделе «Разное»; на 52 сессии в 2008 г. ему уже было посвящено два пункта Повестки; а к следующей 53 сессии по этой проблеме будет работать специальная корреспондентская группа в межсессионный период и рабочая группа

– в период самой сессии. Вопрос вызывает повышенный интерес и широкую дискуссию при обсуждении на заседаниях.

Обращаясь к истории вопроса о взрыво- и пожаробезопасности малых танкеров, следует отметить, что впервые он был поднят в ИМО на 79 сессии КБМ в декабре 2004 г. в связи с взрывом на танкере-продуктовозе «Chassiron». Тогда было отмечено, что данный случай не является единичным и что в последнее время существует неблагоприятная статистика относительно числа аварий и человеческих жертв, связанных с взрывами и пожарами на танкерах.

КБМ запросил Администрации представить отчеты о подобных случаях. Для их рассмотрения и исследования данной проблемы в январе 2005 г. в рамках ИМО была образована Межведомственная рабочая группа – Inter-Industry Working Group (далее IIWG), состоявшая из экспертов от Международной ассоциации классификационных обществ (МАКО), Международной ассоциации портов и терминалов (IAPH), Международной палаты судоходства (ICS), Международных ассоциаций судовладельцев танкеров (INTERTANKO и IPTA), Международного форума морских нефтяных компаний (OCIMF) и страховщиков (P&I Clubs).

Для анализа IIWG были выбраны 35 характерных случаев аварий, связанных с взрывами в грузовой зоне танкеров и химовозов за период 25 лет, которые были всесторонне проанализированы по различным аспектам, таким как: особенности конструкции судов, внешние условия, особенности груза, источники возгорания, квалификация и действия персонала, наличие и качество инструкций и руководств и т. д.

Итоговый Отчет рабочей IIWG был представлен на 81 сессию КБМ в 2006 г. и содержал следующие выводы:

.1 наибольшее число аварий связано с судами дедвейтом менее 20 000 т и произошло в море. При этом под нахождением в море понималось автономное пребывание танкера как в море, так и на якоре, когда операции осуществлялись без непосредственного участия или влияния берегового персонала и технических средств;

.2 в большинстве случаев инциденты возникали в процессе мойки, вентиляции и продувки танков;

.3 в большинстве случаев применительно к аварийным танкам осуществлялась деятельность персонала. При этом отмечено, что большинство аварий связано с его некомпетентностью и не достаточной тренированностью;

.4 значительное число аварий связано с непониманием или нарушениями в выполнении установленных технологических процедур

грузовых операций, а также нестыковкой требований, содержащихся в различных руководящих документах. При этом в самих основополагающих руководствах: «Международное руководство по безопасности для нефтяных танкеров и терминалов» (ISGOTT) и «Tanker Safety Guide (Chemicals)» каких-либо нестыковок не отмечено;

.5 в большинстве случаев в период, предшествующий взрыву, отсутствовал надлежащий контроль атмосферы в танках;

.6 в большинстве случаев возгорание происходило внутри танка. При этом какого-либо преимущественного источника возгорания не было отмечено, однако в качестве наиболее вероятных были указаны следующие: операции мойки с разбрызгиванием химических веществ; пропаривание; работающие внутри танков насосы и прочие механизмы, а также искрообразование вследствие статического электричества, связанного с протеканием среды по трубопроводам;

.7 при применении СИГ инцидентов не возникало;

.8 большинство инцидентов связано с грузами, подпадающими под требования II Приложения МК МАРПОЛ 73/78 (*вредные жидкие вещества, перевозимые наливом*).

Несмотря на то, что в качестве основной причины было отмечено нарушение технологических процедур (в особенности связанных с дегазацией), IIWG особо выделила технический аспект проблемы и рекомендовала КБМ, в целях обеспечения дополнительных мер безопасности, рассмотреть вопрос о принятии поправок технического характера к МК СОЛАС-74, а именно к вышеупомянутому Правилу II-2/ 4.5.5.1, распространяющих требование о наличии СИГ на новые танкеры дедвейтом менее 20 000 т и на новые химовозы.

Применительно к существующим судам данного типа IIWG предложила решать вопрос, руководствуясь общей стратегией ИМО на период 2000-х гг. (рез. ИМО А.900(21)), включая формализованную оценку безопасности и анализ экономической целесообразности для каждого конкретного судна.

На этом вопросе, в основном, и сконцентрировано до настоящего времени внимание КБМ при рассмотрении проблемы борьбы с взрывами на танкерах.

Вопросы, связанные с деятельностью персонала, были выделены и переданы на рассмотрение специальной рабочей группе по проблемам человеческого фактора, организованной совместно КБМ и Комитетом защиты окружающей среды.

В соответствии с задачами, поставленными КБМ, уже на 51 сессии FP в феврале 2007 г. делегацией Японии был представлен официаль-

ный документ, содержащий пример анализа формализованной оценки безопасности танкеров при применении на них СИГ. Анализ основывался на данных по авариям, опубликованных в изданиях английского Ллойда «LR Fairplay» и был сделан применительно к танкерам дедвейтом более 20 000 т за период 1978–1983 гг., когда большинство танкеров не было оборудовано СИГ и за период 1990 – 2005 гг., когда, в соответствии со вступившими в силу требованиями МК СОЛАС-74, такие танкеры были оборудованы СИГ. Сравнительный анализ показал снижение риска взрывов и пожаров на 81,8 %. При этом в качестве критерия оценки безопасности фигурировала характеристика степени риска, связанная только с количеством погибших при рассматриваемых авариях людей. Показатель целесообразности определялся отношением стоимости оборудования судна СИГ (стоимость эксплуатации не учитывалась) к снижению вышеуказанной степени риска. При этом ориентировочная стоимость установки СИГ, фигурировавшая в расчетах, для танкеров дедвейтом от 8000 до 20 000 т составляла 820 000 долларов США, а для судов, дедвейтом от 4000 до 8 000 т – 440 000 долларов США. Эти цифры приблизительно соответствуют информации, полученной от фирмы занимающейся установкой данных систем в России, согласно которой стоимость оборудования СИГ с азотным генератором мембранного типа составляет от 350 000 до 460 000 ЕВРО.

При широком и продолжительном обсуждении данного вопроса в рамках повестки дня 51 сессии ПЗ был затронут широкий круг сопутствующих вопросов, связанных с данной проблемой. В частности, по мнению делегации Норвегии, поддержанному рядом делегаций, определение в качестве критерия необходимости установки СИГ тоннажа судна не вполне адекватно, и к вопросу об оборудовании судов данной системой следует подходить более дифференцировано. Определяющим было предложено считать фактор перевозимого груза, в частности, – температуру его вспышки.

Отмечая недостаточную полноту представленного Японией анализа, участники обсуждения обозначили ряд существенных аспектов, которые следует учитывать при оценке эффективности установки СИГ. Прежде всего – это особенности эксплуатации: периодичность перевозки рассматриваемых грузов, возможность использования береговых средств обеспечения безопасности грузовых операций и проч.

Было отмечено также, что при оценке экономической целесообразности установки СИГ, нельзя не учитывать убытки, связанные с ликвидацией загрязнения окружающего пространства и морской сре-

ды вследствие аварии, с возможной утерей танкера, стоимостью ремонта, компенсацией семьям погибших и т. п.

Особое внимание было обращено на тот факт что газы, используемые в рассматриваемых системах, и в частности, азот, представляют элемент риска для человеческой жизни, так как завершающая стадия мойки танков (осуществляемая на данных судах вручную) и операция освидетельствования танков перед приемом груза требуют нахождения там людей. Таким образом, существует опасность, что развитие требований МК СОЛАС-74 может явиться дополнительным источником несчастных случаев, что абсолютно недопустимо, исходя из основной задачи этой Конвенции.

Необходимость проведения вышеупомянутых операций не позволяет постоянно поддерживать в танках инертную среду, которую приходится периодически удалять в процессе бункеровки посредством вентиляции и часто – на весьма продолжительное время. В такие моменты защитные функции СИГ не реализуются, и вероятность взрыва в танке существует, в то время как номинально танкер считается оборудованным вышеупомянутым средством безопасности.

В качестве прочих отрицательных факторов отмечалось коррозионное воздействие используемых газов на конструкционные материалы судна, загрязнение груза при применении СИГ с использованием продуктов сгорания, опрессовка танков; высокая стоимость, сложность и недостаточная надежность современных СИГ, в частности, наиболее популярных в настоящее время систем с азотным генератором.

Широкий спектр поднятых на 51 сессии Подкомитета ПЗ проблем и соответствующее обращение его в КБМ побудило Комитет на своей 83 сессии в 2007 г. окончательно сформулировать и включить в рабочую программу вышеуказанного Подкомитета, в кооперации с Подкомитетами ДЕ и НГГ, пункт: «Меры по предотвращению взрывов на танкерах, перевозящих нефть и химические вещества с низкой температурой вспышки», определив его как высокоприоритетный со сроком завершения в 2009 г.

При этом на первом этапе предложено рассмотреть вопрос применительно к новым судам, а затем, в зависимости от результатов апробации, – по отношению к существующим нефтетанкерам и химовозам, перевозящим грузы с низкой температурой вспышки. Соответственно, на первом этапе приоритетным будет являться технический аспект проблемы, на втором – преимущественное значение будет приобретать экономический фактор.

В рамках рассмотрения вышеуказанного вопроса КБМ также определил Подкомитету ДЕ продолжить работу по разработке международных унифицированных требований безопасности в части конструкции и эксплуатации насосов внутри грузовых танков, работу над которыми осуществляет МАКО.

В продолжение работы по данной проблематике и в соответствии с решениями 83 сессии КБМ, на 52 сессии Подкомитета ПЗ в январе 2008 г. вопрос обеспечения взрывобезопасности танкеров рассматривался уже как самостоятельный пункт повестки и в очередной раз вызвал широкую и продолжительную дискуссию.

Делегацией Японии в виде официальной ноты была представлена новая версия анализа формализованной оценки безопасности применения на танкерах и химовозах СИГ, с учетом высказанных на 51 сессии замечаний. На этот раз анализ был сделан применительно к танкерам дедвейтом менее 20 000 т, была учтена стоимость эксплуатации СИГ и выше упомянутые возможные убытки. В основном ранее сделанные выводы получили подтверждение. На основании выполненного анализа было сделано заключение, что наибольшую целесообразность установка СИГ имеет на малых танкерах дедвейтом от 4 000 до 8 000 т.

В очередной раз Японии оппонировала делегация Норвегии, также представившая в виде нескольких нот результаты своих исследований и анализа проблемы.

Большой резонанс при обсуждении данного вопроса и в официальных документах имела озвученная на 52 сессии Подкомитета ПЗ информация, ранее представленная делегацией Швеции на 83 сессии КБМ, о несчастном случае, повлекшем гибель людей вследствие отравления углеводородными газами при работе в танках.

К моменту завершения работы последней 52 сессии Подкомитета ПЗ обозначились два основных подхода к решению вопроса об оборудовании СИГ малых танкеров и химовозов. Первый представляет делегация Японии, деятельность и результаты работы которой, в основном, не выходят за рамки, поставленной КБМ задачи: решение вопроса об оборудовании СИГ танкеров и химовозов дедвейтом менее 20 000 т. Базируясь на результатах проведенного анализа, Япония, в принципе, подтверждает целесообразность такого оборудования.

Другую точку зрения представляет Норвегия. Сущность ее подхода заключается в комплексном рассмотрении всех положений МК СОЛАС-74, относящихся к операциям в танках. При этом предлагается исходить из свойств груза, вне зависимости от возраста, разме-

ров судна, вместимости танков, характеристик моечных машинок и т. п. В этом контексте предлагается, прежде всего, устранить ограничения, содержащиеся в Правилах II-2/4.5.5.1 и II-2/4.5.5.2, определив требование об инертизации танков на нефтеналивных судах и химовозах при перевозке ими грузов с температурой вспышки менее 60 °С, а также определив, на каком этапе грузовых операций это должно осуществляться. При этом предлагается не выделять особо требование о наличии на борту СИГ как таковой, предполагая возможность использования для инертизации танков береговых средств, переносного оборудования и т. п. Что касается вопроса о распространении требований на новые и существующие суда, то его предлагается рассматривать как организационный и носящий временный характер.

Мнения прочих делегаций склонялись, в основном, в поддержку какой-либо из вышеуказанных точек зрения. При этом никем не отвергалась в принципе необходимость оборудования малых танкеров и химовозов СИГ, однако отмечалась недостаточная изученность вопроса и недостаток информации для принятия окончательного решения.

Актуальные на данный момент направления деятельности для выработки решения по рассматриваемому вопросу, определены в итоговом протоколе 52 сессии Подкомитета ПЗ следующим образом:

.1 исследовать вопрос о применении «подхода на основании свойств груза» (*property based approach*), предлагаемого Норвегией и проанализировать соответствующие разделы МК СОЛАС-74, где он может быть использован для новых танкеров;

.2 обеспечить более широкое привлечение морской индустрии с целью получения дополнительной информации, относящейся к человеческому фактору (обслуживание, мойка танков и т. д.);

.3 учитывать при расчете стоимости и экономической выгоды стоимость портовых расходов на инертизацию танков береговыми средствами;

.4 продолжить накопление данных, подтверждающих влияние СИГ на снижение количества взрывов и пожаров и, наряду с этим, на количество несчастных случаев, связанных с работой в танках;

.5 собрать более подробную информацию по перевозке грузов с низкой температурой вспышки: какие из них являются наиболее существенными в рассматриваемом вопросе, какое количество судов занимается их перевозкой и каких грузов конкретно.

Для решения этих и прочих, связанных с ними вопросов, на 53 сессии FP будет создана рабочая группа. Соответствующие предложения

предлагается направлять на рассмотрение данной рабочей группе и делегациям.

Что касается отношения к вышеизложенной проблеме со стороны Регистра, то в принципе расширение сферы применения СИГ как системы обеспечения безопасной перевозки груза отвечает основным задачам, стоящим перед классификационным обществом: обеспечение безопасной эксплуатации судов, охраны человеческой жизни и сохранности перевозимых грузов на море. Поэтому продвижение в этом направлении приветствуется при любом подходе. Очевидно, что аналогичной позиции придерживаются и другие классификационные общества-члены МАКО. Об этом можно судить по тому, что на данном этапе этот вопрос в рамках деятельности МАКО не является дискуссионным, специально не рассматривается и по нему не вырабатывается и не заявляется в ИМО какая-либо особая позиция. Проблема имеет, в основном, экономический характер, т. к. связана в перспективе с необходимостью оборудования большого количества судов весьма дорогостоящими системами. Поэтому наибольший интерес и активность при обсуждении проявляется со стороны Администраций и международных организаций, связанных с эксплуатацией многочисленного танкерного флота. Наряду с вышеупомянутыми Норвегией и Японией, основными участниками дискуссий на сессиях Подкомитета ПЗ являются Администрации Панамы, Либерии, Греции, Австралии, а также такие организации, как Международная Палата Судоходства, BIMCO и т. п.

Суммируя вышеизложенное, можно сказать, что на данный момент перспектива принятия поправок к МК СОЛАС-74, устанавливающих необходимость инертизации грузовых танков на нефтеналивных судах и химовозах дедвейтом менее 20 000 т, представляется вполне реальной. Последующие проработки будут, по всей вероятности, относиться к техническим и организационным аспектам, связанным с осуществлением этой операции.

С сожалением приходится констатировать, что в состав делегации России на последних сессиях Подкомитета ПЗ представители заинтересованных организаций не входят. Каких-либо разработок или аналитических материалов по данной тематике, отражающих интересы отечественного судоходства и промышленности, от России в ИМО не подавалось. В этой ситуации трудно предположить, что на очередной 53 сессии Подкомитета ПЗ в январе 2009 г., где данное рассмотрение планируется завершить, со стороны России будет представлена собственная концепция по рассматриваемому вопросу. Соответственно, деятельность делегации в этой части ограничится, вероятно, участи-

ем в обсуждении материалов, отражающих мнение основных участников дискуссии, упомянутых выше.

Однако, при наличии заинтересованности со стороны Российского морского бизнеса и судостроительной промышленности в каком-либо конкретном решении по вышеизложенной проблематике, в настоящее время еще возможно более активное участие в его выработке через подготовку соответствующей ноты от России для представления на 53 сессию Подкомитета ПЗ, которая состоится в Лондоне в январе 2009 г., и направление специалистов в рабочую группу.

Список литературы

1. Материалы 81 сессии КБМ:

MSC 81/8/1 «Flag State Implementation. Report of the Activities of Inter-Industry Working Group» (IMO 2006);

MSC 81/INF.8 «Flag State Implementation. Report of the Activities of Inter-Industry Working Group. Incident Review Analysis.» (IMO 2006).

2. Материалы 51 сессии Подкомитета ПЗ:

FP 51/10 «Analysis of Fire Casualty Records. Study of incidents of explosions on chemical and product tankers.(Secretariat).» (IMO 2006);

FP 51/10/1 «Analysis of Fire Casualty Records. Preliminary FSA study on application of requirement of Inert Gas System to tankers of less than 20,000 DWT. (Japan)» (IMO 2006).

3. Материалы 52 сессии Подкомитета ПЗ:

FP 52/20 «Measures to Prevent Explosions on Oil and Chemical Tankers Transporting Low-Flash Point Cargoes. Outcome of MSC 83. (Secretariat).» (IMO 2007);

FP 52/20/1 «Measures to Prevent Explosions on Oil and Chemical Tankers Transporting Low-Flash Point Cargoes. **Operational aspect of chemical tankers.** (Japan)» (IMO 2007);

FP 52/20/2 «Measures to Prevent Explosions on Oil and Chemical Tankers Transporting Low-Flash Point Cargoes. Comments on the outcome of MSC 83 and recommendation for the way forward. (Norway).» (IMO 2007);

FP 52/20/3 «Measures to Prevent Explosions on Oil and Chemical Tankers Transporting Low-Flash Point Cargoes. Comments to the FSA analysis. (Norway).» (IMO 2007);

FP 52/INF.2 «Measures to Prevent Explosions on Oil and Chemical Tankers Transporting Low-Flash Point Cargoes. Analysis of the costs and benefits of the application of requirements for inert gas systems to tankers of less than 20,000 dwt using Net CAF. (Japan).» (IMO 2007).

УДК 621.316:629.12.06.001.4

А.В. Григорьев

ЕДИНАЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ УСТАНОВКА МАЛОГО ГИДРОГРАФИЧЕСКОГО СУДНА «ВАЙГАЧ»: ОПЫТ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

В апреле 2008 г. в состав Гидрографической службы Военно-морского флота Российской Федерации вошло малое гидрографическое судно «Вайгач» проекта 19910. На этом судне впервые в истории отечественного судостроения применяется единая электроэнергетическая установка (ЕЭЭУ) с системой электродвижения переменного тока (рис. 1).



Рис. 1
Малое гидрографическое судно «Вайгач»

«Вайгач» – третье судно с таким названием в истории гидрографического флота России. Первое было построено в Петербурге на Невском судостроительном заводе в 1909 г. и находилось в эксплуатации до 1924 г. В августе 1913 г. экспедиция под командованием капитана 2-го ранга Бориса Вилькицкого в составе двух гидрографических судов «Вайгач» и «Таймыр», водоизмещением 1500 т каждый с мощностью главных машин в 1200 л.с., открыло архипелаг, названный Северная Земля. Спустя два года экспедиции на судах «Вайгач» и «Таймыр» удалось впервые в истории пройти Северным морским путем с Востока на Запад.

Второе гидрографическое судно «Вайгач» построено в 1965 г. в Польской народной республике. До 1996 г. судно выполняло работы в составе Гидрографической службы Тихоокеанского флота.

Современное судно «Вайгач» построено на Рыбинском судостроительном заводе. Проектант судна – Нижегородское конструкторское бюро «Вымпел», проектант и поставщик оборудования комплекса ЕЭУ с ГЭУ – ФГУП «ЦНИИ «Судовой электротехники и технологии» (главный конструктор – Григорьев А.В.).

Судно данного класса предназначено для выполнения гидрографических работ, обслуживания плавучих навигационных средств, доставки личного состава, горюче-смазочных материалов и продуктов питания на необорудованное побережье в места расположения маяков.

Малое гидрографическое судно «Вайгач» является однопалубным теплоходом с дизель-электрической силовой установкой, удлиненным баком, носовым расположением надстройки и жилых помещений, с машинным отделением в средней части. Рабочая палуба расположена в кормовой части и имеет грузовой трюм. Пять поперечных переборок разделяют судно на шесть отсеков (рис. 2).

Основные технические характеристики судна: наибольшая длина судна – 56,4 м; габаритная ширина – 11,2 м; осадка – 3 м; дедвейт – 190 т; максимальная скорость – 12,5 уз.; автономность плавания – 15 сут.; дальность плавания – 2000 миль.

Судно имеет ледовое усиление, позволяющее плавать в мелководном льду неарктических морей. Для предотвращения загрязнения окружающей среды корпус судна, оборудование и системы выполнены с учетом требований Международной конвенции МАРПОЛ 73/78.

Для доставки грузов на необорудованное побережье на судне находится самоходный плашкоут грузоподъемностью 5 т. Грузовые опе-

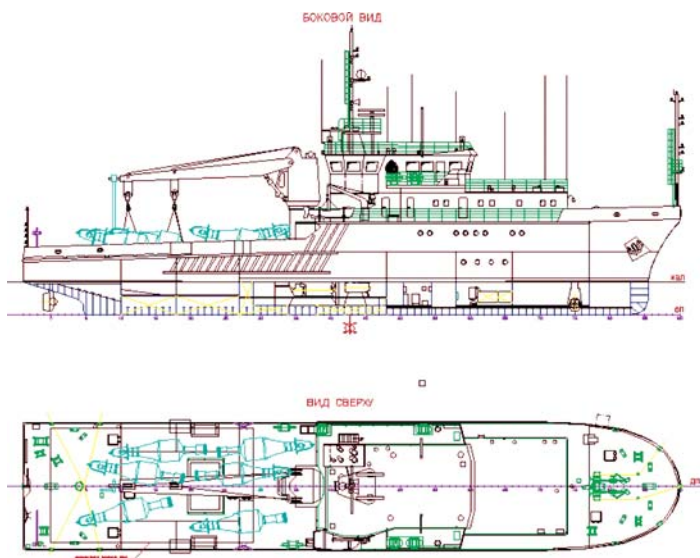


Рис. 2
Чертеж малого гидрографического судна «Вайгач»

рации выполняются с использованием электрогидравлического крана грузоподъемностью 12 т.

Несмотря на хорошо известные достоинства ЕЭУ в отечественном судостроении отсутствует опыт их проектирования и изготовления. Более того, до недавнего времени в нашей стране не было создано ни одного судна с системой электродвижения переменного тока.

Функциональная схема ЕЭУ гидрографического судна «Вайгач» представлена на рис. 2.

В состав ЕЭУ входят два главных, стояночный и аварийный дизель-генераторные агрегаты (ГДГ 1, ГДГ 2, СДГ, АДГ), полупроводниковые преобразователи частоты со звеном постоянного тока на базе автономных инверторов напряжения (ПП 1,2), асинхронные гребные электродвигатели (ГЭД 1,2), подруливающее устройство (ПУ), главный и аварийный распределительный щит (ГРЩ, АРЩ), винторулевые колонки (ВРК 1,2), трехобмоточные повышающие трансформаторы (Тр 1,2) [1].

Мощность ГЭД составляет 550 кВт, номинальная частота вращения – 1500 об/мин, номинальный ток – 387 А, мощность ГДГ – 1000 кВт.

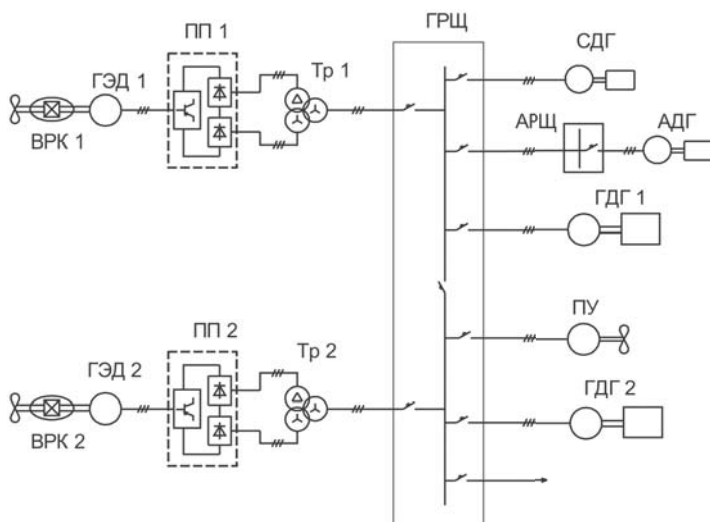


Рис. 2
ЕЭУ гидрографического судна «Вайгач»

При проектировании ЕЭУ был проведен комплексный анализ установки с целью изучения ее свойств, определения статической и динамической устойчивости, качества переходных процессов, выбора защитно-коммутационной аппаратуры. Решение данных вопросов стало возможным путем проведения аналитических расчетов и вычислительных экспериментов на компьютерных моделях, одна из которых, разработанная в среде Simulink, приведена на рис. 3.

Компьютерная модель включает в себя модель дизель-генератора (Diesel-Generator), модель трехобмоточного трансформатора (Transformer), модель ГЭД (Motor), винта (Load) и системы управления (Control).

На компьютерной модели были проведены численные эксперименты с целью определения динамических свойств установки и отладки алгоритмов системы управления полупроводниковым преобразователем. Переходный процесс пуска и остановки ГЭД, полученный путем проведения численного эксперимента на компьютерной модели, представлен на рис. 4 а [2].

Из рис. 4 а видно, что разгон ГЭД осуществляется плавно, превышение электромагнитного момента допустимой величины (110 %

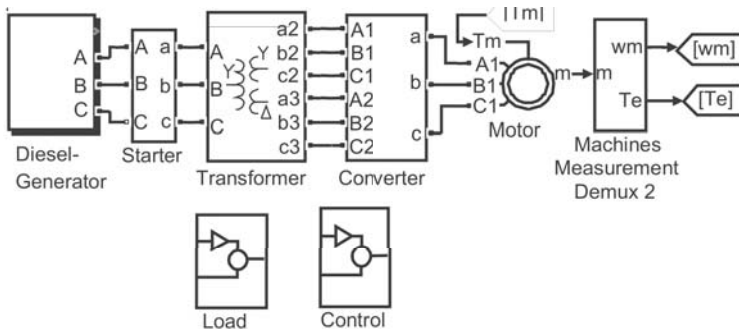


Рис. 3
Компьютерная модель ЕЭУ судна «Вайгач»

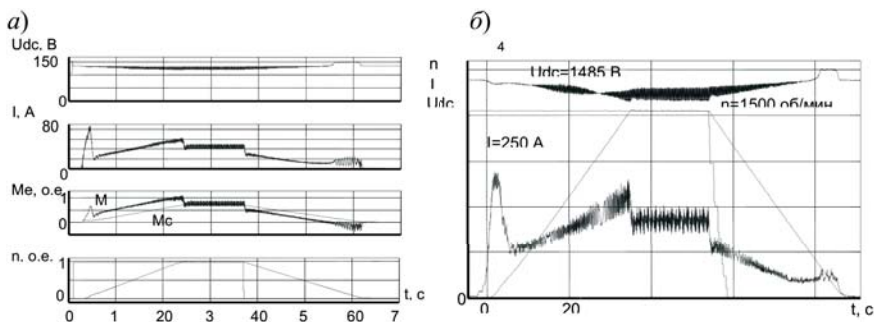


Рис. 4
Переходные процессы пуска и остановки ГЭД:
а – компьютерная модель; б – экспериментальный стенд;
 U_{dc} – напряжение в звене постоянного тока преобразователя;
 I, M_e, n – ток, электромагнитный момент и частота вращения ГЭД;
 M_c – тормозной момент на валу ГЭД

от номинального значения) не происходит. Во время торможения ГЭД переходит в генераторный режим, электроэнергия поступает на тормозные сопротивления, установленные в звене постоянного тока преобразователя.

Создание сложного электроэнергетического комплекса потребовало экспериментального подтверждения заложенных конструктивных и технических решений. С этой целью на электротехническом стенде

ФГУП «ЦНИИ СЭТ» была собрана экспериментальная установка системы электродвижения переменного тока (рис. 5).

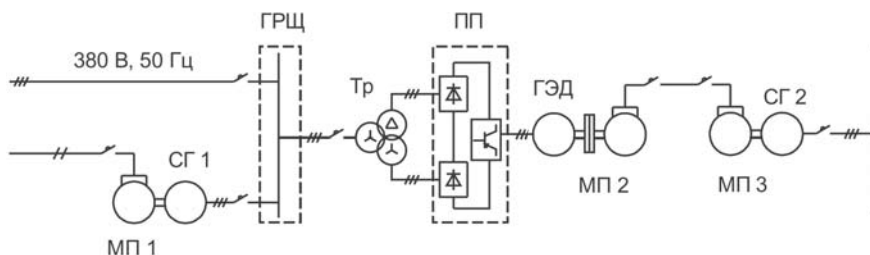


Рис. 5

Экспериментальный стенд ЕЭЭУ:

МП 1-3 – машины постоянного тока; СГ 1, 2 – синхронные генераторы

В состав экспериментальной установки входило штатное оборудование ЕЭЭУ: преобразователи частоты, трансформаторы, ГЭД. Моделирование винторулевых колонок и дизельгенератора осуществлялось с помощью оборудования электротехнического стенда [3].

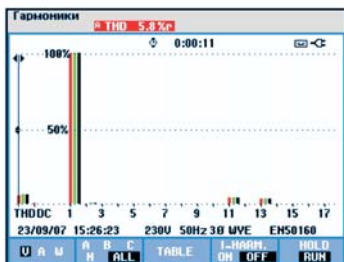
Экспериментальный стенд позволил реализовать основные эксплуатационные режимы ЕЭЭУ. Осциллограммы пуска и остановки ГЭД, полученные на стенде, приведены на рис. 4 б.

Хорошая сходимость результатов, полученных в результате проведения компьютерных экспериментов и стендовых испытаний, подтвердило адекватность разработанной модели ЕЭЭУ и правильность принятых конструкторских решений.

В течение трех месяцев гидрографическое судно «Вайгач» проходило ходовые испытания в Балтийском море. При проведении испытаний во всех установившихся режимах проверялась устойчивость единой электроэнергетической системы, измерялся коэффициент несинусоидальности напряжения судовой сети, коэффициент мощности, определялось качество переходных процессов в судовой электростанции и системе электродвижения [4].

На рис. 6 представлены результаты гармонического анализа напряжения в судовой сети и векторная диаграмма напряжений и токов для ходового режима работы судна с мощностью 80 % от номинального значения на каждом ГЭД.

а)



б)



Рис. 6

Спектральный анализ напряжения (а);
векторная диаграмма напряжений и токов (б) в судовой сети

Как показали результаты испытаний, во всех режимах эксплуатации ЕЭУ коэффициент несинусоидальности напряжения в судовой сети не превышал 8,1 %, а коэффициент мощности находится в пределах 0,86 – 0,89 (табл. 1).

Таблица 1

Результаты экспериментальных исследований ЕЭУ

Режим работы ЕЭУ	Количество работающих ГДГ	Частота вращения ГЭД, %	КНН, %	cosφ
Промер глубин	1	30	1,3–1,4	0,86
Экономичный ход	1	80	6,9–8,1	0,87
Полный ход	2	100	5,5–5,7	0,89

Переходный процесс разгона ГЭД до частоты вращения 900 об/мин представлен на рис. 8.

Разгон ГЭД до частоты вращения 60 % от номинальной величины составляет не более 8 с, что подтверждает хорошие динамические характеристики разработанной системы электродвижения переменного тока.

Ввод в эксплуатацию малого гидрографического судна «Вайгач» проекта 19910 стал началом замены устаревших гидрографических судов и катеров современными, способными более эффективно вы-

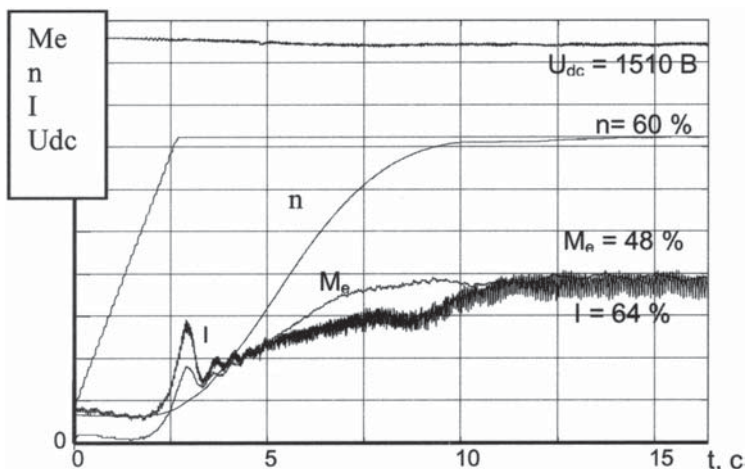


Рис. 7
Переходный процесс пуска ГЭД

полнять задачи по навигационно-гидрографическому обеспечению морских путей Российской Федерации.

Результаты ходовых испытаний ЕЭУ малого гидрографического судна «Вайгач» подтвердили высокие эксплуатационные и технические характеристики первой отечественной системы электродвижения переменного тока.

Список литературы

1. Григорьев А.В., Ляпидов К.С., Макаров Л.С. Единая электро-энергетическая установка гидрографического судна на базе системы электродвижения переменного тока. // Судостроение. – № 4. – 2006. – С. 33 – 34.
2. Григорьев А.В., Глеклер Е.А. Применение пакета визуального моделирования SIMULINK для исследования судовой электроэнергетической системы // Труды VII-ой Международной науч.-техн. конф. «Компьютерное моделирование 2007». – СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2007. – С. 103 – 107.
3. Григорьев А.В. Экспериментальные исследования системы электродвижения переменного тока с полупроводниковым преобразователем // Судостроение. – № 3. – 2007. – С. 30 – 32.
4. Григорьев А.В., Улитовский Д.И., Глеклер Е.А. Результаты ходовых испытаний единой электроэнергетической установки гидрографического судна «Вайгач» // Судостроение. – № 1. – 2008. – С. 33 – 35.

ОГРАНИЧИТЕЛИ ГРУЗОПОДЪЕМНОСТИ СУДОВЫХ КРАНОВ С МАГНИТОУПРУГИМИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ

В соответствии с требованиями Правил Российского морского регистра судоходства (РМРС) ограничители грузоподъемности (ОГП) судовых кранов должны предотвращать подъем груза, превышающего грузоподъемность на величину не более 10 %.

К ОГП предъявляются требования по обеспечению малой погрешности.

Малая погрешность обеспечивает защиту крана от опасных перегрузок и исключает ложное срабатывание ограничителей грузоподъемности.

Суммарная погрешность ОГП складывается из статической и динамической погрешностей.

Динамическая погрешность составляет основную долю ограничителя [4].

Натурные тензометрические испытания подъемно-транспортных машин свидетельствуют о том, что подавляющее большинство нагрузок являются случайными величинами или случайными процессами [1].

Случайный характер нагрузок определяется множеством причин.

Случайный характер нагрузок зависит от человека-оператора, от регулировки пусковой и тормозной аппаратуры и т. д.

Эквивалентная нагрузка на крановые механизмы при изменении технологического варианта работы крана меняется на 10 – 20 %. В зависимости от квалификации крановщика эквивалентные нагрузки меняются на 10 – 20 %.

При неудачной регулировке пусковой аппаратуры двигателей и тормозных устройств эквивалентные нагрузки могут увеличиваться по сравнению с нагрузками при нормальной регулировке в 1,2 – 2 раза.

Появление динамической погрешности связано с тем, что при различных режимах подъема одинакового груза с основания возникают различные динамические усилия в грузовых канатах, которые в той или иной мере, в зависимости от динамических свойств ОГП, передаются на его исполнительный элемент.

Динамические нагрузки при подъеме с упругого основания меньше динамических нагрузок при подъеме груза с жесткого основания.

Максимальные динамические нагрузки в канатах возникают при подъеме груза с жесткого основания с подхватом при работе двигателя на естественной механической характеристике.

Ограничители грузоподъемности должны иметь достаточное быстрое действие, предотвращающее опасные перегрузки.

Малая погрешность ограничителей грузоподъемности обеспечивает защиту крана от опасных перегрузок и исключает ложное срабатывание.

В настоящее время на судах нашли применение механические ограничители, действующие на контактную систему конечных выключателей.

Механические ограничители обычно имеют большое число подвижных элементов, что затрудняет их регулирование и не обеспечивает высокой точности и надежности в работе грузоподъемных механизмов.

Выполнение требований РМРС при использовании механических ограничителей возможно только в статическом режиме механизма подъема, т. е. при неподвижном положении поднятого груза.

Уменьшение статической и динамической погрешностей возможно при применении измерительных преобразователей, преобразующих усилие в электрическую величину.

В ГМА им. адм. С.О. Макарова разработаны ограничители грузоподъемности с магнитоупругими преобразователями, обладающие высокой точностью и надежностью [2, 3, 5, 6].

Система ограничения грузоподъемности судовых кранов

В рассматриваемой системе применяется магнитоанизотропный преобразователь, обладающий высокими надежностью и чувствительностью. Преобразователь имеет монолитный магнитопровод из легированной стали, питается от источника переменного тока с частотой 400 Гц и напряжением 6 В.

Усилие на МУП передается от грузового каната через блочно-рычажную передачу. Массе поднимаемого груза 12500 кг соответствует усилие в преобразователе, равное 20 кН.

Схема автоматической системы показана на рис. 1. Напряжение с выхода МУП поступает на фильтр нижних частот ФНЧ1, который выделяет первую гармоническую составляющую выходного напряжения

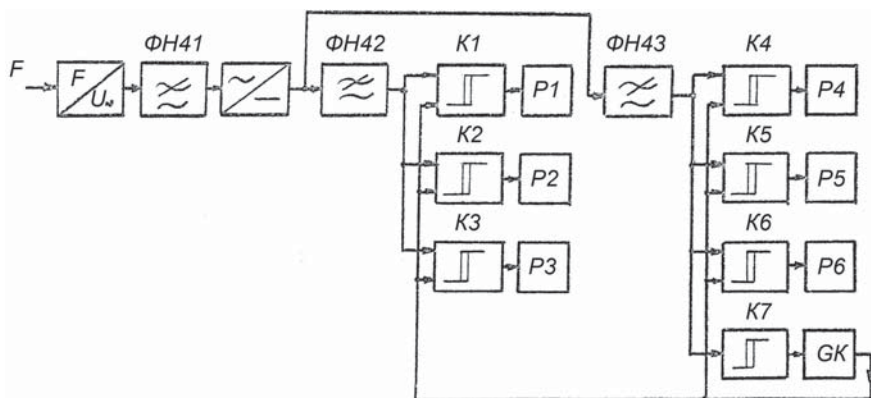


Рис. 1
Автоматическая система ограничения грузоподъемности
с магнитоупругим преобразователем

преобразователя. С выхода ФНЧ1 напряжение поступает на двухполупериодный выпрямитель В, с которого подается на два фильтра нижних частот ФНЧ2 и ФНЧ3. Фильтр ФНЧ2 имеет частоту среза 0,1 Гц и служит для выделения напряжения, пропорционального среднему значению усилия в магнитопроводе. Фильтр ФНЧ3 имеет частоту среза 10 Гц и служит для выделения напряжения, пропорционального мгновенному значению усилия в магнитопроводе МУП. С ФНЧ2 напряжение поступает на компараторы К1–К3. Компараторы изменяют свое состояние в том случае, когда усилие в преобразователе превысит заданное значение. Уставка компараторов зависит от вылета стрелы крана. Уставка К1 соответствует 22 кН, К2 – 1,39 кН, К3 – 0,56 кН. Компараторы К1–К3 управляют электромагнитными реле Р1–Р3. При усилии в преобразователе, не превышающем заданных значений, к реле подается питание. Изменение состояния компараторов приводит к обесточиванию реле.

С ФНЧ3 напряжение поступает на компараторы К4–К6. Компараторы изменяют свое состояние в том случае, когда мгновенные значения усилия в преобразователе превысят заданные значения. Уставка компараторов К4–К6 также зависит от вылета стрелы крана. Уставка К4 соответствует 25 кН, К5 – 1,57 кН, К6 – 0,64 кН. Компараторы К4–К6 управляют реле Р4–Р6. При усилии в преобразователе, не превышающем заданных мгновенных значений, к реле Р4–Р6 подается питание.

Изменение состояния компараторов приводит к обесточиванию реле. Состояние реле Р1–Р6 контролируется с помощью светодиодов, подключенных параллельно обмоткам. Реле Р1–Р6 коммутируют цепи в схемах электроприводов подъема груза и вылета стрелы.

Уставки компараторов К1–К3 соответствуют 110 % допустимого значения усилия в преобразователе при соответствующем вылете стрелы, а уставка компараторов К4–К6–125 %. Ограничение грузоподъемности крана на двух уровнях (ПО и 125 %) связано с тем, что при работе крана возможны такие режимы, когда фактическая масса поднимаемого груза меньше предельно допустимой для данного вылета стрелы, но в то же время в тросе возникают динамические перегрузки, превышающие допустимый для них предельный уровень (125 %). В системе предусмотрена возможность изменения уставки компараторов К1–К6 в пределах 0,75–1,25 заданных значений.

При отсутствии динамических нагрузок на датчике сигналы с ФНЧ2 и ФНЧ3 одинаковы. Если к преобразователю не приложено усилие, напряжения с ФНЧ2 и ФНЧ3 равны 1 В, при усилии в 25 кН – 6 В. Напряжение с выхода МУП соответственно изменяется от 150 до 700 мВ.

В системе имеется защитное устройство, осуществляющее контроль исправной работы преобразователя и схемы обработки его сигнала. В защитное устройство входит компаратор К7 и бесконтактный ключ БК. При исправной работе преобразователя и схемы на вход компаратора К7 с ФНЧ3 подается напряжение постоянного тока, значение которого изменяется от 1 до 6 В в зависимости от усилия на МУП. При этом компаратор К7 находится в таком состоянии, когда БК закрыт и не оказывает влияния на работу компараторов К1–К6. В случае обрыва или короткого замыкания любой обмотки преобразователя, неисправности в схеме напряжение на входе компаратора К7 уменьшается до 100 мВ, что приводит к изменению его состояния и открытию БК. При закрытом ключе напряжения уставок компараторов К1–К6 больше нуля. Открытие ключа вызывает изменение их знака, и они становятся меньше нуля, что приводит к изменению состояния компараторов К1–К6, независимо от значений их входных сигналов и обесточиванию реле Р1–Р6.

Ограничитель грузоподъемности с магнитоанізотропним преобразователем и КИХ фільтром

На рис. 2 представлена функциональная схема предлагаемого устройства. Ограничитель грузоподъемности содержит магнитоупру-

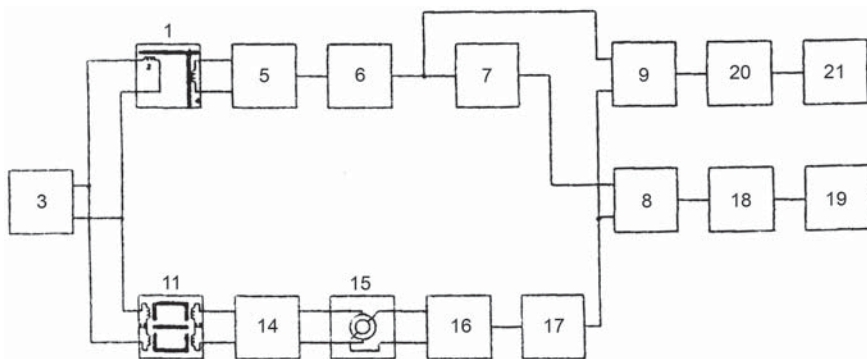


Рис. 2
Ограничитель грузоподъемности
с магнитоанизотропным преобразователем и КИХ фильтром

гий датчик 1, обмотка которого 2 подключена к источнику 3 переменного напряжения, а обмотка 4 через блок 5 фильтров, выпрямитель 6 и фильтр с конечной импульсной характеристикой 7 подключена к одному входу блока 8 перемножения сигналов. Обмотка 4 также подключена через блок 5 и выпрямитель 6 к одному входу блока 9 перемножения сигналов. Магнитопровод 10 датчика 1 подвергается силовому воздействию нагружаемого элемента конструкции крана. Индукционный трансформаторный датчик 11 длины стрелы обмотками 12 подключен к источнику переменного напряжения 3. Обмотки 13 датчика 11 через блок фильтров 14 связаны со статорной обмоткой трансформаторного датчика 15 угла наклона стрелы. Роторная обмотка поворотного трансформатора датчика 15 через выпрямитель 16 и блок 17 фильтров нижних частот подключена ко второму входу блока 8 и ко второму входу блока 9. Выход блока 8 подключен к одному входу компаратора 18, другой вход которого соединен с задатчиком грузового момента (не показан), а выход – с входом порогового элемента 19, выход которого включен в цепь управления краном. Выход блока 9 соединен с одним из входов компаратора 20, другой вход которого подключен к задатчику предельно допустимого мгновенного значения грузового момента, а выход с входом порогового элемента 21, выход которого включен в схему управления краном.

Сигнал датчика 1 нагрузки поступает в блок фильтров 5, который настроен на частоту источника переменного напряжения 3, и затем,

после выпрямления, на один вход блока 9 перемножения сигналов в канале измерения мгновенного значения нагрузки и на вход фильтра 7 с конечной импульсной характеристикой, который осуществляет быстрое усреднение сигнала. С выхода фильтра 7 сигнал поступает на один вход блока 8 перемножения сигналов. Амплитуда выходного сигнала датчика 11 длины стрелы зависит от длины последней. Через блок фильтров 14 сигнал, освобожденный от высших гармоник, поступает на статорную обмотку трансформаторного датчика 15 угла наклона стрелы, с выхода которого, после выпрямления и фильтрации нижних частот сигнал поступает на другие входы блоков 8 и 9. С выхода блока 8 сигнал, пропорциональный грузовому моменту, поступает в компаратор 18, где он сравнивается с допустимым сигналом и по результату сравнения пороговый элемент 19 подает сигнал в схему управления краном. С выхода блока 9 сигнал, пропорциональный мгновенному значению грузового момента, поступает в компаратор 20, где он сравнивается с допустимым сигналом и по результату сравнения пороговый элемент 21 подает сигнал в схему управления краном.

Данное устройство позволяет определить вес поднимаемого груза с погрешностью не более одного процента за один период колебаний в системе «груз – подъемный механизм», что значительно уменьшает время срабатывания ограничителя грузоподъемности с одновременным увеличением его точности, а также защищает грузоподъемный кран от перегрузки по мгновенному значению грузового момента.

Список литературы

1. Брауде В. И. Вероятностные методы расчета грузоподъемных машин. – Л.: Машиностроение, 1978. – 232 с.
2. Жадобин Н. Е., Галактионов А. Б., Смирнов В. А., Цырульников Б. Н. Авторское свидетельство № 1477667. 8 января 1983.
3. Жадобин Н. Е., Крылов А. П., Викулин В. В. Патент на изобретение № 2179146. 24.08.1999.
4. Лобов Н. А. Динамика грузоподъемных кранов. – М.: Машиностроение, 1987. – 160 с.
5. Жадобин Н. Е. Магнитоупругие преобразователи в судовой автоматике. – Л.: Судостроение, 1985. – 56 с.
6. Жадобин Н. Е., Крылов А. П., Малышев В. А. Элементы и функциональные устройства судовой автоматике. – СПб.: Элмор, 1988. – 440 с.

О ВЫБОРЕ ОСНОВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ И ИХ ПАРАМЕТРОВ ГРЕБНЫХ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК

В настоящее время начался подъем строительства судов с гребными электроустановками (ГЭУ), причем, наряду с ледоколами, ГЭУ будут применены на ряде серий транспортных судов ледового плавания, включая суда с винторулевыми колонками (ВРК), а также на судах рыбопромыслового флота.

Предстоит модернизация ряда ГЭУ с заменой главных электромашин (ЭМ).

Поэтому именно сейчас важно учесть опыт эксплуатации ГЭУ предыдущего поколения электроходов и ошибки, допущенные при их проектировании и постройке.

Система электродвижения судна должна отвечать всем требованиям Международного кодекса по управлению безопасной эксплуатацией судов (МКУБ ИМО).

Вместе с тем опыт эксплуатации ГЭУ ряда судов показывает [1], что в этом плане имеются вопросы, требующие решения, причем в основном расходы, необходимые на восстановление штатного состояния ГЭУ после аварийного случая, относились к ЭМ.

Анализ материалов многолетней эксплуатации ЭМ ГЭУ показал, что при выполнении основных правил их эксплуатации, исключении нештатных колебательных режимов, аварийные ситуации, связанные с ЭМ, в основном определялись состоянием их изоляции.

При этом основными причинами были: ошибки, допущенные при определении расчетного времени наработки ЭМ, несовершенство систем охлаждения (СО) и систем контроля, существенные упрощения и неточности, допущенные при тепловых расчетах ЭМ. Имело место множество случаев ускоренного старения изоляции ЭМ, причем основным фактором, снижающим срок службы изоляции и соответственно самой ЭМ, был нагрев.

Убытки, связанные с заменой изоляции, с учетом вывода судна из эксплуатации (до 10 месяцев) и сопутствующих работ, обычно существенно превышали стоимость самих ЭМ.

Поэтому расчетный ресурс наработки $T_{\text{расч}}$ ЭМ ГЭУ нужно выбрать таким, чтобы ЭМ отработала без демонтажа в течение всего нормативного срока эксплуатации судна, т. е. значение $T_{\text{расч}}$ должно быть больше статистического времени наработки ЭМ. Последнее может быть определено (например, для конкретной серии судов) расчетным путем по материалам эксплуатации. Это особенно важно выполнить в ГЭУ с ВРК, где гребной электродвигатель (ГЭД) расположен в капсуле, поскольку для демонтажа потребуется дорогостоящее докование судна.

Меры, необходимые для выполнения поставленной задачи, могут быть обоснованы нижеследующими соображениями.

В основном это сводится к усовершенствованию расчетов и конструктивных решений СО ЭМ.

Зависимость срока службы T изоляции ЭМ от температуры θ по Монтзингеру определяется выражением:

$$\lg T = A + B/273 + \theta, \quad (1)$$

где A, B – постоянные величины.

Для ЭМ ГЭУ представляет интерес степень изменения T при изменении θ в сравнительно узком диапазоне (порядка 10°C).

Тогда в соответствии с исследованиями Монтзингера:

$$T = T_0 \cdot 2, \quad (2)$$

где T_0 – срок службы изоляции при неизменной температуре $\theta = 0^\circ\text{C}$, лет;
 $\Delta\theta$ – постоянная величина приращения θ , при которой T уменьшается вдвое.

Поскольку сложно учесть все факторы, влияющие на старение изоляции, при расчетах можно принимать усредненное значение величины $\Delta\theta$. Для класса изоляции «В» величина $\Delta\theta = 10^\circ\text{C}$, а для перспективного класса изоляции «F» $\Delta\theta = 12^\circ\text{C}$.

После некоторых преобразований соотношения (1), (2) могут быть приведены к следующему виду:

$$T = T_0 e^{-k}, \quad (3)$$

где e – основание натуральных логарифмов;
 k – постоянный коэффициент, соответствующий классу изоляции.

По соотношениям (1) и (3) может быть определено значение $T_{\text{расч}}$. Как следует из выражения (3), основными мерами для обеспечения

работоспособности изоляции в течение требуемого времени являются: выбор класса изоляции (уже обычно применяется) и ограничение величины θ на допустимом уровне посредством СО.

В настоящее время в новых ЭМ и при замене изоляции уже обычно применяется изоляция класса «F», что можно считать оправданным. Рекомендовать в ЭМ ГЭУ применение изоляции класса «H» нельзя, поскольку при этом существенно осложняется эксплуатация машин.

Таким образом, возможности повышения надежности изоляции ЭМ за счет выбора класса изоляции практически исчерпаны.

Следовательно, в мощных ЭМ указанные выше задачи могут решаться при заданной, требуемой нагрузке, путем снижения величины θ , т. е. посредством соответствующего конструктивного совершенствования СО и ее параметров.

При этом нужно обратить внимание на необходимость уточнения расчетов при выборе СО, в том числе касающихся определения мощности отводимых ими потерь. Проведенные для ряда мощных ЭМ расчеты показали, что из всех потерь, определяющих нагрев ЭМ и соответственно являющихся основой для тепловых расчетов, наибольшую величину имеют электрические потери. Поэтому их расчет должен быть проведен без значительных допущений.

Это относится к расчету потерь в щеточных переходах $P_{щ}$, при проведении которых обычно принимается, что падение напряжения в щеточном переходе не зависит от тока и равно 2В.

Однако исследования, проведенные в ГЭУ и на лабораторном стенде, показали, что это напряжение может достигать до 3,5 В и имеет нелинейную зависимость от тока. Кроме того, величина $P_{щ}$ может быть соизмерима с остальными потерями и может зависеть от других факторов, например, от выбора щеток. Поэтому при расчете СО величина $P_{щ}$ должна быть определена на основе реальных исходных данных.

На эксплуатируемых мощных ЭМ электроходов применены три вида СО: разомкнутая, замкнутая и комбинированная. Последняя – наиболее сложная и дорогостоящая. В замкнутых СО требуются обязательно воздушно-водяные воздухоохладители (ВО), что увеличивает трудозатраты на их эксплуатацию и стоимость СО, а также снижает надежность установок (по причине ВО был ряд аварий в ГЭУ с выходом из строя главных генераторов). Поэтому практически даже в комбинированных СО используются варианты разомкнутых систем.

Опыт эксплуатации крупных ЭМ показал, что на срок службы изоляции существенно негативно влияют колебания температуры на входе СО.

Для судовых условий колебания наружного воздуха – явление обычное. Как показали испытания ГЭУ температура воздуха на входе в воздухоохладительный тракт СО ЭМ может зависеть даже от периодического изменения курса судна.

Поэтому можно рекомендовать применение разомкнутых СО, причем имеющих возможность автоматического поддержания квазипостоянства температуры входящего в СО охлаждающего воздуха (за счет смешивания двух потоков воздуха: забортного и из машинного отделения). Диапазон допустимого изменения температуры входящего в СО воздуха должен определяться в каждом случае расчетным путем.

В СО мощных ЭМ ГЭУ должны быть исключены зоны встречных потоков нагретого воздуха (что имело место даже в таких ЭМ, как синхронные генераторы типа ТК-9 мощностью по 9 МВт) во избежание местного ускоренного теплового старения изоляции ЭМ.

При постройке и модернизации ГЭУ одной из основных задач является выбор типа ГЭУ и главных ЭМ. На данном этапе перспективными являются ГЭУ переменного тока с частотным регулированием с синхронными или асинхронными ГЭД (СГЭД или АГЭД).

Практический интерес представляет сравнение этих двух вариантов и выбор основных параметров ГЭД. Проведенные проработки позволяют сформулировать некоторые выводы по этому вопросу.

При одних и тех же основных паспортных данных у синхронных машин (СМ) выше КПД, больше воздушный зазор. У СМ имеется возможность выполнения условия $\cos\varphi=1$.

Наиболее существенным, в плане применения в ГЭУ, недостатком АГЭД является меньший воздушный зазор, что может неблагоприятно сказаться в ходе его эксплуатации (например, при незначительном увеличении неравномерности воздушного зазора может усилиться виброактивность АГЭД). Расчеты показали, что повышение воздушного зазора АГЭД приводит к существенному снижению КПД и $\cos\varphi$ машины.

На основе проведенных расчетов и данных эксплуатации л/к «Вайгач» есть основания отдать предпочтение синхронным ГЭД.

На основании ряда проведенных расчетов СГЭД различных мощностей необходимо отметить следующее. С увеличением напряжения якоря уменьшаются расход меди и электрические потери якоря, но увеличиваются индуктивное сопротивление якоря и потери в стали. При этом желаемого повышения КПД может и не быть, напротив, в некоторой степени может произойти понижение КПД.

Изменения напряжения якоря могут не повлиять существенно на габариты и массу СМ.

Опыт эксплуатации промышленных высоковольтных электроустановок показывает, что обслуживающий персонал должен пройти дополнительную подготовку и сертификацию, так как эксплуатация такого оборудования сложнее.

Из проведенных расчетов также следует, что зависимость массы, габаритных размеров от частоты имеют существенно нелинейный характер и их минимальные, наилучшие значения для каждого случая могут быть свои.

Из указанного следует, что определение окончательных значений напряжения и частоты СМ целесообразно производить путем решения многовариантной задачи с учетом всего комплекса показателей (в первую очередь КПД, массы, габаритов, условий размещения СМ).

Из двух видов преобразователей частоты (ПЧ): непосредственно-го ПЧ (НПЧ) и ПЧ со звеном постоянного тока, которые можно использовать для питания СГЭД, предпочтение может быть отдано ПЧ со звеном ПТ, поскольку в этом случае можно применять СГЭД с паспортной частотой 50 Гц (т. е. общепромышленной). Кроме того, в этом случае некоторый выигрыш можно получить по КПД ГЭУ в целом и массогабаритным показателем СГЭД.

Список литературы

1. С ю б а е в М. А., Х а й к и н А. Б., Ш е и н ц е в Е. А. Аварии и неисправности в судовых электроустановках. – Л.: Судостроение, 1980.
2. С ю б а е в М. А. Аварийность в судовых электроустановках и меры по ее снижению // Учебное пособие. – М.: Мортехинформреклама, 1998.

УДК 621.39

А.Н. Пивоваров, В.Г. Михайлов

ЭТАПЫ РАЗВИТИЯ СУДОВЫХ ОХРАННЫХ СИСТЕМ

В соответствии с положениями федерального закона № 16 «О транспортной безопасности», разрабатываемыми подзаконными актами, материалами 4-ой Международной конференции-семинара «Актуальные вопросы внедрения национальных и международных требований по морской и речной безопасности», международными документами (гл. 11, СОЛАС–74, Международный кодекс по охране судов и портовых средств и др.) международное морское сообщество принимает адекватные меры противодействия террористическим актам и другим незаконным актам вмешательства в деятельность транспортно-технологического комплекса, особенно в части обеспечения морской безопасности судов. В настоящее время обеспечение указанной безопасности базируется на трех основных элементах:

.1 организационно-административная документация (оценка охраны судов, планы охраны судов);

.2 комплекс технических средств охраны (КТСО), включающий в себя подсистемы обнаружения (охранная сигнализация), контроля и управления доступом, телевизионного видеонаблюдения, связи, питания и освещения;

.3 персонал охраны (на судне это, прежде всего, вахтенная служба, офицер по безопасности и члены экипажа, имеющие обязанности по охране).

Учитывая размерения современных судов, когда их длина составляет 90 – 120 м и более (для крупнотоннажных судов 200 – 250 м и более), а ширина 12 – 15 м и более, наличие многоярусных надстроек, различных конструктивных элементов, блокирующих секто-

ры наблюдения, и малочисленность экипажей (обычно не более 15 – 20 чел.), становятся понятными большие трудности в обеспечении должного качества охраны судна. В рамках указанной охраны необходимо обеспечить контроль верхней палубы, участков ограниченного доступа, водной акватории. Особенно сложным является обеспечение охраны при стоянке возле причала, когда в штурманской рубке вахты как таковой нет, а фактически все наблюдение за обстановкой обеспечивается вахтенным у трапа и вахтенным помощником капитана. Естественно, такое наблюдение ведется практически лишь за одним бортом, а борт, обращенный к морю, и водная акватория остаются вне поля зрения вахтенной службы. В таких условиях лишь использование технических средств охраны (ТСО) является единственным инструментом, резко расширяющим возможности вахтенной службы.

Проектирование КТСО базируется на анализе уязвимых мест судна, возможных точек нелегального доступа, анализе вероятных угроз с учетом как района плавания, так и характера перевозимого груза. При этом оценивается возможный ущерб от актов незаконного вмешательства в части политического, экономического, людского, экологического и других видов потерь.

Обычно в рамках проектирования решаются задачи защиты объекта на прилегающей к нему площади, на уровне периметра, в пределах здания, конкретного помещения и, наконец, конкретного элемента (например, сейфа, средства связи и др.). Для судна в этой трактовке необходим контроль водной поверхности, палубы и участков ограниченного доступа, включая входы в надстройки. Следовательно, верхняя палуба с фальшбортами – это периметральная часть объекта, входы в надстройки и служебные помещения – эквивалентны входам в здания береговых объектов. Выбор ТСО производится с учетом зоны охраны извещателей, надежности, модульности построения системы, ее живучести, вероятности обнаружения нарушителя, стоимости, возможности адаптации к изменяющимся условиям.

После проектирования следуют этапы реализации проектных решений:

- поставка материалов и оборудования в соответствии со спецификацией проекта;
- выполнение строительно-монтажных работ (СМР);
- выполнение пуско-наладочных работ (ПНР);
- подготовка специалистов заказчика к обслуживанию КТСО;
- сдача системы в эксплуатацию;

эксплуатация системы в течение гарантийного срока и после его окончания.

Порядок выполнения этих работ, контроль их выполнения осуществляется с учетом требований Российского морского регистра судоходства (РМРС). При этом СМР и ПНР должны выполнять одобренные РМРС организации.

С учетом высокой степени насыщенности современного судна электрическим и электронным оборудованием, при согласовании проектной документации на установку охранных систем рекомендуется обращать внимание на базовые принципы обеспечения электромагнитной совместимости оборудования с целью исключения (минимизации) взаимного влияния на работоспособность судового электрического и электронного оборудования.

Процедуры реализации технологических операций СМР и ПНР заключаются в проведении подготовительных работ (разметке трасс и прокладке кабельной сети, креплении кронштейнов, корпусов оборудования, пробивке отверстий, установке закладных элементов, подключении оборудования к сети и электрическом соединении блоков аппаратуры) и пусконаладке, когда производится всесторонняя проверка параметров аппаратуры в соответствии с техническими описаниями заводов-изготовителей, проверяются все режимы работы, имитируются нарушители и фиксируются реакции на них ТСО.

Режимы работы системы включают в себя:

- 1 – дежурный, когда объекты взяты под охрану, состояние нормы;
- 2 – зоны объекта сняты с охраны и оборудование выключено, но его работоспособность не контролируется;
- 3 – зоны объекта сняты с охраны, но шлейфы и аппаратура работоспособны и при необходимости могут быть поставлены на охрану;
- 4 – зоны объекта частично сняты с охраны и оборудование включено;
- 5 – тревога, когда по одному, либо нескольким шлейфам или радиоканалам формируется определенное извещение;
- 6 – тревога под принуждением, когда преступник насильственно заставляет авторизованное лицо снять оборудование с охраны;
- 7 – программирование, когда выставляются определенные параметры аппаратуры (например, коды, задержки на вход и выход из помещения, длительности сигналов тревоги, состояние выходов на пульты централизованного наблюдения, и т. д.);
- 8 – тревога при несанкционированном вскрытии корпусов элементов КТСО;

9 – тестирование – контроль состояния питания, основного и резервного (от аккумуляторов и батарей), в том числе проверка автоматического перехода на резервное питание при потере напряжения питающей сети, имитация тревоги по шлейфам (радиоканалам) с проверкой также выносных и встроенных оповещателей.

В некоторых образцах радиоканальных ТСО в дежурном режиме предусматривается контроль состояния канала, а также автоматическая адаптация параметров аппаратуры к изменившимся условиям.

По трудоемкости и стоимости СМР превалируют над ПНР, а в общем временном цикле построения КТСО эти работы могут составлять до 70 – 80 % и более, особенно при больших длинах кабельных прокладок. Стоимость собственно оборудования может составлять 30 – 50 % и более (в зависимости от типа и соотношения длин кабельных прокладок) от суммарной стоимости СМР и ПНР.

По завершении указанных работ составляется двусторонний акт (заказчика и исполнителя) о вводе системы в эксплуатацию с приложением регламентированных документов таких как,

ведомость смонтированного оборудования;

акты о завершении СМР и ПНР;

результаты замеров сопротивлений изоляции, сопротивлений шлейфов и т. д.

Далее наступает период эксплуатации, до начала которого исполнителем работ может быть проведено обучение персонала заказчика, но этот процесс может и отсутствовать. Эксплуатация делится на два этапа: гарантийный и послегарантийный. В первом случае исполнитель работ и завод-изготовитель несут ответственность за некачественную работу ТСО в течение гарантийного срока и обязаны устранять неисправности, либо заменять вышедшие из строя изделия на новые. Гарантийные сроки на СМР составляют не менее 1 года, на оборудование – от 3 до 5 лет. Например, фирма «Аргус-Спектр» дает гарантию на большинство видов ТСО 5 лет, завод «Сибирский арсенал» – 3 года (в частности, приемно-контрольный прибор «Гранит»).

Послегарантийное обслуживание возможно осуществлять двумя способами:

силами самой организации-заказчика;

силами привлеченного для этой цели сервисного центра, либо спецподразделения вневедомственной охраны.

Этапы развития КТС представлены алгоритмически на рис. 1.

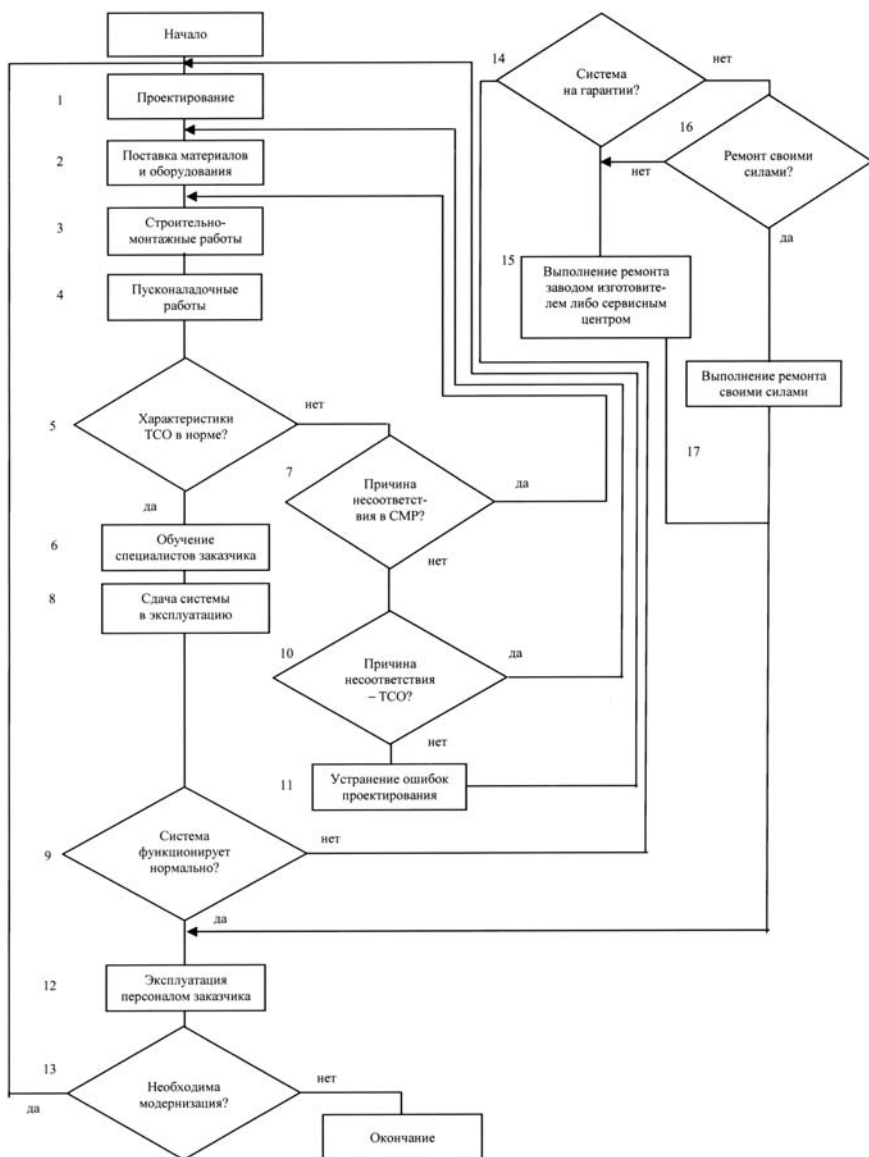


Рис. 1
Этапы развития КТСО

Список литературы

1. Пивоваров А.Н., Левчук С.А., Мещеряков А.В. Периметральные охранные системы береговых и морских объектов в рамках Кодекса ОСПС. – СПб.: изд-е СПбГУ, 2008 г. – 147 с.

НЕГАТИВНОЕ ВЛИЯНИЕ СЛОЖНЫХ ПОГОДНЫХ УСЛОВИЙ НА РАБОТУ РЛС НА ТРАССЕ СЕВЕРНОГО МОРСКОГО ПУТИ

Уязвимость радиолокационных средств специалистам в области радиолокации хорошо известна. Судовые S-радары обладают большей помехозащищенностью при наличии дождя, чем X-радары, а K-радары, которые широко используются как береговые РЛС, при отрицательном влиянии дождя имеют меньшую помехозащищенность, чем X-радары.

На трассе Северного морского пути негативное воздействие на работу РЛС оказывают туманы и снежные метели. В Карском море туманы наблюдаются в течение 30...70 % дней в году, в море Лаптевых – 40 %. Продолжительность туманов в среднем составляет 6...8 часов, а в 1...3 % случаев достигает 2 суток. Поперечник области с туманом составляет 70...100 миль, а в 20 % случаев захватывает все море. Вертикальная мощность туманов в Арктике в среднем – 250 м. Наиболее часто появляются туманы с дальностью видимости 150 м, сплошные туманы с дальностью видимости менее 50 м отмечаются в 8 % случаев.

Частицы тумана представляют собой шаровидные капли радиусом 2...20 мкм числом 50...600 × 1 см³.

Твердые осадки: снег, снежная крупа, град в Норвежском и Беринговых морях выпадают 150 дней в году, в Северном море – 200 дней в году. На рис. 1 приведены графики погонного поглощения мощности зондирующих сигналов РЛС при наличии дождя и тумана различной интенсивности для разных длин волн. Падающий сухой снег приводит к погонному поглощению $0,3 \delta_o$, а мокрый снег – $5 \delta_o$, где δ_o – погонное поглощение при дожде с заданной интенсивностью.

Ниже приводится оценка негативного влияния туманов и снежных метелей на работу различных типов РЛС. Отрицательное воздействие осадков проявляется двояко: уменьшается дальность действия РЛС из-за большего поглощения зондирующих сигналов РЛС и возрастает уровень шумов на входе приемника РЛС из-за отражений зондирующих сигналов от гидрометеоров.

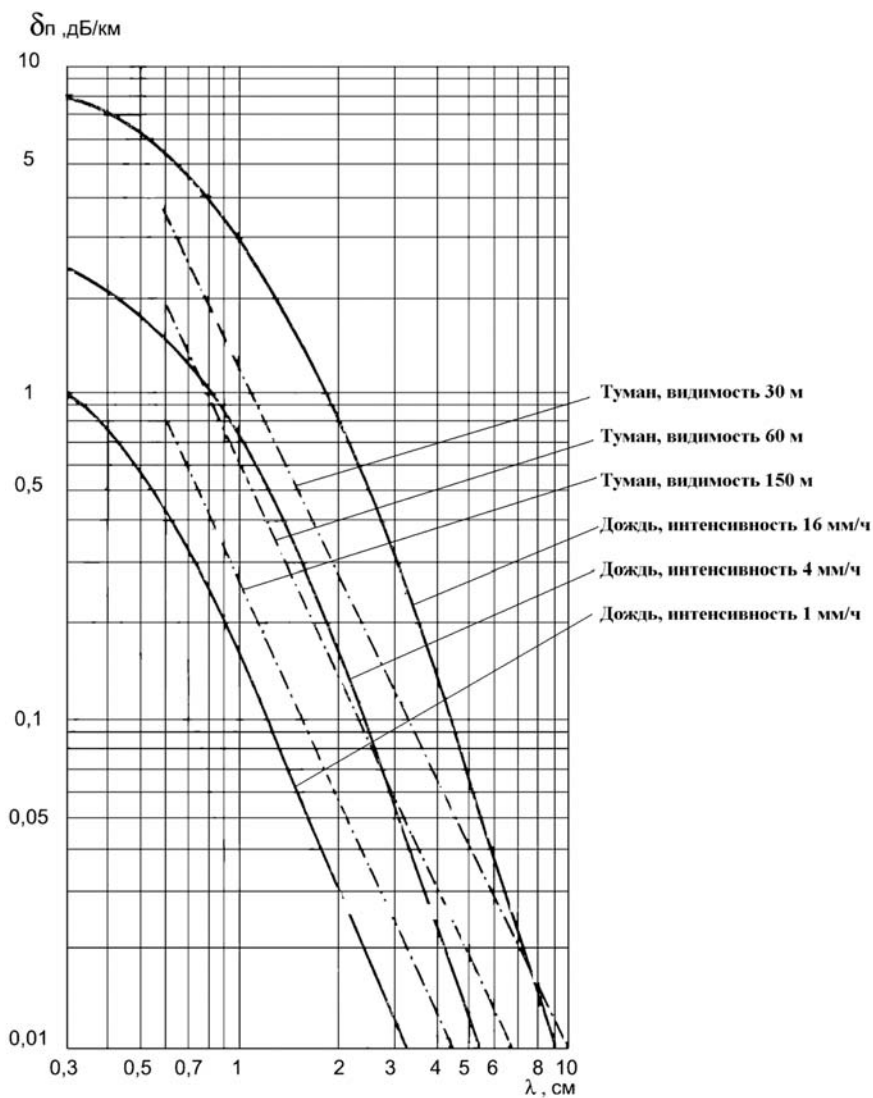


Рис. 1

На рис. 2 приведены зависимости $D_{\text{max, гм}} = f(D_{\text{max}})$ при различных поглощениях $\delta_{\text{о}}$, где D_{max} – дальность действия РЛС при отсутствии в

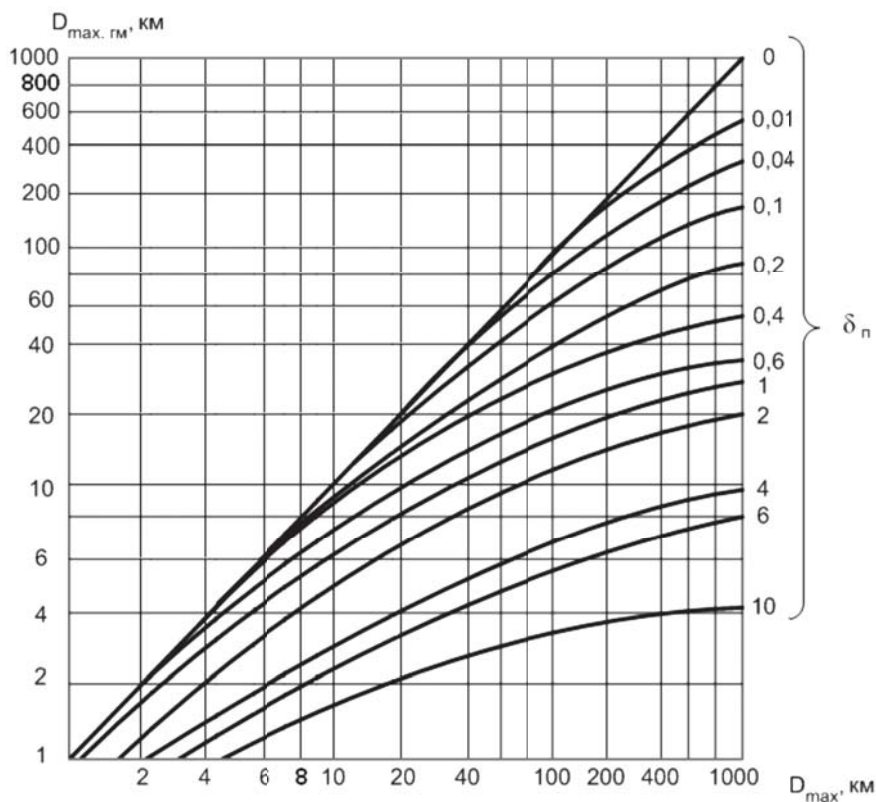


Рис. 2

атмосфере Земли гидрометеоров; $D_{\max, \text{км}}$ – дальность действия при наличии гидрометеоров. С помощью графиков рис. 1 и рис. 2 построена табл. 1, характеризующая для разных типов РЛС уменьшение дальности при тумане различной интенсивности и при снежных метелях: сухой и мокрый падающий снег.

Таблица 1

$D_{\max}$, км	S-радар ($\lambda = 10$ см) $D_{\max}$, км				Х-радар ($\lambda = 3$ см) $D_{\max}$, км				К-радар ($\lambda = 0,9$ см) $D_{\max}$, км			
	Туман, видимость 150 м	Туман, видимость 60 м	Снежная метель, сухой снег, интенсивность 4 мм/ч	Снежная метель, сухой снег, интенсивность 16 мм/ч	Туман, видимость 150 м	Туман, видимость 60 м	Снежная метель, сухой снег, интенсивность 4 мм/ч	Снежная метель, сухой снег, интенсивность 16 мм/ч	Туман, видимость 150 м	Туман, видимость 60 м	Снежная метель, сухой снег, интенсивность 4 мм/ч	Снежная метель, сухой снег, интенсивность 16 мм/ч
1	1	1	1	1	1	1	1	0,8	1	0,8	1	0
2	2	2	2	2	2	2	2	1,5	2	1,5	2	0
3	3	3	3	3	3	3	3	2	2,5	2	1,5	0
10	10	10	10	10	10	10	10	5	7	5	7	0
20	20	20	20	20	20	15	18	7	10	7	12	1
40	40	40	40	38	40	30	35	8	15	8	15	1,5

Из табл. 1 видно прогрессивное уменьшение дальности действия РЛС из-за наличия гидрометеоров для S-, X- и K-радаров.

Отношение «сигнал–шум» (по мощности) на входе приемника РЛС при наличии в атмосфере Земли гидрометеоров определяется соотношением:

$$\frac{P_{\text{пр}}}{P_{\text{пр.гм}}} = \frac{22,2 S_{\text{эф}}}{D^2 S_{\text{уд.гм}} \alpha_{\text{э}} \theta \tau_u},$$

где $P_{\text{пр}}$ – мощность отраженных от цели зондирующих импульсов РЛС на входе приемника;

$P_{\text{пр.гм}}$ – мощность отраженных от гидрометеоров зондирующих импульсов РЛС на входе приемника;

D – дальность до цели;

$S_{\text{уд.гм}}$ (1/м) – удельная эффективная поверхность рассеяния гидрометеоров;

$\alpha_{\text{э}}$ (град) – ширина диаграммы направленности антенны РЛС в горизонтальной плоскости;

θ (град) – ширина диаграммы направленности антенны РЛС в вертикальной плоскости;

τ_u (мкс) – длительность зондирующих импульсов.

Для расчета отношения «сигнал-шум» примем типовые характеристики РЛС, представленные в табл. 2. В табл. 2 приведены результаты расчета для случая, когда на удалении $D = 2 \text{ м.м.} = 3700 \text{ м}$ находится небольшое судно с эффективной поверхностью рассеяния $S_{\text{эф}} = 50 \text{ м}^2$. Идет мокрый снег с интенсивностью 16 мм/ч .

Таблица 2

Вид радара	$D, \text{ м}$	$S_{\text{эф}}, \text{ м}^2$	$\tau_u, \text{ мкс}$	$\alpha_e, \text{ град}$	$\Theta, \text{ град}$	$S_{\text{уд.эм}}, 1/\text{м}$	$P_{\text{пр}} / P_{\text{пр.эм}}$
S-радар	18520	50	0,1	1,47	20	$16 \cdot 10^{-7}$	17,2
X-радар	18520	50	0,1	1,6	20	$31,5 \cdot 10^{-6}$	5,4
K-радар	18520	50	0,1	0,45	20	$15 \cdot 10^{-4}$	0,05

Из табл. 2, также как и из табл. 1, видно прогрессивное ухудшение отношения «сигнал–шум» на входе приемника РЛС из-за отраженных зондирующих сигналов от гидрометеоров для S, X и K-радаров.

Заключение

Негативное влияние туманов и снежных метелей в Арктике приводит к поглощению мощности отраженных от цели зондирующих сигналов и увеличению мощности помех на входе приемников из-за отраженных зондирующих сигналов от гидрометеоров. Дальность действия РЛС с учетом этих двух факторов уменьшается, цели с малой эффективной поверхностью рассеяния могут быть не обнаружены. Принимая во внимание интенсивное развитие судоходства на трассе Северного морского пути и масштабные перспективы освоения арктического региона Российской Федерации, негативное влияние на работу РЛС туманов, снежных метелей, других видов осадков следует учитывать при проектировании судов, которые преимущественно предполагается эксплуатировать в арктических широтах.

Список литературы

1. Дуров А.А., Кан В.С., Ничипоренко Н.Т., Устинов Ю.М. Судовая радиолокация. Судовые радионавигационные системы и САРП: Учебник для вузов. – Петропавловск-Камчатский: КГТУ, 2000 – 280 с.
2. Теоретические основы радиолокации // Учебное пособие для вузов / Под ред. Я.Д. Ширмана – М.: Советское радио, 1970. – 560 с.

3. Васин В.В., Власов О.В., Григорин-Рябов В.В., Дудник П.И., Степанов Б.М. Радиолокационные устройства (теория и практика построения). – М.: Советское радио, 1970. – 680 с.

УДК 632.153; 341.161; 094.2

А.А. Сергеев, В.В. Гришкин

О РАБОТЕ КОМИТЕТА ИМО ПО ЗАЩИТЕ МОРСКОЙ СРЕДЫ

Комитет по защите морской среды (КЗМС) является старейшим техническим органом Международной морской организации (ИМО) в части вопросов загрязнения морской среды.

В период с 31 марта по 4 апреля 2008 года в Лондоне состоялась 57-я сессия КЗМС под председательством Андреаса Хрисостому (Кипр).

В работе сессии приняли участие представители делегаций 88 стран-членов, в том числе представители делегации Российской Федерации, и 46 межправительственных и неправительственных международных организаций.

Во время работы сессии, для более детального рассмотрения документов, представленных в рамках наиболее актуальных и проблемных вопросов повестки дня, были созданы группы по следующим направлениям:

- утилизация судов (рабочая группа WG);

- Приложение VI к МК МАРПОЛ 73/78 и Технический кодекс по NO_x (рабочая группа WG);

- выбросы парниковых газов с судов (рабочая группа WG);

- балластные воды (рецензионная группа RG);

- особые районы и особо уязвимые морские районы (редакционная группа DG).

В состав российской делегации вошли представители ФГУ «Госморспасслужбы России», ФГУ «Российский морской регистр судоходства», ЗАО «ЦНИИМФ», ОАО «Совкомфлот» и НИПКИ «Гипро-рыбфлот».

31 марта 2008 года, непосредственно перед открытием сессии, было проведено совещание представителей классификационных обществ-членов МАКО, в котором приняли участие и представители ФГУ «Российский морской регистр судоходства». В ходе этого совещания была обсуждена и согласована позиция МАКО по основным рассматриваемым вопросам. Была высказана просьба к участникам совещания: максимально учесть позицию МАКО во время работы делегаций на пленарных заседаниях и в рабочих группах.

В своей вступительной речи при открытии работы сессии Генеральный секретарь ИМО Е. Митропулос подчеркнул основные приоритеты в работе Комитета: утилизация судов, балластные воды, загрязнение атмосферы с судов, особенно парниковыми газами, а также призвал Договаривающиеся Стороны обеспечить скорейшую ратификацию новых международных инструментов.

Пункт повестки дня, касающийся предотвращения загрязнения атмосферы с судов, был, по сути, одним из основных на настоящей сессии Комитета.

Для решения вопросов **предотвращения загрязнения атмосферы** на сессии были созданы две рабочие группы: одна – **по Приложению VI к МК МАРПОЛ 73/78 и Техническому кодексу по NOx**, вторая – **по выбросам парниковых газов с судов**.

В работе группы **по Приложению VI к МК МАРПОЛ 73/78 и Техническому кодексу по NOx** (одной из самых многочисленных) участвовали представители из 37 стран-членов ИМО, одного ассоциированного члена и из 20 межправительственных организаций (примерно 200 чел.).

На заседаниях группы были приняты следующие решения по основным вопросам ее круга ведения.

1. В отношении существующих двигателей мощностью 5000 кВт и более и рабочим объемом цилиндра 90 л и более, изготовленных в период с 1990 по 1999 гг., было принято решение применить стандарт выбросов 1-го уровня (Tier I). Было решено также, что стандарт может применяться к тем двигателям, для которых имеются сертифицированная система или комплект оборудования (Kit) для проведения модернизации двигателя с целью достижения показателей стандарта выброса 1-го уровня (Tier I). С целью постепенного вывода из эксплуатации этих двигателей группа согласилась, что стандарт должен действовать для этих двигателей на период времени, определенный сроками следующего возобновляющего освидетельствования судна (5 лет) после вступления в силу поправок 2008 г.

В плане применения стандарта 3-го уровня (Tier III – для двигателей, установленных на судах, киль которых заложен в 2016 г. и после) группа приняла решение о целесообразности освобождения от выполнения его требований прогулочных судов длиной менее 24 м и судов с главными двигателями мощностью менее 750 кВт, если судно не может соответствовать требованиям вследствие его конструкции или конструктивных ограничений.

2. При пересмотре текста правила 14 Приложения VI к МК МАРПОЛ 73/78 по содержанию серы в топливе, используемом на судах, был взят за основу Вариант 1 (Option 1), принятый на BLG 12 (MEPC 57/4/23) и после внесения поправок предложен на утверждение сессии проект поэтапного снижения окислов серы в судовом топливе. В соответствии с предложенными требованиями мировое содержание серы в топливе должно быть снижено с 4,5 % до 3,5 % к январю 2012 г. и до 0,5 % – к январю 2020 г., что предполагает тотальный переход к применению дистиллятного топлива к этому сроку. В районах контроля выбросов окислов серы на судах должно применяться топливо с содержанием серы 1,0 % с марта 2010 г. и 0,1 % – с января 2015 г. Альтернативой применению этого топлива может быть использование систем очистки выхлопных газов.

3. Достигнуто соглашение об исключении из правила 14 ссылки на систему очистки выхлопных газов и о том, что альтернативные технологии могут быть разрешены в пересмотренном тексте правила 4 об эквивалентах.

4. Рассмотрены, откорректированы и дополнены следующие тексты:

- пересмотренный текст по приемным сооружениям;
- текст единых толкований;
- текст правила 12 по использованию галлонов;
- текст Технического Кодекса по NO_x и т. д.

Для завершения работы по пересмотру Приложения VI к МК МАРПОЛ 73/78 Комитет принял решение на следующей 58-й сессии создать только редакционную группу для отработки принятых Комитетом в целом проектов текстов правил Приложения VI к МК МАРПОЛ 73/78, Технического Кодекса по NO_x и Руководства по системам очистки выхлопных газов.

Одновременно проходили совещания Группы **по выбросам парниковых газов с судов**.

Группа детально рассмотрела краткосрочные и долгосрочные мероприятия по снижению уровня выбросов парниковых газов с судов,

определенных Межсессионной корреспондентской группой, созданной на 56-й сессии КЗМС. Группа определила, что принятие некоторых мер могло бы уже в ближайшее время привести к снижению уровня выбросов парниковых газов с судов и эти меры должны быть применены как можно скорее, и согласилась с тем, что на межсессионном совещании рабочей группы в Осло в июне 2008 г. должны быть разработаны тексты резолюций ИМО с учетом наилучшего мирового опыта в части снижения уровня выбросов парниковых газов.

В качестве одной из краткосрочных мер на обсуждение было выдвинуто предложение Дании, поддержанное всеми делегациями стран-членов ЕС, о введении налога на бункерное топливо. Указанный налог планировалось направлять в специальный фонд, на средства которого предлагалось покупать квоты на выбросы парниковых газов и оказывать помощь развивающимся странам в борьбе с последствиями изменения климата. Дания предложила вводить налог в размере 30 EUR на метрическую тонну бункерного топлива, поставленного на суда, совершающие международные рейсы.

Развивающиеся страны (Китай, Бразилия, Индия, ЮАР) заявляли, что решения ИМО не должны противоречить Рамочной конвенции ООН об изменении климата и Киотскому протоколу.

Российская делегация внесла предложение передать вопрос о введении налога на выбросы парниковых газов в Секретариаты Рамочной конвенции ООН и Киотского Протокола для получения экспертного заключения.

В качестве некоторых из долгосрочных мер группа определила:
разработку обязательного проектного индекса CO₂ для новых судов, с учетом которого будут проектироваться суда и его двигатели;
разработку Руководства по эксплуатационной индексации судов по выбросам CO₂.

Рабочая группа приняла решения по результатам работы Межсессионной корреспондентской группы предоставить на 58 сессию КЗМС временный отчет по решению этих вопросов и окончательный отчет – на 59 сессию КЗМС.

После сессии делегация МАКО представила на обсуждение свой Отчет о работе на 57 сессии КЗМС. Рассмотрев этот отчет, председатель Панели МАКО «Международные конвенции» Mr. Wang Chen предложил на обсуждение членами МАКО свою позицию в части парниковых газов, а именно: по его мнению, на данной стадии члены МАКО должны сохранять нейтральную позицию относительно вопросов, связанных с рыночными механизмами снижения выбросов

парниковых газов, поскольку они преследуют политические интересы государств – членов ИМО. После 58 сессии КЗМС классификационные общества могут быть вовлечены в работу по созданию технического руководства в части парниковых газов. В этом отношении Панель МАКО «Механизмы» может внести свой вклад, с технической точки зрения, в разработку обязательного проектного индекса CO₂ для новых судов. Эта позиция Регистром была поддержана.

Одним из традиционных вопросов повестки дня сессии был вопрос по рассмотрению **интерпретаций и поправок к МК МАРПОЛ 73/78**. Ввиду того, что сессия не планировала организовывать Редакционную группу по интерпретациям и поправкам, все вопросы, поднятые в представленных на сессию документах, обсуждались непосредственно на пленарном заседании.

Одним из трудоемких и важных вопросов по пятому пункту повестки дня был вопрос пересмотра Приложения V к МК МАРПОЛ 73/78. На пленарном заседании был представлен отчет Межсессионной корреспондентской группы по пересмотру Приложения V к МК МАРПОЛ 73/78.

Комитет согласился возобновить работу межсессионной группы с отчетом о ходе работы на 58 сессии КЗМС в октябре 2008 г. и призвал страны активно участвовать в пересмотре Приложения V к МК МАРПОЛ 73/78 и соответствующих руководств с целью завершения этой работы при рассмотрении на 59 сессии КЗМС в июле 2009 г.

Остальные документы по этому пункту повестки были представлены МАКО и касались унифицированных интерпретаций текстов Приложений к МК МАРПОЛ 73/78. Все предложения этих документов сессией были приняты без замечаний кроме следующего.

На пленарном заседании по предложению российской делегации было внесено подготовленное Регистром изменение в текст Унифицированной интерпретации правила 22 Приложения I к МК МАРПОЛ 73/78 по защите дна насосных отделений нефтяных танкеров. Предложенное изменение было согласовано с представителями делегации МАКО непосредственно на пленарном заседании и исправленный текст этой интерпретации был принят на сессии.

При обсуждении на сессии проблемы **переноса вредных водных организмов и патогенов в водяном балласте** Секретариат напомнил, что в настоящее время Международную конвенцию о контроле судовых балластных вод и осадков и управлении ими ратифицировали 12 государств, представляющих 3,46 % мирового тоннажа торгового флота. Условием вступления указанной конвенции в силу является присоединение к ней 30 государств, торговые суда которых

имеют суммарную валовую вместимость не менее, чем 35 % валовой вместимости судов мирового торгового флота.

На предыдущих сессиях Комитета были одобрены 13 Руководств для унифицированного применения Конвенции. Рабочая группа по балластным водам, учрежденная 12 сессией BLG, закончила работу еще над одним Руководством: Руководством по отбору проб балластной воды (G2). Это Руководство планируется одобрить на 58 сессии КЗМС.

На предыдущих сессиях КЗМС ставилась задача скорейшего решения вопроса типового одобрения систем обработки балластных вод. Ранее отмечалось, что одной из возможных причин задержки вступления в силу Конвенции может явиться отсутствие эффективной одобренной системы обработки балластных вод. В соответствии с правилом В-3.3 Конвенции суда, построенные в 2009 г. или позднее этой даты, с объемом балластных вод менее 5000 м³ должны осуществлять управление балластными водами в соответствии со стандартом, описанном в правиле D-2 Конвенции. Этот стандарт устанавливает нормы сброса балластных вод, например, по минимальному количеству жизнеспособных организмов на 1 м³ сбрасываемой балластной воды. Соблюдение этого стандарта предполагает наличие на судне одобренной системы обработки балластных вод.

Комитет выразил озабоченность относительно способности судов, построенных в 2009 г. и попадающих под требования правила В-3.3 Конвенции, соответствовать стандарту D-2 к 2009 г. вследствие процедурных и материально-технических проблем. В части вышеуказанного в тексте Резолюции А.1005(25), принятой на 25 сессии Ассамблеи, приводится рекомендательное указание Комитету придерживаться следующего: суда, построенные в 2009 г., могут не соответствовать требованиям правила D-2 до их второго ежегодного освидетельствования, но в любом случае только до 31 декабря 2011 г.

На 57 сессии КЗМС было отмечено, что в настоящее время окончательное одобрение получила одна система по обработке балластных вод с использованием активных веществ (предложенная Норвегией) и шесть подобных систем получили базовое одобрение (предложенные Японией, Швецией, Германией и Республикой Корея), которые в дальнейшем будут рассмотрены для получения окончательного одобрения.

Одними из важных вопросов работы сессии по указанной Конвенции стал пересмотр Руководства по одобрению систем управления балластными водами (G8) и Процедуры по одобрению систем управления балластными водами (G9).

Комитетом был отмечен прогресс по пересмотру вышеуказанных документов:

пересмотренный текст вышеуказанной Процедуры (G9) на сессии был принят соответствующей Резолюцией; и

были приняты поправки к вышеуказанному Руководству (G8), предложенные на BLG 12. Комитет согласился с тем, что процесс пересмотра этого Руководства должен быть продолжен на 58 сессии КЗМС.

Делегации приняли к сведению информацию Секретариата о том, что **Международная конвенция о контроле за вредными противообрастающими системами** (далее – Конвенция ТВТ) вступит в силу 17 сентября 2008 г. На настоящее время ее ратифицировали 28 государств, имеющих 43,79 % мирового тоннажа торгового флота. В этой связи прошло обсуждение выполнения положений конвенции в части сроков запрещения использования противообрастающих красок, содержащих ТВТ (Tributyltin / трибутилоловонатрий), а именно: с 1 января 2003 г. – запрет использования указанных красок при проведении ремонтов судов, с 1 января 2008 г. – запрет наличия таких типов красок на корпусах судов. Несмотря на заключение Юридического Управления ИМО о том, что любые требования, установленные конвенцией, должны применяться, начиная с даты ее вступления в силу, т. е. с 17 сентября 2008 г., делегации стран-членов ЕС заявили, что в своих портах они требуют от заходящих судов выполнения указанных требований, начиная с 1 января 2008 года. Делегации вынуждены были признать, что согласие по этому вопросу не достигнуто, в связи с чем, каждая страна будет решать вопрос применения установленных в Конвенции ТВТ дат согласно национальному законодательству. Далее делегации, согласно Статье 9(1)(b) Конвенции ТВТ, просили представить в Секретариат информацию о любых противообрастающих системах, одобренных, запрещенных или ограниченных к применению согласно национальному законодательству.

Комитет продолжил разработку проекта текста **Международной Конвенции по безопасной и экологически рациональной утилизации судов** (далее – Конвенция по утилизации судов), а также разработку других Руководств, предусмотренных проектом указанной Конвенции. Межсессионной рабочей группой по утилизации судов на рассмотрение Комитета был представлен первый проект текста Конвенции по утилизации судов. Делегация РФ, как и многие страны, поддержала предложение США о возможности утилизации судов сторон Конвенции предприятиями стран, не являющихся сторонами Конвен-

ции, при условии, что утилизация будет производиться безопасным и экологически рациональным способом. В ходе напряженного обсуждения данного предложения, в контексте его включения в текст Конвенции, было решено разработать соответствующую резолюцию Дипломатической конференции, отразив тем самым озабоченность стран достаточностью, к моменту вступления Конвенции в силу, предпочтений по утилизации судов у стран – сторон данной Конвенции.

Секретариат проинформировал, что проведение Дипломатической конференции по принятию указанной Конвенции запланировано на период с 11 по 15 мая 2009 г. в Гонг-Конге (по приглашению Китая). Делегации, участвовавшие в работе сессии, одобрили график дальнейшей разработки проекта Конвенции по утилизации судов, согласно которому предусматривается работа корреспондентской группы и проведение заседания межсессионной рабочей группы по утилизации судов перед 58 сессией КЗМС, а затем – постатейное рассмотрение текста Конвенции на КЗМС 58.

При обсуждении вопросов повестки дня **по особым районам в соответствии МК МАРПОЛ 73/78 и особо уязвимым районам** наиболее важным вопросом было вступление в силу требований сброса мусора для особого района Средиземного моря. Долгое время дата вступления в силу этих требований не могла быть назначена из-за отсутствия уведомлений заинтересованных прибрежных государств о мерах, принятых к исполнению требования по наличию достаточных приемных сооружений во всех портах, находящихся в этом особом районе.

В период работы сессии Комитетом было отмечено, что такие уведомления были получены.

Редакционной группой по вопросам особых районов и особо уязвимых районов был подготовлен проект о назначении вышеуказанной даты. В соответствии с принятой Комитетом Резолюцией требования сброса для особого района Средиземного моря будут действовать с 1 мая 2009 г.

В ходе 57 сессии КЗМС проводились неформальные консультации с делегациями других стран для выработки согласованной позиции, отвечающей интересам Российской Федерации.

Список литературы

1. Отчетные материалы 57 сессии КЗМС.
2. Обзорный отчет МАКО о результатах 57 сессии КЗМС.

СОДЕРЖАНИЕ

Решетов Н.А. Вступительное слово	3
--	---

Вопросы безопасности мореплавания

Белый О.В., Скороходов Д.А., Стариченков А.Л. Проблемы использования Северного морского пути	10
Гайкович А.И., Андрюшин А.В. Концептуальная оценка безопасности судна ледового плавания	22
Дмитриев В.И., Шацбергер Э.М. К вопросу об обеспечении эффективности и безопасности плавания транспортных судов в Арктике.....	31
Кузавков В.М., Егоров В.П., Рыдловский В.П., Штайц В.В. Исследование и разработка норм локального контроля герметичности соединений элементов герметичного контура защитных оболочек судов и плавучих сооружений с атомной паропроизводящей установкой.....	42
Буре В.М., Грубов Д.А., Парилина Е.М., Тряскин В.Н. Применение методов оценки риска к анализу эксплуатации судового оборудования при воздействии низких температур	59
Евенко В.И., Грубов Д.А., Тряскин В.Н. Развитие требований Российского морского регистра судоходства к судам, предназначенным для эксплуатации в условиях низких температур.....	69

Строительство новых судов

Евенко В.И., Кутейников М.А., Дидковский А.В., Апполонов Е.М., Симонов Ю.А., Романов Р.Ю. Проектирование арктических газовозов	81
---	----

Вопросы прочности судов и плавучих сооружений

Карулин Е.Б., Карулина М.М., Беляшов В.А., Белов И.М. Оценка периодических нагрузок, действующих на гребной винт при взаимодействии со льдом	93
---	----

Апполонов Е.М., Дидковский А.В., Кутейников М.А., Нестеров А.Б., Шишенин Е.А. Обеспечение аварийной прочности крупнотоннажных арктических газовозов при нестандартных сценариях взаимодействия со льдом.....	107
Апполонов Е.М., Нестеров А.Б., Тимофеев О.Я. Регламентация ледовых нагрузок на вертикальный борт при сжатии во льдах.....	129

Материалы и сварка

Ильин А.В., Леонов В.П., Филин В.Ю. Разработка методики оценки сопротивления хрупкому разрушению сварных конструкций для шельфа Арктики.....	147
Хлусова Е.И., Круглова А.А., Орлов В.В., Сувориков В.А., Башаев В.К. Освоение технологии термомеханического упрочнения стали повышенной категории прочности марок FW и F32W с пределом текучести 235–315 МПа в толщинах до 50 мм на ЧерМК ОАО «Северсталь»	176
Малышевский В.А., Хлусова Е.И., Ильин А.В., Башаев В.К. Комплексные исследования работоспособности новых марок хладостойкой стали с пределом текучести от 235 до 690 Н/мм ² для арктических конструкций	189
Рыбин В.В., Пронин М.М., Старцев В.Н., Леонов В.П. Технология лазерной сварки сотовых элементов судовых конструкций и оценка их работоспособности.....	209

Судовые механические установки, валопроводы и движители

Шишкин В.А., Иванов М.Ю., Кравченко С.А. Вопросы совершенствования требований МАКО к испытаниям судовых дизелей.....	219
Ефремов Л.В., Иванов М.Ю. Особенности крутильных колебаний винторулевых колонок с электрическим приводом	234
Орлова Е.Г., Шурпак В.К. Проблемы оценки эффективности судовых систем охлаждения с заборными охладителями	245

Противопожарная защита судов

Аксенов В.Т. Мероприятия по предотвращению взрывов на нефтеналивных судах и химовозах, перевозящих грузы с низкой температурой вспышки (о рассмотрении в рамках ИМО вопроса об оборудовании танкеров дедвейтом менее 20 000 тонн стационарной системой инертных газов)260

Электрооборудование и автоматизация судов

Григорьев А.В. Единая электроэнергетическая установка малого гидрографического судна «Вайгач»: опыт проектирования и результаты испытаний271
Викулин В.Б., Жадобин Н.Е., Мачульский В.Б. Ограничители грузоподъемности судовых кранов с магнитоупругими преобразователями.....279
Сюбаев М.А., Крылов А.П., Мачульский В.Б. О выборе основных элементов и их параметров гребных электроустановок285

Радио- и навигационное оборудование судов

Пивоваров А.Н., Михайлов В.Г. Этапы развития судовых охранных систем.....290
Афанасьев В.В., Маринич А.Н., Устинов Ю.М. Негативное влияние сложных погодных условий на работу РЛС на трассе Северного морского пути296

Защита окружающей среды

Сергеев А.А., Гришкин В.В. О работе комитета ИМО по защите морской среды302

Белый О.В., Скороходов Д.А., Стариченков А.Л. Проблемы использования Северного морского пути // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – Вып. 31. – 2008. – С. 10 – 21.

В работе рассмотрена история развития и основные причины исследований Северного морского пути, как в прежние годы, так и в условиях сегодняшнего и завтрашнего времени, показано значение Северного морского пути для развития торговли, промышленности и энергетического комплекса. Авторами представлен анализ состояния средств обеспечения данного пути и определены основные задачи его конкурентоспособного развития, приведены способы решения сформулированных интеллектуальных задач, финансового обеспечения, ожидаемого экономического и социального результатов, а также исследованы проблемы и возможности их решения.

Гайкович А.И., Андрюшин А.В. Концептуальная оценка безопасности судна ледового плавания // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – Вып. 31. – 2008. – С. 22 – 30.

В статье рассмотрен общий (концептуальный) подход к построению единого комплексного показателя, количественно и качественно отражающего безопасность судна как сложной технической системы. Внедрение такого комплексного показателя позволяет создать единую платформу для согласования позиций проектанта, заказчика судна, классификационного общества, страховой компании на всех стадиях цикла жизни судна. Применение комплексного показателя безопасности целесообразно уже на ранних стадиях проектирования, когда принимаются принципиальные архитектурно-конструктивные решения. Это позволит улучшить качество проектов, и, следовательно, повысит их конкурентоспособность. В статье представлены и проанализированы подходы к количественной оценке комплексного показателя безопасности судна.

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.

В статье сформулирована идея повышения эффективности использования Северного морского пути в качестве транспортного коридора «Запад – Восток» на базе имеющихся в наличии атомных ледоколов и новой тактики проводки транспортных судов на предельных скоростях. В работе показано, что способ решения проблем дальнейшего функционирования Северного морского пути посредством повышения мощности ледоколов исчерпан, и дальнейшее развитие мореплавания в Арктике лежит в плоскости реализации потенциала человеческого фактора. Разработаны предложения по повышению эффективности и безопасности плавания транспортных судов во льдах.

Кузавков В.М., Егоров В.П., Рыдловский В.П., Штайц В.В. Исследование и разработка норм локального контроля герметичности соединений элементов герметичного контура защитных оболочек судов и плавучих сооружений с атомной паропроизводящей установкой // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – Вып. 31. – 2008. – С. 42 – 58.

В статье рассмотрены вопросы испытаний на герметичность защитных оболочек атомных паропроизводящих установок (АППУ), разработана номенклатура типовых элементов герметичного контура защитной оболочки, разработаны нормы их испытаний, определена норма герметичности элементов герметичного контура. Практическим результатом являются методика расчета норм испытаний элементов герметичного контура, методика испытаний кабелей и устройств уплотнения проходов кабелей или проводников. Разработанные методики рекомендованы для включения в состав Правил классификации и постройки атомных судов и плавучих сооружений Российского морского регистра судоходства.

Буре В.М., Грубов Д.А., Парилина Е.М., Тряскин В.Н. Применение методов оценки риска к анализу эксплуатации судового оборудования при воздействии низких температур // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – Вып. 31. – 2008. – С. 59 – 68.

В статье рассмотрены вопросы применения методов оценки риска при разработке и совершенствовании требований Российского морского регистра судоходства к судам, предназначенным для эксплуатации в условиях низких температур. Подчеркнуто, что вследствие недостаточных статистических данных по отказам судового оборудования от воздействия низких температур применение FSA возможно с использованием метода экспертных оценок. Изложен подход к классификации объектов риска и предложена математическая модель для обработки экспертной информации.

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 статье рассмотрено современное состояние международных требований к судам для обеспечения их длительной эксплуатации в условиях Арктики и Антарктики, изложен подход Российского морского регистра судоходства к разработке требований к судам с дополнительными знаками **ANTI-ICE** и **WINTERIZATION** в символе класса, которые будут внедрены в Правила РС в 2008 – 2009 гг., а также описана структура разрабатываемых требований.

Евенко В.И., Кутейников М.А., Дидковский А.В., Апполонов Е.М., Симонов Ю.А., Романов Р.Ю. Проектирование арктических газовозов // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – Вып. 31. – 2008. – С. 81 – 92.

Суда, предназначенные для вывоза сжиженного природного газа из арктических районов, должны обеспечивать регулярные круглогодичные перевозки. При проектировании таких судов необходимо учитывать два основных критерия: надежность и экономическую эффективность.

Статья описывает основные направления исследований при разработке требований к арктическим судам для перевозки сжиженного природного газа.

По результатам анализа основных направлений исследований, требуемых для создания вышеназванных судов, сделан вывод о необходимости применения не только традиционных и годами проверенных решений, но и о целесообразности внедрения современных инноваций, позволяющих повысить безопасность и эффективность эксплуатации указанных судов. Исследования по созданию научно-технического базиса проектирования перспективных арктических газозовозов позволят в будущем обеспечить надежность и безопасность поставок российского газа мировым потребителям.

УДК 629.5.035.55.017: 629.561.5

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. – 2008. – С. 93 – 106.

Возникновение периодических ледовых нагрузок на лопасть гребных винтов ледоколов и судов ледового плавания при их движении во льдах является одной из причин появления усталостных повреждений пропульсивного комплекса, а также возрастания вибрации корпусов этих судов. В статье описывается подход ЦНИИ им. акад. А.Н.Крылова для решения задачи определения пульсаций ледового упора и крутящего момента гребного винта при взаимодействии со льдом, а также спектрального состава этих нагрузок. Комплексный подход включает три направления исследований: использование теоретической модели и два типа модельных исследований, проводимых в ледовом опытовом бассейне, – модельный эксперимент по фрезерованию льда гребным винтом и буксировка модели корпуса судна с работающими гребными винтами во льду. Каждое из направлений дополняет общую картину изучаемого слож-

ного процесса. В качестве примера возможного использования результатов исследований выполнены расчеты параметров вибрации судна ледового плавания, которые показали, что возникновение периодических ледовых нагрузок на гребном винте при движении судна во льдах может привести к 3 – 4-кратному увеличению общей вибрации корпуса.

УДК 629.12

Апполонов Е.М., Дидковский А.В., Кутейников М.А., Нестеров А.Б., Шишенин Е.А. Обеспечение аварийной прочности крупнотоннажных арктических газовозов при нестандартных сценариях взаимодействия со льдом // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – Вып. 31. – 2008. – С. 107 – 128.

В работе описана методология определения параметров нестандартных (аварийных) сценариев ледового взаимодействия (прямого и отраженного удара о лед), которая позволяет получить исходные данные для вычисления ледовых нагрузок для проверки конструктивной безопасности вкладных емкостей СПГ. Определение параметров ледовой нагрузки может быть осуществлено с использованием существующих программ, реализующих алгоритм гидродинамической модели удара судна о лед.

Рассмотрены нагрузки, возникающие при сжатии во льдах. Использование расчетной модели, учитывающей локализацию зоны контакта по высоте, вызванную частичным разрушением нижних, менее прочных слоев льда, позволили определить расчетные значения нагрузок ледового сжатия.

Выполненные исследования особенностей глубокого пластического деформирования конструкций двойного борта под действием ледовой нагрузки позволяют конкретизировать процедуру оценки последствий реализации аварийных и нестандартных сценариев для корпусов арктических газовозов.

УДК 629.54

Апполонов Е.М., Нестеров А.Б., Тимофеев О.Я. Регламентация ледовых нагрузок на вертикальный борт при сжатии во льдах // Науч.-

техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – Вып. 31. – 2008. – С. 129 – 146.

В статье описана методология регламентации ледовых нагрузок на вертикальный борт при сжатии во льдах, учитывающая неравномерность распределения по толщине прочности льда на сжатие в направлении, параллельном поверхности.

Представленный метод моделирования ледовых нагрузок при сжатии вертикального борта, в отличие от применявшихся ранее методов, предполагает разрушение льда изгибом. Метод объясняет конечность длины пятна нагрузки и назначение высоты пятна, меньшей, чем толщина льда. Расчетные данные показали удовлетворительное совпадение с имеющимся массивом данных в координатах «ледовое давление–площадь пятна нагрузки».

Дальнейшее совершенствование модели требует проведения модельного, а затем и натурного эксперимента на конструкциях борта крупнотоннажных судов.

УДК 621.791.05:539.4

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. – 2008. – С. 147 – 175.

Расчетная оценка сопротивления хрупкому разрушению является одним из обязательных элементов обеспечения безаварийной эксплуатации морских конструкций для северного шельфа, предусматриваемых зарубежными стандартами и спецификациями. В связи с начавшимся строительством морских стационарных платформ и плавучих буровых установок для шельфа Арктики, условия эксплуатации на котором характеризуются предельно низкими расчетными температурами, возможностью интенсивного ледового нагружения, необходимость использования подобных оценок возрастает. Однако до настоящего времени отсутствуют отечественные нормативные документы для их проведения, требования которых распространялись бы на сварные нетермообработываемые конструкции и были бы гармонизированы с зарубежными стандартами. В работе представлены предложения по основным процедурам проведения подобных расчетов с их кратким обоснованием.

Хлусова Е.И., Круглова А.А., Орлов В.В., Сувориков В.А., Башаев В.К. Освоение технологии термомеханического упрочнения стали повышенной категории прочности марок FW и F32W с пределом текучести 235 – 315 МПа в толщинах до 50 мм на ЧерМК ОАО «Северсталь» // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – Вып. 31. – 2008. – С. 176 – 188.

В статье разрабатывается технология производства марганцевой стали, обеспечивающая ее хладостойкость до температуры минус 50 °С, анализируются фазовые превращения в стали и влияние основных технологических параметров на формирование структуры и свойств в листовом прокате толщиной до 50 мм. В результате проведенных испытаний установлены закономерности формирования структуры сталей категорий FW и F32W при термомеханической обработке.

Проведенные исследования позволяют сделать выводы о пригодности разработанных сталей и технологий их производства для строительства арктических технических сооружений.

Малышевский В.А., Хлусова Е.И., Ильин А.В., Башаев В.К. Комплексные исследования работоспособности новых марок хладостойкой стали с пределом текучести от 235 до 690 Н/мм² для арктических конструкций // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – Вып. 31. – 2008. – С. 189 – 208.

В статье представлены результаты оценки работоспособности (механические свойства и их изотропность, в том числе при отрицательных температурах, вид излома, критические температуры хрупкости, коррозионно-механическая прочность, свариваемость, трещиностойкость, сопротивление циклическому нагружению) листового проката толщиной 20 – 30 мм и сварных соединений из хладостойких марок стали после термомеханической обработки, выполненные по программам Российского морского регистра судоходства и подтвердившие их соответствие российским и международным требованиям, предъявляемым к сталям для судов арктического плавания, технических средств разведки и добычи углеводородов.

Разработанные стали и технологии освоены на крупнейших российских заводах ЧерМК ОАО «Северсталь» и ООО «ОМЗ-Спецсталь», обеспечили строительство МЛСП «Приразломная», СПБУ «Арктическая», а также серии многофункциональных платформ для Норвегии типа «MOSS», востребованы на российском и международном рынках.

УДК 621.791.725:629.12.011

Рыбин В.В., Пронин М.М., Старцев В.Н., Леонов В.П. Технология Лазерной сварки сотовых элементов судовых конструкций и оценка их работоспособности // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – Вып. 31. – 2008. – С. 209 – 218.

Применение легких объемных сотовых панелей в качестве элементов судовых конструкций дает при одинаковой несущей способности снижение веса и расхода материала на 20 – 30 % по сравнению с конструкциями традиционных типов, а использование лазерной сварки делает изготовление сотовых конструкций технологичным и высокопроизводительным. В ЦНИИ КМ «Прометей» разработан последовательный ряд технологических процессов лазерной и лазерно-дуговой сварки, обеспечивающих принципиальную возможность изготовления сотовых панелей и собранных из них фрагментов судовых конструкций.

УДК 621.431.74.004:621.43-53

Шишкин В.А., Иванов М.Ю., Кравченко С.А. Вопросы совершенствования требований МАКО к испытаниям судовых дизелей // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – Вып. 31. – 2008. – С. 219 – 233.

В связи с участием представителей Российского морского регистра судоходства в работе Специализированной группы МАКО по механизмам (*IACS MACHINERY PANEL*) необходимо формирование позиций РС по корректировке унифицированных требований МАКО в этой предметной области, в том числе в вопросах испытаний судовых дизелей. На основе сравнительного анализа требований классифика-

ционных обществ и унифицированных требований МАКО к их испытаниям в статье предлагаются направления и конкретные решения по их совершенствованию с учетом быстрого распространения информационных технологий, средств и методов неразрушающего контроля и электронных систем управления функционированием главных и вспомогательных двигателей морских судов.

УДК 629/12 - 233/12

Ефремов Л.В., Иванов М.Ю. Особенности крутильных колебаний винто-рулевых колонок с электрическим приводом // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – Вып. 31. – 2008. – С. 234 – 244.

В статье приведены результаты исследования особенностей развития и расчета крутильных колебаний винто-рулевых колонок (ВРК) с электрическим приводом и подтверждена эффективность и универсальность новой программы в редакторе MATHCAD, специально разработанной для экспертизы подобных расчетов Регистром.

На основании анализа отчетов фирмы «Вулкан» установлено, что опасными параметрами крутильных колебаний у ВРК являются не напряжения в валах, а эластические моменты в упругой муфте и зубчатых зацеплениях, а также – потеря мощности на нагрев резины упругой муфты. При этом необходимо учитывать возмущающие моменты гармоник первого и второго лопастных порядков от гребного винта, приведенных к частоте вращения электродвигателя.

К другим особенностям расчета ВРК можно отнести: введение в схему системы вращающихся масс нулевых масс и бесконечных жесткостей (нулевых податливостей) для оценки нагрузки в шлицевых и зубчатых зацеплениях; алгебраическое векторное суммирование колебаний различных порядков при нулевых значениях сдвига по фазе, выполнение расчета свободных колебаний методом Хольцера (HOLZER Analysis) и др.

Указанные особенности были учтены при разработке новой программы с применением метода Хольцера в редакторе MATHCAD. Сравнения результатов расчета по этой программе с фирменными данными, показало хорошее совпадение не только параметров свободных колебаний, но и амплитуд нагрузок в элементах системы от резонансных и вынужденных колебаний лопастных порядков. Это

косвенно подтверждает корректность и универсальность принятой в новой программе концепции учета демпфирования в элементах системы.

УДК 629.5.062:621.565.952

Орлова Е.Г., Шурпак В.К. Проблема оценки эффективности судовых систем охлаждения с заборными охладителями // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – Вып. 31. – 2008. – С. 245 – 259.

В статье производится анализ тенденций развития систем охлаждения на судах с классом Регистра. Рассмотрена проблема оценки эффективности судовых систем охлаждения с заборными охладителями. Представлена математическая модель теплообмена в заборных охладителях, располагающихся в кингстонных ящиках, определены параметры кингстонного ящика, влияющие на интенсивность теплообмена. Предлагается методика оценки тепловой мощности заборных охладителей при номинальной нагрузке двигателя в зависимости от температуры заборной воды по результатам швартовых или ходовых испытаний на долевых режимах работы двигателя.

Описаны результаты теплотехнических испытаний кингстонного охладителя (КО) судна с винтом регулируемого шага и двухконтурной системой охлаждения, проведенных для экспериментальной проверки и уточнения полученной математической модели. В результате выводов, сделанных в статье, могут быть сформулированы предложения по изменению требований Правил Регистра к системам с использованием заборных охладителей.

УДК 629.7.067.8; 629.5.011:061.6

Аксенов В.Т. Мероприятия по предотвращению взрывов на нефтеналивных судах и химовозах, перевозящих грузы с низкой температурой вспышки (о рассмотрении в рамках ИМО вопроса об оборудовании танкеров дедвейтом менее 20 000 тонн стационарной системой инертных газов) // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – Вып. 31. – 2008. – С. 260 – 270.

В последнее время в рамках деятельности Комитета по безопасности на море ИМО и ряда его Подкомитетов широко обсуждается вопрос о принятии поправок к Международной конвенции СОЛАС-74, распространяющих требование о наличии стационарной системы инертизации грузовых танков на нефтеналивные суда и химовозы дедвейтом менее 20 000 т. Истории, проблематике и текущему состоянию этого вопроса посвящена данная статья.

УДК 621.316:629.12.06.001.4

Григорьев А.В. Единая электроэнергетическая установка малого гидрографического судна «Вайгач»: опыт проектирования и результаты испытаний // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – Вып. 31. – 2008. – С. 271 – 278.

В статье приведены результаты компьютерного моделирования, стендовых и ходовых испытаний первой отечественной единой электроэнергетической установки (ЕЭЭУ) с системой электродвижения переменного тока малого гидрографического судна «Вайгач».

Ввод в эксплуатацию малого гидрографического судна «Вайгач» проекта 19910 стало началом замены устаревших гидрографических судов и катеров современными, способными более эффективно выполнять задачи по навигационно-гидрографическому обеспечению морских путей Российской Федерации.

Результаты моделирования и испытаний ЕЭЭУ с системой электродвижения судна «Вайгач» подтвердили высокие технические характеристики разработанной ЕЭЭУ с системой электродвижения переменного тока.

УДК 629.5.065.23:681.586.7

Викулин В.Б., Жадобин Н.Е., Мачульский В.Б. Ограничители грузоподъемности судовых кранов с магнитоупругими преобразователями // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – Вып. 31. – 2008. – С. 279 – 284.

В статье рассмотрены требования РС, предъявляемые к ограничителям грузоподъемности (ОГП) судовых кранов, описаны проблемы,

возникающие при построении ОГП с требуемой точностью и быстродействием, указаны пути решения упомянутых проблем и приведены примеры ОГП с магнитоанизотропными преобразователями и фильтрами с конечной импульсной характеристикой.

УДК 629.5.064

Сюбаев М.А., Крылов А.П., Мачульский В.Б. О выборе основных элементов и их параметров гребных электрических установок // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – Вып. 31. – 2008. – С. 285 – 289.

В статье на основе анализа материалов многолетней эксплуатации гребных электрических установок (ГЭУ) и проведенных расчетов, сформулированы рекомендации по выбору гребных электрических двигателей (ГЭД), их основных параметров, преобразователей частоты, питающих ГЭД, и систем охлаждения главных электромашин (ЭМ) ГЭУ, которые могут быть учтены как при постройке новых судов с ГЭУ, так и при модернизации данных установок на судах, находящихся в эксплуатации.

Предложены рекомендации по выбору класса изоляции ЭМ, расчетного ресурса их наработки, а также конструктивного исполнения систем охлаждения ЭМ ГЭУ.

УДК 621.39

Пивоваров А.Н., Михайлов В.Г. Этапы развития судовых охранных систем // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – Вып. 31. – 2008. – С. 290 – 295.

В статье рассмотрены этапы построения судовых охранных систем в рамках Международного кодекса ОСПС, федерального закона «О транспортной безопасности» и других нормативных документов. Авторами описаны такие основные моменты, как анализ вероятных угроз, проектирование комплекса технических средств охраны (КТСО), порядок выполнения строительно-монтажных и пусконаладочных работ, сдача и эксплуатация оборудования заказчиком, послегарантийное обслуживание, а также представлен алгоритм этапов развития судовых КТСО.

Указанные материалы являются информационными для специалистов морской индустрии, занимающихся проблемами обеспечения безопасности морских объектов.

УДК 629.5.073.5:621.396.969.33:268

Афанасьев В.В., Маринич А.Н., Устинов Ю.М. Негативное влияние сложных погодных условий на работу РЛС на трассе Северного морского пути // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – Вып. 31. – 2008. – С. 296 – 301.

В статье приводится сравнительный анализ негативного влияния сложных погодных условий, а именно туманов и метелей на работу радиолокационных станций S, X и K-диапазонов в Арктическом регионе.

УДК 632.153; 341.161; 094.2

Сергеев А.А., Гришкин В.В. О работе Комитета ИМО по защите морской среды // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – Вып. 31. – 2008. – С. 302 – 309.

Статья написана по итогам работы 57-й сессии Комитета по защите морской среды. В ней представлен анализ решений сессии по вопросу принятия пересмотренного текста Приложения VI к МК МАРПОЛ 73/78 и Технического кодекса по контролю за выбросами окислов азота из судовых дизельных двигателей; по вопросу рассмотрения и принятия интерпретаций и поправок к МК МАРПОЛ 73/78; по мерам, направленным на снижение уровня выбросов парниковых газов с судов; по проблемам переноса вредных водных организмов и патогенов в водяном балласте судов и многим другим вопросам защиты морской среды и атмосферы.

В статье также приводится позиция МАКО по отдельным принятым решениям сессии.

UDC 629.12.001.2

O.V. Bely, D.A. Skorokhodov, A.L. Starichenkov Problems of Use of the Northern Sea Route // Transactions of Russian Maritime Register of Shipping. – Issue 31. – 2008. – P. 10 – 21.

The article considers the history of development and the main principles of exploration of the Northern Sea Route; just as in the past, so at present and in future the importance of the Northern Sea Route for the development of trade, industry and power complex is shown in the article. Support status for the NSR is analysed by the authors, the main tasks of its competitive development are determined, ways of solving the formulated intellectual tasks, financial support, expected results in the economic and social spheres are presented, as well as the problems and possibilities of their solution are studied.

UDC 658.512:681.5.01

A.I. Gaikovich, A.V. Andryushin Conceptual Framework for Ice Ship Safety Assessment // Transactions of Russian Maritime Register of Shipping. – Issue 31. – 2008. – P. 22 – 30.

The article considers general (conceptual) approach to establishing the unified integrated indicator qualitatively and quantitatively reflecting the safety of the ship as a complicated technical system. The implementation of this integrated indicator makes it possible to create a unified platform for aligning positions of the designer, ship customer, classification society and insurance company at all stages of the ship's life. It is reasonable to use the integrated safety indicator at early stages of ship design when main architectural and structural design options are discussed. This allows to improve the quality of designs and, thus, to increase their competitiveness. The approaches to quantitative assessment of the integrated ship safety indicator are presented and analysed in the article.

UDC 629.561.5;565.61:551.326

V.I. Dmitriev, E.M. Shatsberger To Ensure the Effectiveness and Safety of Transport Ship Navigation in the Arctic // Transactions of Russian Maritime Register of Shipping. – Issue 31. – 2008. – P. 31 – 41.

The article puts forward the idea to increase the efficiency of using the Northern Sea Route as a West-East transport corridor on the basis of existing nuclear icebreakers and the new tactics of transport ship piloting at maximum permissible speed. The study shows that the way of solving the problems of the Northern Sea Route further functioning by means of increasing the icebreaker power is exhausted, and further development of navigation in the Arctic lies in the implementation of human factor potential. Proposals for increasing the efficiency and safety of transport ship ice navigation are presented.

UDC 620.165.29:629.5

V.M. Kuzavkov, V.P. Egorov, V.P. Rydlovsky, V.V. Shtaits Research and Development of the Norms for Local Tightness Control of the Airtight Circuit Joints of Containment Shell Elements in Ships and Floating Facilities Equipped with Nuclear Steam Generated Plants // Transactions of Russian Maritime Register of Shipping. – Issue 31. – 2008. – P. 42 – 58.

The article considers the issues related to tightness tests of the containment shells of nuclear steam generating plants, the nomenclature of standard elements of the containment shell airtight circuit and norms of their testing are elaborated, the tightness norm for airtight circuit elements is defined. As a result, the calculation procedure for the airtight circuit element test norm, testing methods for cables and arrangements, sealing methods for cable and conductor passages are introduced. The above methods are recommended to integrate into the Rules for the Classification and Construction of Nuclear Ships and Floating Facilities published by Russian Maritime Register of Shipping.

UDC 629.12.01

V.M. Bure, D.A. Grubov, E.M. Parilina, V.N. Tryaskin Application of Risk Assessment Methods to the Analysis of Ship Equipment Operation at Low Temperatures // Transactions of Russian Maritime Register of Shipping. – Issue 31. – 2008. – P. 59 – 68.

The article considers the issues of application of formal safety assessment (FSA) methods during development and improvement of Russian

Maritime Register of Shipping requirements to ships intended for operation under low temperatures. It is emphasized that due to the lack of statistic data on ship equipment failures caused by low temperatures the application of FSA is possible using expert appraisal method. An approach to classification of objects at risk is specified and a mathematical model for the expert information processing is suggested.

UDC 629.12.011

V.I. Evenko, D.A. Grubov, V.N. Tryaskin Development of Russian Maritime Register of Shipping Requirements for Ships Intended for Operation under Low Temperatures // Transactions of Russian Maritime Register of Shipping. – Issue 31. – 2008. – P. 69 – 80.

The article considers the up-to-date international requirements for ships to ensure their long-term service in the Arctic and Antarctic. The approach of Russian Maritime Register of Shipping to the development of requirements for ships with **ANTI-ICE** and **WINTERIZATION** distinguishing marks in the class notation is set forth, the above requirements will be introduced into the RS Rules, 2008-2009, as well as the structure of requirements being developed is presented.

UDC 629.12

V.I. Evenko, M.A. Kuteinikov, A.V. Didkovsky, E.M. Appolonov, Yu.A. Simonov, R.Yu. Romanov Arctic Gas Carrier Design // Transactions of Russian Maritime Register of Shipping. – Issue 31. – 2008. – P. 81 – 92.

Ships intended for liquefied natural gas transportation from the Arctic shall ensure a year-round scheduled traffic. In designing such ships, two main criteria: safety and cost efficiency shall be taken into consideration.

The article presents the main research trends when developing the requirements for arctic ships carrying liquefied natural gas.

Proceeding from the analysis of research guidelines required for the design of the above ships, a conclusion is made on the necessity of applying not only traditional and well-tried solutions, but on the practicability of implementation of modern innovations which make it possible to enhance the safety and cost efficiency of the said ships operation. Research for

establishing the scientific-and-technical basis for the design of promising arctic gas-carriers will ensure the reliability and safety of Russian gas delivery in future to consumers all over the world.

UDC 629.5.035.55.017:629.561.5

E.B. Karulin, M.M. Karulina, V.A. Belyashov, I.M. Belov Evaluation of Alternating Loads Acting on the Propeller due to Interaction with Ice // Transactions of Russian Maritime Register of Shipping. – Issue 31. – 2008. – P. 93 – 106.

The alternating ice loads acting on the propeller blades of icebreakers and ice ships during their navigation in ice are one of the reasons for the fatigue damage to the propulsion system, as well as for the increase of hull vibrations. The article considers the approach of the Krylov Shipbuilding Research Institute to determination of the ice thrust pulsations and propeller torque due to interaction with ice, as well as the spectral structure of these loads. A complex approach includes three research trends: use of a theoretical model and two types of simulation tests to be conducted in the ice model basin – simulation of ice milling by the propeller and the ship hull model towage in ice with the propellers rotating. Each trend supplements the general picture of the complicated process under investigation. As an example of possible application of research results, the calculations of ice ship hull vibration were made which showed that the alternating ice loads acting on the propeller may result in a 3-4 times increase of general hull vibration during ship navigation in ice.

UDC 629.12

E.M. Appolonov, A.V. Didkovsky, M.A. Kuteinikov, A.B. Nesterov, E.A. Shishenin Damaged Strength Assurance for Large Arctic Gas Carriers under Non-standard Scenarios of Interaction with Ice // Transactions of Russian Maritime Register of Shipping. – Issue 31. – 2008. – P. 107 – 128.

The article presents the parameter determination methodology for non-standard (emergency) scenarios of interaction with ice (direct or reflected ice impact) allowing to obtain the initial data for ice load calculations in

order to verify the structural safety of LNG independent tanks. The ice load parameters may be defined by using the existing programs realizing the algorithm of hydrodynamic ship model impact against ice.

Consideration is given to nipping loads. The use of a calculation model taking into account the vertical localization of contact area due to partial destruction of lower ice layers having lower strength determines design nipping loads.

Research into the peculiarities of severe plastic deformation of double bottom structures under ice loads makes it possible to specify the procedure for evaluating the results of emergency and non-standard scenario realization in respect of arctic gas carrier hulls.

UDC 629.54

E.M. Appolonov, A.B. Nesterov, O.Ya. Timofeev Regulation of Ice Loads Acting on the Vertical Side of a Ship Nipped in Ice // Transactions of Russian Maritime Register of Shipping. – Issue 31. – 2008. – P. 129 – 146.

The article presents the methodology for regulating the ice loads on the vertical side of a ship nipped in ice, taking into consideration the ice compression strength distributed non-uniformly through thickness in the direction parallel to the ship side surface.

As compared to methods used before, the presented method of ice load modelling during vertical side of a ship nipped in ice suggests ice destruction by bending. The method accounts for the finiteness of load area length and assignment of a load area height less than the ice thickness. The design data show satisfactory coincidence with the data set in the “ice pressure – load area” coordinates.

Further improvement of the model requires a model test of large ship side structures to be followed by a full-scale test.

UDC 921.791.05:539.4

A.V. Ilyin, V.P. Leonov, B.Yu. Filin Development of the Procedure for Brittle Fracture Resistance Assessment in Welded Structures to Be Used on the Arctic Shelf // Transactions of Russian Maritime Register of Shipping. – Issue 31. – 2008. – P. 147 – 175.

Design assessment of resistance to brittle fracture is one of the mandatory elements of marine structure accident-free operation on the northern shelf, as stipulated by the international standards and specifications. In view of construction of fixed offshore platforms and mobile offshore drilling units for the Arctic shelf where the environmental conditions are characterized by extremely low design temperatures and the possibility of intensive ice loading, the necessity for such assessments is growing. However, presently there are no national normative documents which contained requirements that would cover welded non-heat treatable structures and would meet the international standards. The article presents proposals on the basic procedures for such calculations with a brief substantiation.

UDC 669.14.018.41:621.78

E.I. Khlusova, A.A. Kruglova, V.V. Orlov, V.A. Suvorikov, V.K. Bashaev Application of Thermomechanical Strengthening Technology to Higher Strength Steel Grades FW and F32W with a Yield Stress of 235-315 MPa and Thickness up to 50 mm by OAO Severstal Cherepovets Steel Rolling Mill // Transactions of Russian Maritime Register of Shipping. – Issue 31. – 2008. – P. 176 – 188.

The article describes the manganese steel production technology that provides cold resistance of steel up to minus 50 °C, and analyses phase changes in steel and the influence of main process variables upon the composition and properties formation in rolled sheet up to 50 mm thick. Proceeding from test results the mechanism of steel grades FW and F32W properties formation under thermomechanical treatment is determined.

The research allows to make a conclusion on the suitability of the above steel grades and their production technology for arctic facility construction.

UDC 669.14.018.41:620.17

V.A. Malyshevsky, E.I. Khlusova, A.V. Ilyin, V.K. Bashaev Complex Assessment of the Performance Efficiency of New Cold-resistant Steel Grades with a Yield Stress of 235-690 N/mm² and Intended for Arctic Structures // Transactions of Russian Maritime Register of Shipping. – Issue 31. – 2008. – P. 189 – 208.

The article presents the results of the efficiency assessment (mechanical properties and isotropy, particularly under negative temperatures, type of fracture, critical brittleness temperatures, corrosion-mechanical resistance, weldability, crack resistance, cyclic loading resistance) of rolled sheet 20-30 mm thick and welded cold-resistant steel after thermomechanical treatment conducted in accordance with the programs of Russian Maritime Register of Shipping that prove their compliance with national and international requirements for steel grades to be used for arctic ships as well as for hydrocarbon exploration and production equipment.

The conventional steel grades and technologies have been mastered by the largest Russian plants, namely, CherMK OAO Severstal and OOO "OMZ-Spezstal", have ensured the construction of ice-resistant fixed offshore platform "Prirazlomnaya", self-elevating mobile offshore drilling unit "Arcticheskaya" as well as the "MOSS" multi-functional platform series for Norway, and they are in great demand at Russian and international market.

UDC 621.791.725:629.12.011

V.V. Rybin, M.M. Pronin, V.N. Startsev, V.P. Leonov Laser Welding Procedure for the Honeycomb Elements of Ship Structure and Performance Efficiency Assessment // Transactions of Russian Maritime Register of Shipping. – Issue 31. – 2008. – P. 209 – 218.

The application of lightweight honeycomb panels as the elements of ship structure results, with equal bearing capacity, in 20-30 per cent reduction in weight and material consumption as compared to traditional structures, and the application of laser welding makes the manufacturing of honeycomb structures processable and effective. The CRISM (Central Research Institute of Structural Materials) "Prometey" has developed a sequential series of welding procedures for laser and arc-laser welding providing the possibility of manufacturing honeycomb panels and ship structure components assembled thereof.

UDC 621.431.74.004:621.43-53

V.A Shishkin, M.Yu. Ivanov, S.A. Kravchenko Improvement of IASC Requirements for Diesel Engine Testing // Transactions of Russian Maritime Register of Shipping. – Issue 31. – 2008. – P. 219 – 233.

Proceeding from the participation of the representatives of Russian Maritime Register of Shipping in the work of IACS Machinery Panel, the RS should define its position on the IACS Unified Requirements amendments in this field including diesel engine testing. Based on the contrastive analysis of the requirements of Classification societies and IACS Unified Requirements for diesel engine testing, the article suggests ways and specific decisions for improvement of the testing taking into account rapid informatization, methods and procedures of non-destructive testing and electronic control systems for main and auxiliary engines of sea-going ships.

UDC 629/12-233/12

L.V. Efremov, M.Yu. Ivanov Peculiarities of Torsional Vibrations in Electrically Driven Azimuth Thrusters // Transactions of Russian Maritime Register of Shipping. – Issue 31. – 2008. – P. 234 – 244.

The article presents the research results of the peculiarities of torsional vibrations development and calculation in electrically driven azimuth thrusters and proves the efficiency and generality of the new MATHCAD program being specially worked out for the calculation expertise performed by the Register.

Preceding from the review of “Vulkan” company reports it has been ascertained that the critical parameters of torsional vibrations for azimuth thrusters are not stresses in shafts, but elastic moments in flexible coupling and toothings, as well as power loss for heating the flexible coupling rubber. Besides, the harmonic disturbance torques of the first and second blade order coming from the propeller and reduced to the electric motor speed shall be considered.

Other peculiarities of azimuth thruster calculations are as follows: introducing of zero masses and infinite liquids (zero compliance) to the scheme of gyrating mass system to evaluate the load on spline drives and toothings; algebraic vector summation of oscillations of different orders at zero values of phase displacement, free motion calculation using HOLZER analysis, etc.

The said peculiarities were considered in the development of a new program using HOLZER analysis carried out in MATHCAD. Comparison of calculation results provided by this program with data submitted by the firms have demonstrated a satisfactory agreement not only between free motion parameters, but also between load amplitudes in the system elements due to cavity and forced oscillations of blade orders. This indirectly

proves the correctness and universality of the damping accounting concept for system elements, as stipulated by the new program.

UDC 629.5.062:621.565.952

E.G. Orlova, V.K. Shurpyak Efficiency Assessment of Ship Cooling Systems Equipped with Box Coolers // Transactions of Russian Maritime Register of Shipping. – Issue 31. – 2008. – P. 245 – 259.

The article reviews the tendencies of development of cooling system on board RS-classed ships. The efficiency assessment of ship cooling systems equipped with box coolers is considered. A mathematical heat transfer model for box coolers located in sea chests is presented, sea chest parameters affecting the heat transfer rate are determined. A procedure is suggested for evaluating the heat power of box coolers at a rated load of engine depending on seawater temperature, based on mooring test or sea trials results obtained on a partially loaded engine. Results of the thermo-technical tests of sea chest cooler on ship equipped with CPP (controllable-pitch propeller) and two-circuit cooling system are given, the said tests are carried out for the purpose of an experimental check and refinement of the mathematical model obtained. Preceding from the conclusions given in the article, proposals for changes to the RS requirements for systems using box coolers may be formulated.

UDC 629.7.067.8; 629.5.011:061.6

V.T. Aksenov Explosion Prevention Measures Applicable on Oil and Chemical Tankers Carrying Cargoes with Low Flash Points (Installation of Inert Gas Systems in the Cargo Tanks of Tankers with Deadweight Below 20 000 t) // Transactions of Russian Maritime Register of Shipping. – Issue 31. – 2008. – P. 260 – 270.

Lately, adopting amendments to SOLAS-74 Convention covering the requirement for a stationary inertisation system of cargo tanks provided on oil and chemical tankers with deadweight below 20 000 t has been widely discussed by the IMO Maritime Safety Committee and a number of its Subcommittees. The article is devoted to the history and current status of this matter as well as to the range of problems connected thereto.

UDC 621.316:629.12.06.001.4

A.V. Grigoriev Unified Electric Power Plant Installed on Board the Small Hydrographic Ship Vaigach: Design Experience and Test Results // Transactions of Russian Maritime Register of Shipping. – Issue 31. – 2008. – P. 271 – 278.

The article presents the results of computer simulation, bench tests and sea trials of the first unified electric power plant equipped with an alternating current electric propulsion system and installed on board the small hydrographic ship Vaigach.

The commissioning of the small hydrographic ship Vaigach, pr. 19910, marked the start of obsolete hydrographic ships and motor boats being replaced by modern ones ensuring more efficient navigation and hydrographic support of shipping on the Russian Federation seaways.

High technical specifications of the newly designed unified electric power plant equipped with an alternating current electric propulsion system have been confirmed by the results of simulation and testing of the unified electric power plant with an electric propulsion system as installed on board the Vaigach.

UDC 629.5.065.23:681.586.7

V.B. Vikulin, N.E. Zhadobin, V.B. Machulsky Overload Ship Crane Limiters Provided with Magnetoelastic Converters // Transactions of Russian Maritime Register of Shipping. – Issue 31. – 2008. – P. 279 – 284.

The article considers RS requirements for the overload limiters of ship cranes; problems related to the development of overload limiters with required accuracy and response speed are described; ways of solving the above problems are shown and examples of overload limiters provided with magnet-anisotropic converters and finite pulse characteristic filters are given.

UDC 629.5.064

M.A. Subaev, A.P. Krylov, V.B. Machulsky Selection of Main Components and Their Parameters for Electric Propulsion Plants // Trans-

actions of Russian Maritime Register of Shipping. – Issue 31. – 2008. – P. 285 – 289.

Preceding from the analysis of electric propulsion plant long-term operation and relevant calculations, recommendations are given for the selection of electric propulsion motors, their main parameters, frequency converters supplying electric propulsion motors and cooling systems of main electric machines of the electric propulsion plant, which may be taken into consideration both during the construction of new ships equipped with electric propulsion plants and during the modernisation of such plants on board the ships in service.

Recommendations for selecting the insulation class for electric machine, its calculated non-failure operating time, as well as the structural design of electric machine cooling systems of electric propulsion plant are presented.

UDC 621.39

A.N. Pivovarov, V.G. Mikhailov Stages of Ship Security System Implementation // Transactions of Russian Maritime Register of Shipping. – Issue 31. – 2008. – P. 290 – 295.

The article considers the stages of ship security system implementation under the provisions of the ISPS Code (the International Ship and Port Facility Security Code), Federal Law “On Transport Safety” and other normative documents. The authors describe such important issues as the possible threats analysis, technical security equipment design, assembly works, start-up and commissioning works, and equipment operation by the customer, post-warranty service. They also present the algorithm of technical security equipment design stages.

The stated materials are considered to be informative for marine industry experts dealing with the safety of marine facilities.

UDC 629.5.073.5:621.396.969.33:268

V.V Afanasiev, A.N. Marinich, Yu.M. Ustinov Negative Influence of Adverse Weather Conditions on Radar Station Operation Along the Northern Sea Route // Transactions of Russian Maritime Register of Shipping. – Issue 31. – 2008. – P. 296 – 301.

The article contains a comparative analysis of the negative influence of adverse weather conditions, namely, fogs and snowstorms, on the operation of S, X, K-band radar stations in the Arctic.

UDC 632.153; 341.161; 094.2

A.A. Sergeev, V.V. Grishkin The IMO's Maritime Environment Protection Committee Activities // Transactions of Russian Maritime Register of Shipping. – Issue 31. – 2008. – P. 302 – 309.

The article is written following the work of the 57-th session of the Maritime Environment Protection Committee and contains a review of the session resolutions concerning adoption of revised Annex VI to MARPOL 73/78 and the NOx Technical Code (The Technical Code on Control of Emissions of Nitrogen Oxides from Marine Diesel Engines), concerning the consideration and approval of interpretations and amendments to MARPOL 73/78, as well as the measures aimed at reducing greenhouse gas emissions from ships, concerning the transfer of harmful aquatic organisms and pathogens in the ship's ballast water and many other issues of maritime environment and air protection.

The IACS position on particular resolutions of the session is stated in the article.

Российский морской регистр судоходства

Научно-технический сборник, вып. 31

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 17.11.08. Формат 60 × 84 1/16. Гарнитура Гельветика.

Усл. печ. л.: 19,5. Уч.-изд. л.: 22. Тираж 300. Заказ 2351.

Российский морской регистр судоходства
191186, Санкт-Петербург, Дворцовая набережная, 8

Тел.: (812) 312-89-59

Факс: (812) 312-89-86