

РОССИЙСКИЙ МОРСКОЙ



РЕГИСТР СУДОХОДСТВА

НАУЧНО- ТЕХНИЧЕСКИЙ СБОРНИК

ВЫПУСК

33

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ

2010

Редакционная коллегия Российского морского регистра судоходства:

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

Н.А. Решетов

УЧАСТИЕ РОССИЙСКОГО МОРСКОГО РЕГИСТРА СУДОХОДСТВА В ОСВОЕНИИ НЕФТЕГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ НА ШЕЛЬФЕ КАСПИЙСКОГО МОРЯ: НАСТОЯЩЕЕ И БУДУЩЕЕ

1. Геологоразведочные работы

В 1995 г. ОАО «ЛУКОЙЛ» начало масштабные исследования на шельфе Северного Каспия. Данное стратегическое решение о выходе в новый малоисследованный район с высокими геологическими рисками и неоднозначными перспективами было принято на основании анализа большого объема научно-исследовательских работ. В 1999 г. после проведения геологоразведочных работ компания приступила к разведочному бурению в северной части Каспийского моря с помощью самоподъемной плавучей буровой установки «АСТРА», техническое наблюдение за которой по требованиям международных конвенций выполняет Российский морской регистр судоходства (Регистр). СПБУ «АСТРА» (ранее – «MARAWAN»), построенная в 1983 г. по проекту BMC-150H на верфи Nippon Kokan Shipbuilding в Японии, имеет класс ABS. В 1998 – 1999 гг. данная СПБУ была переоборудована с целью смены ее назначения: если ранее она предназначалась для ремонта эксплуатационных скважин, то после переоборудования – для бурения разведочных скважин. В 2000 г. Регистр завершил первоначальное освидетельствование СПБУ с целью выдачи на нее конвенционных документов.

В результате проведенного СПБУ «АСТРА» разведочного бурения были открыты шесть крупных многопластовых месторождений углеводородного сырья на шельфе северной части Каспийского моря (месторождение им. Ю. Корчагина, месторождение им. В. Филановского, «Хвалынское», «Ракушечное», «Сарматское» и «170 км») и выявлено 14 перспективных структур. Стоит отметить беспрецедентную эффективность проведенных работ – каждое месторождение было открыто при бурении первой же поисковой скважины. С тех пор ОАО «ЛУКОЙЛ»

рассматривает работу на шельфе Каспийского моря как приоритетное направление в своем развитии. Суммарные извлекаемые запасы данных месторождений оцениваются специалистами более чем в 1,5 млрд т условного топлива.

Основные запасы нефти сосредоточены на месторождении им. В. Филановского (170 млн т) – самом крупном из разведанных в России за последние 10 лет, а основные запасы газа – на месторождении «Хвалынское» (322 млрд м³). Месторождение им. В. Филановского находится на участке «Северный» в 220 км от Астрахани. Из первой же разведочной скважины на данном месторождении был получен фонтанный приток легкой безводной малосернистой нефти дебитом более 800 т/сут. Такие дебиты в России известны только на единичных скважинах (средний дебит по России составляет 10,5 т/сут). Нефть составляет 75 % суммарных запасов месторождения. Новое месторождение было названо в честь Владимира Филановского – известного нефтяника, внесшего большой вклад в развитие нефтегазовой отрасли страны.

Таким образом, в российской части Каспийского моря открыта стратегически важная нефтегазоносная субпровинция. Для ее эффективной разработки в самое ближайшее время будут созданы крупные материально-технические базы, учебные центры, построены десятки объектов для обустройства месторождений, созданы тысячи новых рабочих мест, построен ряд береговых сооружений. Судостроительные верфи региона получают заказы на строительство морских судов, промышленные предприятия – на выпуск материалов и изделий для обеспечения строительства этих объектов. Регистр готов оказать комплекс услуг для выполнения задач по обеспечению безопасности данных объектов – это и классификация, и техническое наблюдение, и сертификация продукции, материалов, производств, технологических процессов, и выполнение функций сертификационного агента, и многие другие услуги, востребованные на современном рынке. Хорошим примером возможностей Регистра стало его тесное сотрудничество с ОАО «ЛУКОЙЛ» при обустройстве первого месторождения на Северном Каспии – месторождения им. Ю. Корчагина.

2. Строительство морских сооружений для месторождения им. Ю. Корчагина

Месторождение им. Ю. Корчагина, располагающееся в 180 км от Астрахани, стало первым в Северном Каспии, на котором ОАО «ЛУКОЙЛ» начало добычу нефти. Первая нефть на этом

месторождении была получена 28 апреля 2010 г. Глубина моря в районе добычи составляет 11 – 13 м. Месторождению было присвоено имя бывшего председателя совета директоров ОАО «ЛУКОЙЛ» Юрия Корчагина.

В состав объектов обустройства месторождения вошли:

ледостойкая морская стационарная платформа с буровым и технологическим комплексом (ЛСП-1);

ледостойкая морская стационарная платформа с жилым модулем (ЛСП-2),

переходной мост между ЛСП-1 и ЛСП-2;

морской перегрузочный комплекс (МПК), состоящий из точечного причала (ТП) и соединенного с ним плавучего нефтехранилища (ПНХ) «ЮРИЙ КОРЧАГИН»;

подводный трубопровод, соединяющий ЛСП-1 и МПК.

Нефть (с конденсатом) с месторождения в объеме до 2,5 млн т в год будет транспортироваться челночными танкерами в порт Махачкала и далее транспортироваться по нефтепроводу «Баку – Новороссийск».

На предварительном этапе проекта Регистр участвовал в работе по обоснованию инвестиций и экспертизе технического задания на проектирование, а также по рассмотрению технико-экономического обоснования проекта первой очереди обустройства месторождения. В процессе строительства объектов Регистр оказывал целый комплекс услуг, в который вошли:

классификационные услуги по рассмотрению рабочей конструкторской документации и техническому наблюдению за постройкой ЛСП-1, ЛСП-2, ПНХ «ЮРИЙ КОРЧАГИН», подводного трубопровода;

услуги в качестве сертификационного агента по контролю качества при выполнении работ по реконструкции и постройке ЛСП-1, ЛСП-2, ТП;

техническое наблюдение за выполнением морских операций, связанных с установкой объектов обустройства в заданных координатах на месторождении;

освидетельствование материалов и изделий.

2.1 Строительство ЛСП-1

В рамках обустройства месторождения им. Ю. Корчагина в сентябре 2004 г. было принято решение об использовании недостроенной буровой платформы для строительства ЛСП-1, предназначенной для бурения и эксплуатации скважин, а также для сбора и полной подготовки пластовой продукции до товарной кондиции. В ходе обследования ее базового полупогружного несущего корпуса на заводе ОАО «Астра-

ханский корабел», проведенного при участии специалистов Регистра, было выявлено, что он находится в хорошем состоянии и может эксплуатироваться в течение еще 30 лет. После демонтажа устаревшего оборудования началась модернизация платформы, техническое наблюдение за которой также производилось специалистами Регистра. По ее бортам были установлены четырнадцать направляющих для свай, в которых впоследствии были зацементированы стальные опоры платформы, надежно фиксирующие ее на морском дне. Затем была смонтирована ледовая защита (платформе предстоит работать на мелководье в условиях сложной ледовой обстановки, т. к. месторождение им. Ю. Корчагина расположено в зоне замерзания Каспийского моря), которая устроена по принципу рубанка – лед, проходя через нее, будет закручиваться в гигантскую стружку. Также на ЛСП-1 были построены четыре сложнейших технологических комплекса, обеспечивающих энергоснабжение, бурение, подготовку нефти, газа, воды и транспортировку товарных углеводородов. Все работы, связанные с модернизацией ЛСП-1, подвергались также и контролю качества со стороны Регистра, который, согласно заключенному договору с ОАО «ЛУКОЙЛ», осуществлял функции сертификационного агента. Эта относительная новая услуга Регистра была в короткие сроки разработана, внедрена и оказана с положительными отзывами от клиентов Регистра.

Масштабы произведенных работ действительно впечатляют. К примеру, только кабельных трасс на платформе проложено около 600 км, а для функционирования бурового и эксплуатационного комплексов смонтировано почти 700 единиц основного и 170 000 единиц вспомогательного оборудования. На ЛСП-1 установлен буровой комплекс грузоподъемностью 560 т для бурения скважин с максимальной длиной по стволу до 7400 м (количество скважин – 33). Длина платформы составляет 95,5 м, ширина – 72,2 м, высота ЛСП-1 от уровня моря – 86,6 м, масса платформы при стоянке на грунте с жидким балластом – 25 655 т. Всего на месторождении с помощью ЛСП-1 планируется пробурить 26 добывающих скважин, 3 водонагнетательных и 1 газонагнетательную.

2.2 Строительство ЛСП-2

Около года на заводе по производству строительных металлоконструкций ООО «ЛУКОЙЛКалининградморнефть» под техническим наблюдением Регистра шел монтаж модулей ЛСП-2 – платформы с жилым блоком. Все работы были завершены точно по плану, и в начале сентября прошлого года была осуществлена транспортировка четы-

рехэтажного «дома», рассчитанного на проживание 105 чел., а также вертолетной площадки и переходного моста. Строительно-монтажные единицы ЛСП-2 были отгружены на баржи в Калининграде и доставлены по внутренним водным путям в Астрахань. Здесь на площадке Астраханского судостроительного производственного объединения, также при непосредственном участии РС, была проведена сборка модулей жилого строения, а также смонтирован опорный блок ЛСП-2. Высота ЛСП-2 от уровня моря составляет 38 м, длина – 41,5 м, ширина – 40,2 м, автономность – 15 сут.

2.3 Морской перегрузочный комплекс

В состав МПК, предназначенного для загрузки нефтью танкеров-челноков с целью ее дальнейшей транспортировки на берег, входят ТП и ПНХ. Опорное основание ТП было смонтировано в Астрахани, а верхнее строение изготовлено в Нидерландах. Высота ТП от уровня моря составляет 27,2 м, масса – 1725 т. В августе 2009 г. ТП был установлен на заданной точке в Каспийском море.

Работы по строительству ПНХ начались в 2006 г. на верфи Keppel Singmarine в Сингапуре. После спуска на воду корпус судна был разделен на две части для обеспечения возможности его прохода по Волго-Донскому каналу и далее – по Волге, в Каспийское море, в Баку. В Азербайджане на верфи Keppel Singmarine в Баку осуществили сборку конструкций и дооборудование объекта. ПНХ представляет собой нефтеналивное судно с двойным дном и двойными бортами, машинно-котельным отделением, жилой надстройкой и вертолетной площадкой. Дедвейт ПНХ составляет 28 000 т, длина – 132 м, ширина – 32 м, высота борта – 15,7 м, экипаж – 25 чел.

12 сентября 2009 г. ПНХ было отбуксировано из Баку и смонтировано в заданных координатах с ТП в единый МПК. В свою очередь, ТП был соединен с ЛСП-1 подводным трубопроводом протяженностью 58 км. Далее, под техническим наблюдением РС, были проведены совместные испытания ПНХ и ТП на конструктивную надежность – в частности, вращение ПНХ вокруг ТП на 360°. Наличие поворотного устройства позволяет МПК избегать дополнительных нагрузок под воздействием сильных ветров и морских течений и обеспечивать бесперебойную отгрузку нефти на танкеры. В июле 2010 г. ОАО «ЛУКОЙЛ» обратилось в Регистр с предложением взять под техническое наблюдение и присвоить класс Регистра всему МПК.

2.4 Подводный трубопровод

22 мая 2008 г. в акватории Северного Каспия было завершено строительство первого объекта обустройства месторождения им. Ю. Кор-

чагина – морского подводного трубопровода, который предназначен для транспортировки нефти от добывающей ЛСП-1 к ТП.

Впервые строительство подводного нефтепровода проводилось под техническим наблюдением Регистра. Подводный трубопровод имеет диаметр 325 мм, протяженность – 56,237 км. В соответствии с проектной документацией была принята технологическая схема укладки нефтепровода без заглубления в донный грунт. Трубопровод построен на класс Регистра: **SP ⊗ L1 Caspian Sea Crude Oil 5.0 MPa 60 °C 325/1**.

Трубы для нефтепровода были изготовлены на ОАО «Волжский трубный завод», г. Волгоград, под техническим наблюдением и с оформлением свидетельств Регистра.

Укладка подводного нефтепровода осуществлялась с трубоукладочного судна (ТУС) «ИСРАФИЛ ГУСЕЙНОВ», монтаж производился из готовых к укладке изолированных в заводских условиях труб длиной 10,5 – 12,3 м.

Строительство нефтепровода осуществлено компанией «McDermott Caspian Contractors, Inc.» по заказу ООО «ЛУКОЙЛ-Нижневолжскнефть» – дочерней компании ОАО «ЛУКОЙЛ». Разработка рабочей документации выполнена ООО «ЛУКОЙЛ-ВолгоградНИПИморнефть» в соответствии с Правилами классификации и постройки морских подводных трубопроводов, изд. 2003 г.

В процессе укладки подводного трубопровода инспекторами Регистра с помощью установленных на каждом посту видеокамер проводился мониторинг выполнения работ в соответствии с принятым технологическим процессом, а также осуществлялся периодический контроль непосредственно на производственной линии (проверка состояния изоляции трубопровода, выполнение контроля неразрушающими методами, проверка усиления сварочного шва, проверка температуры нагрева стыка перед нанесением термоусадочной манжеты, проверка приварки накладных пластин протекторов, проверка термоусадочной манжеты на адгезию). По результатам этого процесса Регистр получил отличные отзывы о профессионализме и качестве своей работы как от компании «McDermott Caspian Contractors, Inc.», так и от ОАО «ЛУКОЙЛ».

2.5 Морские операции

Наиболее активно ОАО «ЛУКОЙЛ» приступило к проведению морских операций весной 2009 г. Все морские операции, связанные с обустройством месторождения им. Ю. Корчагина, осуществлялись под техническим наблюдением Регистра. 24 апреля из Астрахани на-

чалась буксировка опорного блока ЛСП-2. Конструкция весом 1340 т была спущена на воду и с помощью буксиров доставлена на точку установки, заполнена водой и зафиксирована на дне моря пятнадцать сваями. 17 мая специалисты ОАО «ЛУКОЙЛ» приступили к транспортировке верхнего строения ЛСП-2. Накануне была проведена сложнейшая операция по погрузке жилого блока на баржу. С помощью морского плавкрана грузоподъемностью 1600 т верхнее строение было приподнято над пирсом. Затем в ходе сложных маневров с участием четырех буксиров под жилой блок была подведена баржа, на которую огромная конструкция была опущена с высокой точностью. А уже 23 мая в ходе не менее сложной производственной операции жилой блок был успешно установлен на опорное основание в море. Таким образом, на Северном Каспии появился первый стационарный российский нефтегазовый объект.

Следующим значимым событием в рамках проведения морских операций стала транспортировка и установка на заданной точке в море ТП, входящего в состав МПК. 18 июля его опорное основание было погружено на баржу и отправлено к месту установки в Каспийском море. Неблагоприятные погодные условия несколько задержали выполнение операции по его установке. Но в итоге в начале августа ТП был закреплен на дне пятью сваями. А 11 июля на него было установлено верхнее строение.

Немногом ранее, 27 июля, из Астрахани началась транспортировка на море главного производственного объекта обустройства месторождения им. Ю. Корчагина – ЛСП-1. Выводу платформы предшествовали масштабные дноуглубительные работы на Волго-Каспийском канале. И все же, чтобы провести такой огромный объект по очень сложному фарватеру, потребовались максимум умения и предельная концентрация капитанов и экипажей буксиров, а также скоординированные действия различных структур: Регистра, служб морского порта, таможни, пограничной службы, энергетиков и многих других. В результате ЛСП-1 была успешно доставлена в море, а 16 августа – установлена в точке с заданными координатами. 24 августа ЛСП-1 и ЛСП-2 были соединены 74-метровым переходным мостом.

3. Строительство морских сооружений для других месторождений

Интерес к разработке нефтегазовых месторождений, помимо ОАО «ЛУКОЙЛ», проявляют и другие компании. Это и ООО «Петро-ресурс», занимающееся разведкой Лаганского месторождения при

помощи морского бурового комплекса, и ООО «Каспийская нефтяная компания» (собственник плавучей буровой установки «ЧИЛИМ», построенной в 2008 г. и предназначенной для бурения в безледовый период поисково-оценочных скважин в прибрежной морской акватории на глубинах от 2 до 10 м на Северном Каспии («Западно-Ракушечная»)), и ОАО «Нефтяная компания «Роснефть» (собственник ПБУ «ИСПОЛИН», переоборудованной в Астрахани в 2006 г. из кранового судна). Данная заинтересованность стимулирует развитие судостроительной отрасли в Астрахани. Вышеназванные объекты для разведки нефтегазовых месторождений были построены или переоборудованы на судостроительных предприятиях в 2006 – 2008 гг. при непосредственном участии Регистра.

3.1 Морской буровой комплекс

В 2008 г. Регистром проведено техническое наблюдение за переоборудованием морского бурового комплекса проекта 17289, предназначенного для разведочного бурения скважин на шельфе Северного Каспия севернее параллели 44° 30' с.ш., для разработки Лаганского углеводородного месторождения на глубинах 1,7 – 5,0 м.

Базовый элемент комплекса – самоподъемная плавучая буровая установка (СПБУ) с установленными на ней: мобильной буровой установкой МБУ-3 на базе установки HRI-700 компании Heartland Rig International (для бурения скважин до 3000 м), дизель-генератором 200 кВт и другим буровым оборудованием. СПБУ соединена съемными консолями с самоподъемной вспомогательной платформой (СПВ), на которой установлены: дизель-генераторы мощностью 200 кВт и 320 кВт, буровые емкости для бурового раствора, шланготранспортер и другое буровое оборудование.

Вокруг СПБУ и СПВ установлены пришвартованные к забитым сваям вспомогательный, испытательный и эвакуационный понтоны.

3.2 Плавучая буровая установка «ЧИЛИМ» проекта P5195

В 2008 г. Регистром проведено техническое наблюдение за постройкой специального плавучего основания проекта P5195 «ЧИЛИМ». ПБУ построена на ОАО ССЗ «Красные Баррикады» (г. Астрахань) для ООО «Каспийская нефтяная компания» на класс Регистра: **KE Ⓢ 1 R3 Pontoon for technological services**. Технический проект для данного объекта был разработан ОАО «РЦПКБ «Стапель» и одобрен в Главном управлении Регистра.

3.3 Плавучая буровая установка «ИСПОЛИН»

В 2006 г. под техническим наблюдением Регистра была произведена модернизация кранового судна «ИСПОЛИН» в плавучую буро-

вую установку, предназначенную для разведочного бурения скважин глубиной до 3000 м на глубинах моря около 3,8 – 4,5 м. При бурении скважин дооборудованное судно используется в качестве погружного бурового объекта с постановкой на грунт. ПБУ представляет собой судно-катамаран с надстройкой в носовой части на левом корпусе, основным краном грузоподъемностью 1200 т в средней части на левом корпусе, блоками технологического оборудования и буровой установки в кормовой части судна, блоками электрооборудования на правом корпусе, с поддерживающим понтоном. ПБУ «ИСПОЛИН» имеет класс Регистра: **KE ⊗ 1 AUT2 MODU submersible**.

4. Перспективы строительства

15 октября 2009 г. Регистром и ОАО «ЛУКОЙЛ» было подписано соглашение о сотрудничестве. Документ предусматривает дальнейшее развитие сотрудничества в области проектирования и строительства технологического флота и транспортного оборудования. В сферу взаимных интересов включены также вопросы обеспечения безопасности обустройства морских нефтегазовых месторождений.

ОАО «ЛУКОЙЛ» подготовило несколько вариантов развития и обустройства месторождений на Северном Каспии.

Предусмотрен вариант «умеренного» развития, при котором до 2017 г. планируется ввод только первой очереди обустройства месторождения им. В. Филановского в составе ЛСП-1, плавучего жилого модуля (ПЖМ-1), центральной технологической платформы (ЦТП), райзерного блока, трубопроводов внешнего транспорта нефти и газа и головных береговых сооружений (ГБС), рассчитанных на максимальный уровень добычи нефти (6,5 млн т/год). Для обеспечения подачи газа с месторождения им. Ю. Корчагина на берег до 2015 г. будет построен трубопровод, включая райзерный блок у месторождения им. В. Филановского. Для данного варианта развития ввод в разработку месторождений «Сарматское» и «Ракушечное», а также всех перспективных структур («Южная», «Титонская», «Восточно-Ракушечная», «Хазри», «Западно-Сарматская») не предусматривается.

При варианте «полного» развития в 2010 г. планируется начать промышленную добычу нефти на месторождении им. Ю. Корчагина (максимальный уровень добычи нефти и газового конденсата на нем составит 2,5 млн т/год и газа – 1,2 млрд м³/год); затем в 2014 г. – на месторождении им. В. Филановского (максимальный уровень добычи – 8 млн т/год) и в 2016 г. – добычу газа на месторождении «Сармат-

ское» (максимальный уровень добычи газа – 4 млрд м³/год и газового конденсата – 0,4 млн т/год). В 2014 г. на месторождении им. Ю. Корчагина также планируется начать добычу нефти с блок-кондуктора.

В период до 2014 г. для обустройства месторождения им. В. Филановского планируется построить первоочередные гидротехнические сооружения для бурения, добычи и подготовки пластовой продукции в составе ЛСП-1, ПЖМ-1, ЦТП, райзерного блока, подводных трубопроводов для транспортировки нефти и газа. До 2016 г. будут построены объекты второй очереди – ЛСП-2, ПЖМ-2 и промысловые трубопроводы. Нефть с месторождения планируется транспортировать по подводному нефтепроводу до ГБС насосно-перекачивающей станции «Комсомольская» (Республика Калмыкия) и далее – в систему Каспийского трубопроводного консорциума.

Газ с месторождений Северного Каспия в объеме 6 млрд м³/год будет поступать на нефтехимический комплекс ООО «Ставролен» (г. Буденновск). В 2013 – 2016 гг. на месторождении «Сарматское» планируется построить первоочередные гидротехнические сооружения для бурения, добычи и подготовки пластовой продукции в составе ЦТП, ЛСП, компрессорной и жилой платформ, подводных трубопроводов. Газ с месторождения по подводному трубопроводу будет транспортироваться до райзерного блока месторождения им. В. Филановского и далее – на берег, а конденсат (по подводному трубопроводу) – на МПК месторождения им. Ю. Корчагина.

На перспективных структурах «Южная», «Титонская», «Восточно-Ракушечная», «Хазри», «Западно-Сарматская» и на месторождении «Ракушечное» до 2024 г. также планируется построить гидротехнические сооружения для бурения, добычи, подготовки и транспортировки пластовой продукции в составе: ЦТП – 3 ед., ЛСП – 4 ед., жилая платформа – 2 ед., компрессорная платформа – 1 ед., блок-кондуктор – 4 ед., промысловые подводные трубопроводы – 187 км, трубопроводы внешнего транспорта – 320 км.

ОАО «ЛУКОЙЛ» совместно с ОАО «ГАЗПРОМ» открыло месторождение «Центральное», сейчас производится его разведка. Запасы углеводородного сырья на данном месторождении оцениваются примерно в 170 млн т условного топлива.

По мнению президента ОАО «ЛУКОЙЛ» Вагита Алекперова, «базой для строительства инфраструктуры шельфа Каспия должен стать г. Астрахань».

УДК 551.577.53:574.23:347.796

Н.Н. Григорьев, С.В. Латухов, М.А. Гаппоев

РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ МИНИМИЗАЦИИ НЕГАТИВНОГО ВЛИЯНИЯ ЧЕЛОВЕЧЕСКОГО ФАКТОРА НА УРОВЕНЬ АВАРИЙНОСТИ ПРИ ПЛАВАНИИ В ЛЕДОВЫХ УСЛОВИЯХ АРКТИКИ ПУТЕМ ВВЕДЕНИЯ ОБЯЗАТЕЛЬНОГО ПСИХОФИЗИОЛОГИЧЕСКОГО ОТБОРА И КОНТРОЛЯ ДЛЯ МОРЯКОВ, РАБОТАЮЩИХ В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ

Взаимодействие человека с природой приобретает планетарный характер. Негативное влияние воздействия на природу чревато серьезными последствиями для огромных регионов планеты. Примером тому может послужить случай в Мексиканском заливе, когда разлив нефти стал угрозой не только для побережья США. По прогнозам пятно нефти способно достичь европейского побережья. Объемы поступившей из глубоководной скважины в Мексиканском заливе нефти уже нанесли огромный ущерб, который не покроют самые высокие штрафы, выставленные компании BP. Увы, доллары не обладают абсорбирующим свойством. К сожалению, стремление к получению сверхприбылей стоит на пути разумного существования человека в гармонии с природой. Целый ряд техногенных катастроф последнего времени послужили лишь побудительными мотивами для принятия запоздалых решений, например, запрет, введенный правительством США на глубоководное бурение нефтяных скважин в течение шести месяцев.

Нельзя сказать, что правительства государств и мировая общественность не принимают никаких мер. Определенная работа проводится, но принимаемых мер явно недостаточно. Организация объединенных наций объявила 2010 год «Годом охраны биологического

разнообразия». Применительно к морской деятельности проблема более чем актуальная. Объем деятельности человека на море с каждым годом возрастает, причем эта деятельность утратила свой безобидный характер, вследствие свойств и объемов перевозимых грузов. Понимая серьезность последствий от возникающих проблем, связанных с аварийностью на море, Международная морская организация объявила 2010 год «Годом моряка». Перед участниками судоходного бизнеса ставится задача минимизировать негативное влияние человеческого фактора на уровень аварийности на морском флоте. Чаще всего под влиянием человеческого фактора подразумевают уровень квалификации моряка без учета психофизиологических показателей личности. Справедливости ради следует отметить, что в последние годы все больше стали говорить о культуре безопасности мореплавания.

Повысить уровень безопасности мореплавания способен только комплексный подход. Прежде всего, это физическое и психическое состояние здоровья моряка. Без этих основополагающих факторов остальные составляющие, такие как квалификация, технологии и состояние оборудование, решающего значения не имеют. Из всего перечисленного, психике человека, ответственного за принятие управленческих решений, уделяется самое малое внимание. Объяснение этому факту простое. При приеме на работу, особенно в условиях снижения престижности морских профессий, все внимание направлено на формальные свидетельства пригодности к работе на флоте. Это соответствие уровню квалификации и физическое здоровье, которые подтверждаются соответствующими документами. Пренебрежение столь важными показателями, как психофизиологические показатели особенно пагубно сказывается при работе в экстремальных условиях. Работа на морском флоте всегда была экстремальной, но особенно это касается работы в полярных регионах. Норвежский исследователь Арктики Фритьоф Нансен заметил: «В Арктике легче потерять жизнь, чем монету из дырявого кармана». Справедливость этих слов не утратила актуальности и в настоящее время, вот только масштабы потенциальных потерь несопоставимы с теми временами, когда Арктику исследовал Ф. Нансен. Успокоенность по поводу безопасности мореплавания в арктических водах сформировалась под действием двух факторов: современного состояния судового навигационного оборудования и низкой аварийности в арктическом бассейне. По поводу навигационного оборудования американский капитан Ричард А. Кейхилл, сказал: «Никакая электронная техника и утонченная

технология не является непреодолимой преградой для глупости». Что же касается низкого уровня аварийности [1], то это обстоятельство является следствием низкой интенсивности судоходства в водах Арктики. Естественно, что с ростом интенсивности судоходства появится потенциальная угроза роста аварийности. В этот период важно не допустить корреляции таких факторов как [2]: низкая квалификация моряков (комплектация экипажей российских судов осуществляется по остаточному принципу), несовершенство средств обеспечения судоходства (навигационно-гидрографического, гидрометеорологического и т. д.), отсутствие аварийно-спасательной службы, отсутствие подразделений, управляющих морскими операциями и находящимися непосредственно в Арктике. Восполнить все утраченное на техническом уровне не представляет проблем, другое дело кадры. Это самое сложное, так как весь накопленный в прежние годы опыт плавания во льдах Арктики остался в прошлом, на его восстановление потребуются годы. Какими побудительными авариями накопление этого опыта чревато, – вопрос открытый. Следует понимать, что очень многое зависит от состояния психики человека, который будет накапливать этот опыт и передавать его другим. Конечно, частично может пригодиться опыт тех, моряков, которые работали в Арктике в прежние годы, но таковых остались единицы. Помимо хорошо известных негативных факторов работы на флоте, Арктике присущи свои, специфические, такие как пониженное содержание кислорода, полярная ночь, низкие температуры. Все три перечисленных фактора способствуют развитию депрессивного состояния, пожалуй, самого мощного из влияющих на важные показатели психики человека, принимающего ответственные решения.

Исходя из сказанного выше, следует уделять особое внимание подбору, подготовке и расстановке кадров, работающих на трассах Северного морского пути. В последние годы по освоению Арктики принято много документов, с различными сроками реализации, промежуточный срок исполнения одного из них уже наступил. В сентябре 2008 года Президентом РФ были утверждены Основы государственной политики Российской Федерации в Арктике на период до 2020 года и дальнейшую перспективу. «Основами определяются главные цели, основные задачи, стратегические приоритеты и механизмы реализации государственной политики Российской Федерации в Арктике, а также система мер стратегического планирования социально-экономического развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечение национальной безопасности России» [3]. Предполага-

лось, что реализация государственной политики будет проходить поэтапно. На первом этапе (2008 – 2010 годы), который предполагается завершить в текущем году, фактически, ничего не выполнено. Причина невыполнения отыскалась быстро – мировой экономический кризис. Кризис, конечно же, повлиял, но ведь прежде чем двигаться вперед, нужно восстановить то, что было создано для становления СМП во времена Советского Союза и было утрачено за годы Перестройки, а это не мало. В [2] приведены сведения, которые показывают, что, фактически, было утрачено за годы застоя или морально устарело. Но самая главная причина, о которой не говорят, – это утрата кадров. Сегодня запустить сложную систему любого арктического проекта не представляется возможным без участия опытных специалистов. Где их взять? В одночасье специалистов не подготовишь, да и много ли найдется желающих связывать свою профессию с Севером? Пора комсомольских призывов канула в Лету. Каким же представляется выход на данном этапе? Необходимо привлекать для работы в Арктике военнослужащих, увольняемых из Военно-Морского флота, многие из которых служили на Северном Флоте [4]. Комплексный подход переподготовки, трудоустройства и обеспечение жильем на иных, чем это делается сейчас, условиях позволит сделать профессию моряка в арктическом регионе более привлекательной.

Кроме того, требуются учебные программы, которые бы реально соответствовали потребностям обеспечения безопасности на трассах СМП [5]. Пора, наконец, начать подготовку штурманов ледового плавания. Плавание в ледовых условиях – это не разнообразие, а специфика, требующая глубоких знаний и умения от штурмана. Пренебрежение спецификой ледового плавания чревато серьезными последствиями для хрупкой экологии этого сурового региона.

Особо следует оговорить вопрос организации профессионального психологического отбора поступающих в морские учебные заведения, а так же психологическое сопровождение для моряков в период их работы на судах. С целью выявления мнения моряков по этой проблеме, среди них было проведено анкетирование. Всего было опрошено 190 чел.: моряки с дипломами вахтенного, второго и старшего помощника капитана, а также выпускники 2010 года двух факультетов ГМА им. адм. С.О. Макарова. При этом на вопрос, следует ли ввести психофизиологический отбор при поступлении в учебные заведения, положительно ответили 75,8 %. На вопрос, целесообразно ли вести мониторинг психофизиологического состояния членов экипажа с целью выявления хронической усталости, положительно ответили

88,3% из числа опрошенных. На факты возникновения неприязненного отношения во время рейса среди членов экипажа указывают 74 %. Появление отрицательных эмоций (иногда) во время рейса отмечают 92,2 % моряков.

Проведение психофизиологического контроля в период работы на флоте должно проводиться с целью своевременного выявления профессионального психологического «выгорания», которое неизбежно возникает у специалистов, работающих в экстремальных условиях.

Для реального повышения безопасности мореплавания следует ввести в обиход психологический паспорт моряка, где будут фиксироваться динамика изменений его психологического состояния, с целью выявления и применения упреждающих мер, не допускающих возникновения профессионального психологического «выгорания», при возникновении которого уже потребуется вмешательство психиатра.

Все, о чем говорились выше, относится к безопасности мореплавания в целом, но, особенно, когда речь идет о плавании в ледовых условиях, где работают не столько стандарты, сколько личный опыт и интуиция. Как одному, так и другому следует учиться в реальных условиях плавания, хотя начальные навыки могут быть приобретены на соответствующих тренажерах.

Список литературы

1. Проблемы Северного морского пути / Под ред.: Гринберг А.Г., Пересыпкин В.И. // Совет по изучению производительных сил РАН, Центральный научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт морского флота (ЦНИИМФ). – М.: Наука, 2006. – 581 с.
2. Григорьев Н.Н., Спирин А.М. Арктическое плавание: знания, опыт, ответственность // Морская биржа. – 2010. – №1(31).
3. Основы государственной политики Российской Федерации в Арктике на период до 2020 года и дальнейшую перспективу: утверждены Президентом РФ 18 сентября 2008 г. // Рос. газ. – 2009. – 30 марта.
4. Буйнов Ю.П., Григорьев Н.Н., Мартынов Н.П. Решение кадровых проблем судоходных компаний в условиях экономического кризиса // Транспорт Российской Федерации. – 2009. – №1 (20).
5. Ольшевский А.Н., Наконечный М.М., Григорьев Н.Н. Ледовое плавание – искусство или мастерство? // Морская биржа. – 2009. – №2 (28).

ТИПОВЫЕ МОДЕЛИ ОТКАЗА КРИТИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ МОРСКИХ СУДОВ

В последние годы ведущие классификационные общества для выполнения своей главной миссии по охране жизни, имущества и природной окружающей среды на море совершенствуют свои правила и практическую деятельность путем применения *теории рисков*. Для оценки риска требуется определить вероятность появления повреждения (отказа) элементов судна за рассматриваемый период времени. На первый взгляд, для такого сложного инженерного объекта, которым является судно, эта задача выглядит трудновыполнимой из-за многочисленности элементов и узлов его составляющих.

Объем вычислений может быть существенно сокращен, если рассматривать только основные виды опасностей (когда создается реальная угроза безопасности судна или происходит утрата его мореходных качеств). К таким видам опасностей относятся: повреждение корпуса и нарушение его целостности, опрокидывание судна или чрезмерное его накренение, затопление судна (потеря плавучести), потеря хода и управляемости, контакт с внешними объектами (навигационные АС) и пожар или взрыв.

В этом случае расчет осуществляется только для критичных элементов судна (отказ которых приводит к высокому риску нанесения вреда для человека, судна и окружающей среды), см. работы [1, 2]. Количество критичных элементов зависит от выбранного уровня допустимого риска. Например, если принять в качестве допустимого уровня смерть члена экипажа с вероятностью 10^{-3} в год на судно, то общее число критичных элементов будет составлять порядка 50–60 по всем видам опасностей. Т. е. задача оценки риска для судна в целом становится вполне выполнимой.

Для критичных элементов, составляющих корпус судна, главный двигатель, редуктор, валопровод с дейдвудным устройством, гребной винт и рулевое устройство, вероятность повреждения можно получить, используя следующие математические модели отказа.

Наиболее распространенными моделями отказа являются: модель предельной (разовой) нагрузки и кумулятивные модели накопления повреждения.

Модель предельной (разовой) нагрузки описывает случаи, когда внешняя нагрузка достигает предельной несущей способности конструкции (вязкого разрушения, потери устойчивости, истощения пластического деформирования, хрупкого разрушения и т. п.). Кроме задач строительной механики и деталей машин эта модель пригодна для расчета вероятности опрокидывания судна при качке. При этом наступление отказа в рассматриваемом периоде имеет равную вероятность в любой момент времени.

К кумулятивным моделям накопления повреждений могут быть отнесены: линейная модель коррозионного износа, модель усталостного повреждения и модель механического износа пар трения. Время наступления отказа зависит от скорости накопления повреждения и наступает тогда, когда накопленные повреждения достигают некоторого критического уровня.

Возможны также комбинации этих моделей.

Модель предельной (разовой) нагрузки

Вероятность повреждения P при превышении предельной прочности от одного цикла нагружения можно описать уравнением:

$$P = Pr[\sigma_n \geq \sigma_n], \quad (1)$$

где σ_n – напряжения, возникающие от внешней нагрузки;
 σ_n – прочность материала.

Вероятность повреждения по формуле (1) вычисляется следующим образом. Сначала определяется ордината σ_A , при которой плотность вероятности распределения напряжений от внешней нагрузки $p_n(\sigma)$ равна плотности вероятности распределения прочности $p_n(\sigma)$. Затем выполняется интегрирование плотности вероятности $p_n(\sigma)$ в диапазоне от 0 до σ_A и плотности вероятности $p_n(\sigma)$ в диапазоне от σ_A до ∞ по формуле:

$$P = \int_0^{\sigma_A} p_n(\sigma) + \int_{\sigma_A}^{\infty} p_n(\sigma).$$

Вероятность повреждения будет соответствовать затененной площади под кривыми распределения плотности вероятности $p_n(\sigma)$ и $p_n(\sigma)$, представленными на рис. 1.

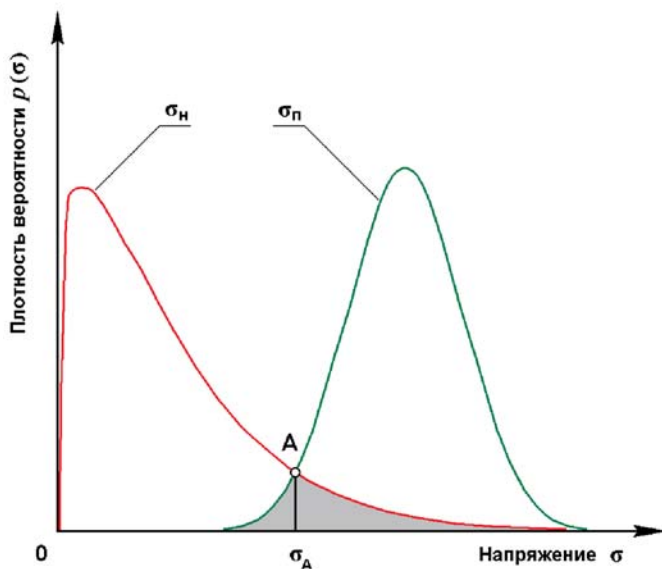


Рис. 1
Распределение плотности вероятности для σ_n и σ_p

Тогда вероятность повреждения $P(\tau)$ за срок службы $T_{\text{сп}}$ может быть найдена по формуле:

$$P(\tau) = N(\tau) \cdot P, \quad (2)$$

где $N(\tau) = T_{\text{сп}} / \bar{T}_3$ – число циклов нагружения за срок службы;
 $\bar{T}_3$ – среднее значение эффективного периода циклов нагружения.

При учете изменчивости T_3 можно получить границы доверительного интервала для вероятности повреждения $P(\tau)$. Для этого в формулу (2) вместо $\bar{T}_3$ необходимо подставить нижнее $T_{3;\alpha/2}$ и верхнее $T_{3;1-\alpha/2}$ значения для эффективного периода циклов нагружения и получить, соответственно, нижнюю $P_{\alpha/2}(\tau)$ и верхнюю $P_{1-\alpha/2}(\tau)$ границы доверительного интервала для вероятности повреждения, где α – вероятность непопадания в доверительный интервал.

Например, для подвида опасности «нарушение общей прочности» критичным элементом является поперечное сечение корпуса в сред-

ней части судна. Повреждения проявляются в виде поперечных трещин в средней части корпуса, которые могут приводить к его разлому на две части и к гибели судна.

Контролируемым параметром для этого подвида опасности является момент сопротивления корпуса в средней части судна $W_{п(дн)}$ – для палубы (днища).

Если за предельное состояние конструкции корпуса принять достижение в крайних поясах эквивалентного бруса напряжений, равных пределу текучести σ_T , возникающих при общем изгибе корпуса, то вероятность повреждения P от одного цикла нагружения может быть определена из выражения:

$$P = Pr[\sigma_B + \sigma_{TB} \geq \sigma_T], \quad (1a)$$

где $\sigma_B = M_B / W_{п(дн)}$ – волновые напряжения, долговременное распределение которых может быть описано законом Вейбулла;

$\sigma_{TB} = M_{TB} / W_{п(дн)}$ – напряжения на тихой воде, долговременное распределение которых близко к нормальному закону с математическим ожиданием μ_{TB} и дисперсией D_{TB} для прогиба (перегиба) судна;

σ_T – имеет нормальный закон распределения с математическим ожиданием μ_T и дисперсией D_T .

При этом расчетным случаем является прогиб или перегиб судна, в зависимости от того, когда абсолютная сумма $|\sigma_B + \sigma_{TB}|$ является наибольшей.

Так как напряжения на тихой воде σ_{TB} и предел текучести σ_T имеют нормальные законы распределения, то введем переменную $\sigma_0 = \sigma_T - \sigma_{TB}$, имеющую также нормальное распределение с математическим ожиданием $\mu_0 = \mu_T - \mu_{TB}$ и дисперсией $D_0 = D_T + D_{TB}$.

В этом случае условие (1a) примет вид, совпадающий с формулой (1):

$$P = Pr[\sigma_B \geq \sigma_0].$$

С определенными оговорками форму записи модели предельной (разовой) нагрузки можно применить для оценки вероятности *усталостного повреждения силовых элементов ДВС*.

Дело в том, что элементы ДВС в течение срока их службы испытывают ориентировочно $10^8 \div 10^{11}$ циклов нагружения, что значительно превышает базу испытания на предел выносливости. Причем нагрузка по амплитуде распределена в относительно узком диапазоне и имеет ограничение сверху, зависящее от максимально возможного значения

давления сгорания в цилиндре. Поэтому в формуле (1) под напряжениями от внешней нагрузки σ_n следует понимать амплитудные значения, а прочность материала σ_n – заменить на предел выносливости при наличии концентратора напряжений $\sigma_a^{(k)} = \sigma_a / k_g$, где σ_a – предел выносливости гладких образцов при асимметричном цикле нагружения, k_g – эффективный коэффициент концентрации напряжений для рассматриваемого силового элемента механической установки. При этом вероятность повреждения $P(\tau)$ за период времени τ по формуле (2) принимает вид:

$$P(\tau) = \left(\frac{N(\tau)}{N_0} \right) \cdot P, \quad (2a)$$

где $N_0 = (2+5) \cdot 10^6$ – база испытания образцов на определение предела выносливости, соответствующая 50 % выживания образцов.

Модель предельной (разовой) нагрузки может быть также использована для оценки вероятности отказа из-за нарушения *температурного режима* цилиндрово-поршневой группы (ЦПГ).

Известно, что параметром, определяющим тепловую напряженность ЦПГ, является температура поршня на уровне первого компрессионного кольца. При высокой температуре происходит угар масла и закоксование кепов, вследствие чего компрессионное кольцо теряет подвижность. В результате возможны задиры зеркала цилиндровой втулки, поломка кольца, появление трещин во втулке с водотечностью из зарубашечного пространства, заклинка поршня с обрывом юбки поршня, шатуна или цилиндровой втулки.

Так как производить непосредственное измерение температуры поршня в эксплуатации практически невозможно, то о температурной напряженности двигателя обычно судят по косвенным показателям, например, по температуре выхлопных газов, охлаждающей воды или температуре цилиндровой втулки со стороны зарубашечного пространства, для которых имеется возможность построить ограничительные характеристики.

Следует отметить, что в отличие от механического напряженного состояния, при котором отказ может произойти при разовом превышении внешней нагрузкой характеристик прочности, процессы нарушения теплового баланса, приводящих к отказу, имеют некоторую инерционность. Т. е. должно пройти какое-то время работы двигателя с тепловой перегрузкой, чтобы в кепках накопились продукты угара

масла, приводящие к потере подвижности компрессионного кольца. Этот процесс в зависимости от степени тепловой перегрузки может занимать от нескольких часов до нескольких суток.

Линейная модель коррозионного износа

Коррозионный износ листовых элементов корпуса судна и трубопроводов обычно изображают в виде ломаной линии, представленной на рис. 2 а, в которой горизонтальный участок соответствует времени, в течение которого лакокрасочное покрытие или протекторная защита выполняют свои антикоррозионные функции, а наклонный участок – коррозионному износу с постоянной скоростью.

При этом различают общую и язвенную коррозию. Если общий износ приводит к уменьшению средней остаточной толщины листового

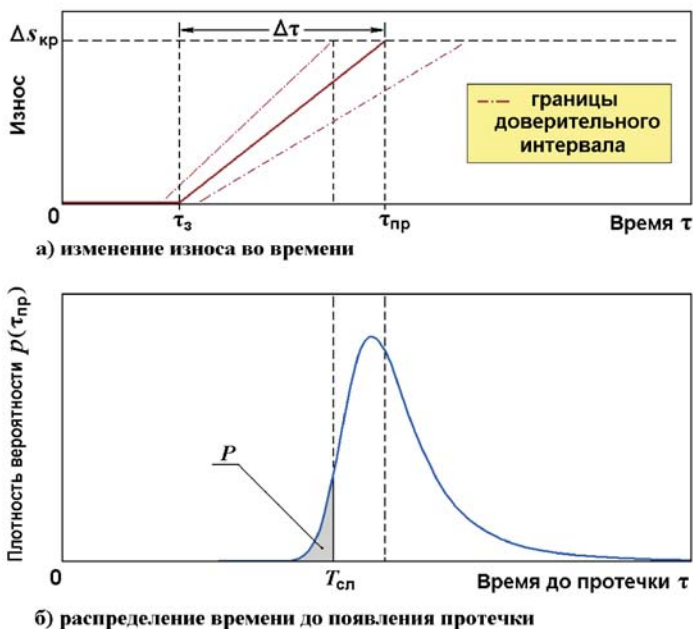


Рис. 2
Изменение коррозионного износа во времени (а)
и распределение времени до появления протечки (б)

элемента и, следовательно, вызывает увеличение действующих в нем напряжений, то опасность язвенного износа заключается в появлении сквозной коррозии, которая может стать причиной затопления судна.

Перед каждым очередным освидетельствованием судна классификационным обществом проводится дефектация корпуса, включающая измерение остаточных толщин в количестве не менее 3-х замеров на один лист, по результатам которых определяется средняя остаточная толщина и сравнивается с предельно-допустимыми значениями. Измерение остаточных толщин в язвинах выполняется значительно реже из-за большой трудоемкости этих работ. Поэтому возникают определенные технические трудности по прогнозу времени до появления протечек по прямым измерениям остаточной толщины в язвинах.

В тоже время, существует статистическая зависимость между среднеквадратическим отклонением средней остаточной толщины листового элемента, значением средней остаточной толщины и наличием сквозной коррозии. Поскольку при дефектации корпуса фиксируются не только значения остаточных толщин, но и наличие трещин и сквозной коррозии, то, обрабатывая акты дефектации, можно установить эту статистическую зависимость.

Обозначим через s_0 – построечную толщину листового элемента; s – среднюю остаточную толщину; σ_s – среднеквадратическое отклонение остаточной толщины; $\Delta s_{кр}$ – критическое значение износа, при котором возможно появление сквозной коррозии. Тогда условие возникновения протечки может быть записано в виде:

$$\min s = s_0 - \Delta s_{кр} - m \cdot \sigma_s = 0,$$

где $m = 1/v_s$ – величина, обратная коэффициенту вариации остаточной толщины листов, имеющих сквозную коррозию.

Примем, что скорость коррозии u_s постоянна и распределена по нормальному закону со средним значением $\bar{u}_s$ и среднеквадратическим отклонением σ_u . Тогда время от начала коррозионного процесса до появления протечки $\Delta \tau$ будет равно следующему:

$$\Delta \tau = \frac{s_0}{u_s + m \cdot \sigma_u}.$$

Плотность распределения $p_{\Delta}(\Delta \tau)$ находится как распределение функции от случайной величины с известным законом распределения:

$$p_{\Delta}(\Delta\tau) = \frac{s_0}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_u \cdot \Delta\tau^2} \cdot \exp \left[-\frac{(s_0/\Delta\tau - m \cdot \sigma_u - \bar{u}_s)^2}{2\sigma_u^2} \right].$$

Плотность распределения времени до появления протечки $p_{\text{пр}}(\tau_{\text{пр}})$, представленная на рис. 2 б, вычисляется как композиция суммы двух законов распределения – срока службы защитного покрытия τ_3 и времени коррозии до появления протечки $\Delta\tau$:

$$p_{\text{пр}}(\tau_{\text{пр}}) = \int_0^{\infty} p_3(\tau_3) \cdot p_{\Delta}(\tau_{\text{пр}} - \tau_3) \cdot d\tau_3.$$

Тогда вероятность появления протечки P на конец срока службы корпуса $T_{\text{сн}}$ можно получить как значение интегральной функции от плотности распределения $p_{\text{пр}}(\tau_{\text{пр}})$ при $\tau_{\text{пр}} = T_{\text{сн}}$, а при учете изменчивости величины $m = 1/v_s$ – границы доверительного интервала для вероятности появления сквозной коррозии: нижней $P_{\alpha/2}$ и верхней $P_{1-\alpha/2}$.

Модель усталостного повреждения

Расчет долговечности элементов судна при накоплении усталостных повреждений рассмотрим на примере сварного узла, испытывающего симметричную волновую нагрузку. Для этого примем следующие допущения.

1. Кривая усталости в диапазоне напряжений от предела выносливости $\sigma_{-1}^{(\text{CB})}$ до временного сопротивления σ_b может быть описана уравнением:

$$N(\sigma) = N_0 \left(\frac{\sigma_{-1}^{(\text{CB})}}{\sigma} \right), \quad (3)$$

где $N(\sigma)$ – число циклов нагружения до разрушения при амплитуде напряжения σ ;

N_0 – база испытания образцов на предел выносливости, соответствующий медиане распределения долговечности при заданном уровне амплитуды напряжений;

$\sigma_{-1}^{(\text{CB})}$ – предел выносливости сварного шва при симметричном цикле нагружения, распределение которого может быть описано логарифмически-нормальным законом.

2. При суммировании усталостных повреждений от нагрузки с разной амплитудой справедлива линейная гипотеза накопления повреждений, предложенная Майнером:

$$\sum_i \frac{n(\sigma)_i}{N(\sigma)_i} = 1,$$

где $n(\sigma)_i$ – число циклов нагружения с амплитудой σ_i ;
 i – номер уровня нагрузки.

3. Распределение амплитуд напряжений от гидродинамической нагрузки подчинено закону Вейбулла, плотность вероятности которого равна:

$$p_\sigma(\sigma) = \frac{k}{a} \cdot \left(\frac{\sigma}{a}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{\sigma}{a}\right)^k\right], \quad (4)$$

где a, k – параметры масштаба и формы закона Вейбулла.

П р и м е ч а н и е. В случае наличия средних напряжений предел выносливости $\sigma_{-1}^{(CB)}$ в формуле (3) заменяется на предел выносливости $\sigma_a^{(CB)}$ при асимметричном нагружении.

Введем меру повреждения $\delta(\sigma)$ от одного цикла нагружения амплитудой σ , равную:

$$\delta(\sigma) = N(\sigma)^{-1}, \quad (5)$$

которая является случайной величиной.

Тогда эффективная (осредненная) мера усталостного повреждения δ от одного цикла нагружения при распределении амплитуд, подчиненных закону Вейбулла (4), находится по формуле:

$$\delta = \int_{\sigma_{\min}}^{\sigma_{\max}} \delta(\sigma) \cdot p_\sigma(\sigma) \cdot d\sigma, \quad (6)$$

где $\sigma_{\max}, \sigma_{\min}$ – значение временного сопротивления и предела выносливости, соответственно, при выбранном уровне вероятности.

Время до появления трещины $\tau_{тр}$ можно рассчитать по формуле:

$$\tau_{тр} = \bar{T}_3 \cdot \delta^{-1}, \quad (7)$$

где $\bar{T}_3$ – среднее значение эффективного периода волновых давлений.

Так как значение предела усталости $\sigma_{-1}^{(CB)}$, входящее в формулу (3), является случайной величиной, то, задаваясь вероятностью p пре-

вышения величины $\sigma_{-1, \rho}^{(CB)}$, можно с помощью формул (3)–(7) получить значение наработки $\tau_{тр, \rho}$ вероятностью ρ до появления усталостной трещины:

$$\tau_{тр, \rho} = \bar{T}_3 \cdot N_0 \cdot \left[\int_{\sigma_{\min}}^{\sigma_{\max}} (\sigma / \sigma_{-1, \rho}^{(CB)})^m \cdot p_{\sigma}(\sigma) \cdot d\sigma \right]^{-1} \quad (8)$$

Выражение (8) можно решить путем численного интегрирования. Для этого предварительно вычисляют показатель степени m в формуле (3). Потом, задавшись шагом вероятности ΔP , определяют значение предела усталости $\sigma_{-1, \rho}^{(CB)}$ и пределы интегрирования $\sigma_{\max}$ и $\sigma_{\min}$. Затем, подставляя значение $\sigma_{-1, \rho}^{(CB)}$ в формулу (8), получают наработку до появления трещины $\tau_{тр, \rho}$ и соответствующее ему значение интегральной функции $P(\tau_{тр})$, плотность вероятности которой $p(\lg \lg \tau_{тр})$ приведена на рис. 3.

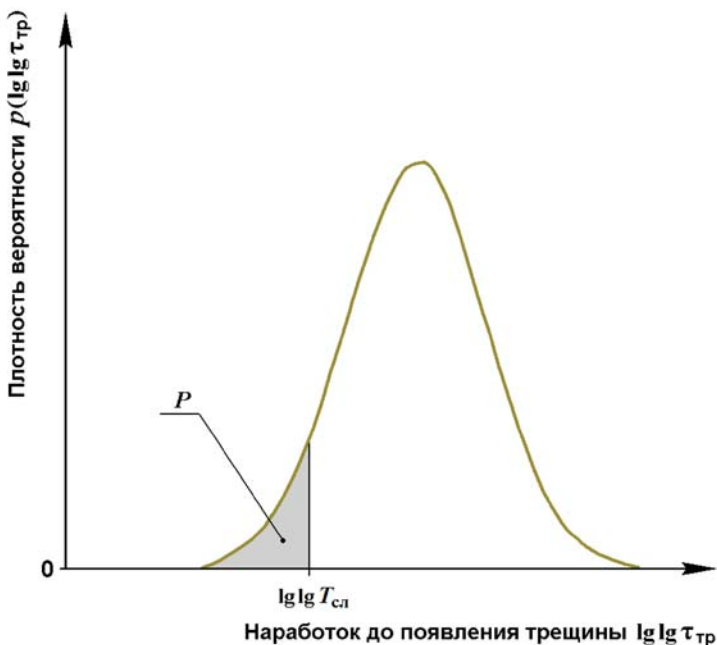


Рис. 3
Нарботок до появления усталостной трещины

Вероятность появления усталостного повреждения к концу срока службы P определяется из условия $\tau_{\text{тр}, p} = T_{\text{сл}}$.

При учете изменчивости эффективных периодов T_3 можно рассчитать границы доверительного интервала для P .

Модель механического износа пар трения

Для подшипников ДВС, редуктора, валопровода и других подшипников скольжения наблюдаются отказы в виде выплавления баббитового слоя, задигов вкладышей и шеек, проворачивания вкладышей, усталостного разрушения антифрикционного слоя вкладышей. Задиры и проворачивание вкладышей в первый период эксплуатации зависят от технологических погрешностей при изготовлении деталей, несоблюдения технических условий при сборке и нарушения температурного режима работы. В процессе эксплуатации после окончания приработки при установившемся режиме работы ДВС вышеуказанные отказы происходят из-за увеличения изнашивания подшипников или ухудшения условий их охлаждения, вызванного понижением давления в системе смазки.

У подшипников скольжения различают три вида скольжения: граничный, полужидкостной и жидкостной режимы.

В местах перегрузок (на вершинках неровностей поверхности) масляная пленка может разрушаться и здесь возникает непосредственный контакт двух трущихся поверхностей. Происходит *адгезионное* взаимодействие и возможен отрыв микрочастиц поверхностного слоя, называемый *граничным трением*. С увеличением скорости скольжения режим трения существенно меняется.

При высоких скоростях скольжения (выше некоторой критической скорости $v_{\text{кр}}$) давление масляного клина создает достаточную подъемную силу, предотвращающую касание вала вкладышем, осуществляя *жидкостной режим трения*.

При относительно небольших скоростях скольжения не происходит полного отрыва вала от вкладыша, что приводит к режиму *полужидкостного (смешанного) трения*.

Расчет подшипников скольжения выполняется таким образом, чтобы обеспечить жидкостной режим скольжения при номинальных оборотах двигателя. Однако при переходных режимах работы двигателя (пуски и остановки, реверсы, швартовка или движение малым ходом при гребном винте с фиксированным шагом) возможно появление как полужидкостного, так и граничного трения. Так как при жидкостном трении отсутствует контакт поверхностей вала и вкладыша, то их из-

нашивание в этом режиме практически не происходит. Основное накопление износов происходит на переходных режимах работы двигателя и, вначале, оно носит слабо линейный характер.

В настоящее время достаточно сложно построить математическую модель зависимости развития износа во времени. Поэтому для описания процесса изнашивания в парах трения используются эмпирические приближения.

Условно весь процесс изнашивания (см. рис. 4 а), известный в триботехнике как модель износа Лоренса, можно разбить на три участка: период приработки *I*, заканчивающийся временем T_I , период линейного износа во времени *II* и период прогрессирующего износа *III*.

Воспользуемся следующими эмпирическими зависимостями для значений износа $\Delta(\tau)$ от времени τ :

$$\Delta(\tau) = \Delta_M + u \cdot \tau + (\Delta_0 - \Delta_M) \cdot [1 - \exp(-\lambda \cdot \tau)] - \text{для участка } I \text{ при } \tau \leq T_I;$$

$$\Delta(\tau) = \Delta_0 + u \cdot \tau - \text{для участка } II \text{ при } T_I \leq \tau \leq T_{II}; \quad (9)$$

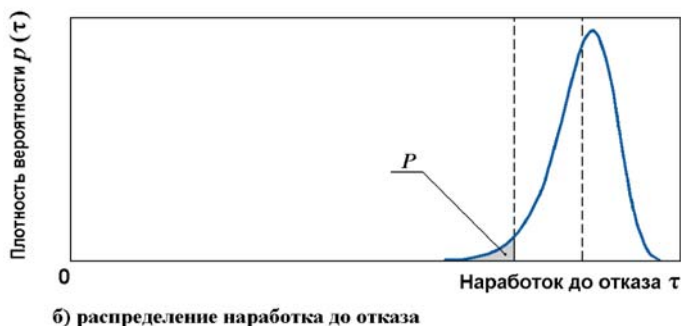
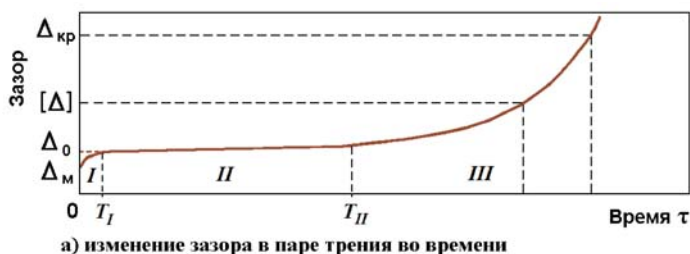


Рис. 4
Изменение зазора в парах трения во времени (а)
и распределение наработки до отказа (б)

$$\Delta(\tau) = \Delta_0 + u \cdot \tau + a \cdot \exp[b(T_{II} - \tau)] - \text{для участка III при } T_{II} \leq \tau,$$

где Δ_m – монтажный зазор;

λ – параметр скорости приработки;

Δ_0 , u – начальный зазор и скорость износа на участке II при линейной аппроксимации;

a , b – параметры прогрессирующей составляющей износа на участке III.

При достижении зазора в паре трения некоторого значения, характеризуемого временем T_{II} , меняются условия смазывания и процесс накопления износа приобретает прогрессирующий характер. Когда зазор становится равным критическому значению $\Delta_{кр}$, то полужидкостное трение может возникать даже при номинальных режимах работы двигателя, а на переходных режимах имеет место граничное трение. В этом случае процесс накопления износа резко ускоряется, что приводит к уменьшению эффективной площади контакта в паре трения, соответственно возрастает удельное давление, сопровождаемое разогревом зоны контакта и снижением вязкости смазки. Как следствие может происходить «схватывание» вала и вкладыша с вырыванием частиц баббитового слоя, проворачивание вкладыша, а также накопление усталостных повреждений в материале вкладыша и его растрескивание. В результате через относительно небольшой промежуток времени с момента достижения зазора в паре трения критичной величины $\Delta_{кр}$ возникает отказ.

Производителями судового оборудования определение долговечности и наработки до отказа заменяемых элементов механической установки осуществляется, как правило, на основе обработки данных, полученных в результате натурных наблюдений группы судов, эксплуатирующихся в определенных условиях, поскольку теоретическими методами невозможно избежать ошибок, вызванных необходимостью учета всего многообразия факторов, воздействующих на процесс изнашивания. Для этих же целей используются экспериментальные данные по видам износа и характеристикам изнашивания существующих конструкций двигателей и устройств. По результатам обработки данных строят гистограммы распределения наработка до отказа. Так как отказ оборудования нежелателен во время рейса, то замена изношенных элементов должна быть произведена заблаговременно при достижении зазора в паре трения предельно допустимого значения $[\Delta]$. Для этого необходимо располагать распределением наработка до отказа и определить периодичность проведения обследований (измерения зазора) в парах трения в течение срока их службы.

Если в эмпирическую зависимость, описывающую изменение зазора во времени на рис. 4 а, подставить величину наработки до отказа, соответствующую принятому значению P , то получим предельно допустимое значение износа $[\Delta]$, при котором вероятность безотказной работы равна $Q = 1 - P$.

На рис. 4 б представлена теоретическая кривая распределения плотности вероятности наработки до отказа $p(\tau)$, полученная в предположении того, что распределение зазоров подчинено нормальному закону с использованием функции нормированного нормального распределения $\Phi(t)$, плотность вероятности $\varphi(t)$ которого равна:

$$\varphi(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \exp(-t^2/2),$$

где $t = [\Delta_{кр} - \Delta(\tau)] / \sigma_{\Delta}$ – нормированное отклонение;

$\Delta(\tau)$ – среднее значение зазора по формулам (9), зависящее от наработки τ ;

σ_{Δ} – среднеквадратическое отклонение зазора от средней величины в области значений зазора, близких к $\Delta_{кр}$.

Отметим, что полученное распределение наработки до отказа имеет *отрицательную асимметрию*, что характерно для отказов с прогрессирующим износом.

Практическое значение полученного результата заключается в том, что в расчетах надежности обычно пользуются теоретическими распределениями с положительной асимметрией (экспоненциальное, логнормальное распределение, распределение Вейбулла и т. п.) или с нейтральной асимметрией (нормальное распределение Гаусса), что не соответствует опытным данным по этому виду отказа.

Статистическая модель отказа

В случае отсутствия аналитической модели или недостаточности исходных данных для расчета можно воспользоваться методами статистического планирования эксперимента.

При планировании эксперимента, обычно, малочисленные совокупности статистических данных объединяют в единую статистическую таблицу. При этом с целью уменьшения объемов вычислений задаются числом повторности опыта для каждого уровня фактора и предполагают, что измеряемый параметр имеет нормальный закон распределения.

В отличие от классических планов эксперимента при анализе аварийных случаев известны не сами значения измеряемого параметра, а количество отказов, т. е. число превышений предельно-допустимого уровня из некоторого случайного объема наблюдений, который может быть разным для каждого уровня факторов. Кроме того, распределение отказов, как правило, не соответствует нормальному закону.

Точность факторного анализа может быть существенно повышена при использовании априорной информации, например, о характере распределения внешней нагрузки. Схему применения факторного анализа продемонстрируем на примере определения частоты ледовых повреждений обшивки корпуса судна в зависимости от района плавания и категории ледовых усилений.

В качестве уровней первого фактора рассмотрим повреждаемость обшивки корпуса в Северо-Западном, Арктическом и Дальневосточном бассейнах. Уровнями второго фактора в соответствии с классификацией Правил РС 1995 г. (как для «старых» судов) примем следующие категории ледовых усилений: **Л3, Л2, Л1** и **УЛ**. При этом, воспользуемся априорной информацией, что ледовые нагрузки распределены по закону Вейбулла [3] и расчетная нагрузка для судов разных ледовых категорий пропорциональна коэффициенту a_1 из табл. 3.10.3.1.1-1 Правил РС издания 1995 г., который для категорий **Л3/Л2/Л1/УЛ/УЛА** соответствует значениям 0,26/0,31/0,38/0,51/1,0.

Тогда вероятность повреждения одного судна в год можно будет представить выражением:

$$P = 1 - \exp[-(R_{eH} / a_1 a)^k], \quad (10)$$

где R_{eH} – нормативный предел текучести;

a_1 – коэффициент нагрузки из табл. 3.10.3.1.1-1 Правил РС 1995 г., зависящий от категории ледовых усилений;

a – параметр масштаба долговременного распределения ледовой нагрузки;

k – параметр формы долговременного распределения ледовой нагрузки.

В табл. 1 приведены данные по числу повреждений и процентный состав флота морских судов разных категорий ледовых усилений при эксплуатации в различных бассейнах за период 1993 – 2008 гг. (суда для перевозки генерального груза, нефтеналивные, навалочные, рефрижераторные и рыболовные суда).

Следует отметить, что отсутствие АС в отдельных ячейках табл. 1 не означает отсутствие вероятности появления ледовых повреждений

у судов данной ледовой категории в конкретном бассейне, а объясняется малым числом судов, которые были в эксплуатации в рассматриваемый период.

Таблица 1

Распределение числа судов с ледовыми повреждениями n_{ij} и доли эксплуатирующихся судов γ_{ij} (%) по категориям ледовых усилений и районам плавания ($N_{\Sigma} = 15794$ судовлет)

Категория ледовых усилений	Бассейны эксплуатации, n_{ij}/γ_{ij}			
	Северо-Западный	Арктический	Дальне-восточный	Всего по бассейнам
ЛЗ	5 / 13,72 %	1 / 12,72 %	2 / 24,88 %	8 / 51,32 %
Л2	1 / 5,65 %	1 / 6,19 %	0 / 24,85 %	2 / 36,69 %
Л1	0 / 1,41 %	0 / 6,65 %	0 / 1,70 %	0 / 9,76 %
УЛ	0 / 0,01 %	0 / 1,77 %	0 / 0,45 %	0 / 2,23 %
По всем категориям	6 / 20,79 %	2 / 27,33 %	3 / 51,88 %	11 / 100 %

Фактическая частота ледовых повреждений f_{ij} , судовлет⁻¹, находится как:

$$f_{ij} = \frac{n_{ij}}{\gamma_{ij} \cdot N_{\Sigma}}, \quad (11)$$

где n_{ij} – число судов i -ой категории в j -ом бассейне с ледовыми повреждениями;

γ_{ij} – доля судов i -ой категории в j -ом бассейне;

N_{Σ} – общий объем наблюдаемых судов всех категорий по всем бассейнам за анализируемый период, судовлет.

Параметры a и k закона Вейбулла находятся путем приравнивания вероятности ледового повреждения P из выражения (10) к фактической частоте f по формуле (11).

Параметр k вычисляется как среднее значение по всем бассейнам. Параметр a для каждого бассейна определяется методом наименьших квадратов, взвешенных в соответствии с долей γ_{ij} наблюдаемых судов.

В результате получим искомую вероятность ледовых повреждений корпуса в зависимости от категории ледовых усилений и района плавания, представленную на рис. 5.

Как следует из диаграммы на рис. 5, наибольшая повреждаемость отмечается в Северо-Западном бассейне, что можно объяснить са-

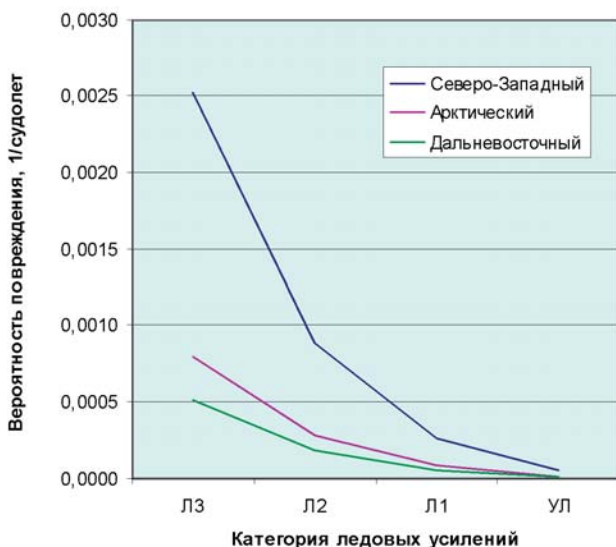


Рис. 5
Вероятность ледовых повреждений корпуса
в зависимости от категории ледовых усилений и района плавания

мостоятельным плаванием судов без ледокольной проводки в замерзающем Балтийском море и Финском заливе.

Если учесть отклонение вычисленных значений параметра a от его среднего значения, то можно получить границы доверительного интервала для вероятностей ледовых повреждений $P_{a/2}$ и $P_{1-a/2}$.

В экспериментах и при выполнении измерений принято определять погрешность полученных данных.

Обычно погрешность измерений оценивается доверительным интервалом шириной $\pm \sigma_x$, границы которого равноудалены от среднего значения $\bar{x}$, где σ_x – среднее квадратическое отклонение измеренной величины x . При этом предполагается, что измеряемая величина распределена по нормальному закону, у которого медиана совпадает со средним значением и доверительный интервал $\bar{x} \pm \sigma_x$ соответствует 68,3 % вероятности попадания в него случайной величины x . По аналогии, можно оценить погрешность расчета при использовании указанных выше распределений. Для этого необходимо задаться вероятностью $\alpha = 1 - 0,683 = 0,317$ не попадания в

доверительный интервал и вычислить нижнюю $\chi_{\alpha/2}$ и верхнюю $\chi_{1-\alpha/2}$ его границы.

Таким образом, приведенные выше модели отказов, хотя и не охватывают всех возможных случаев, позволяют определять вероятности появления наиболее часто встречающихся повреждений.

Список литературы

1. Емельянов М.Д. Критичные элементы морских судов // Судостроение. – 2008. – № 6.
2. Емельянов М.Д. Оценка риска и критичные элементы морских судов // Сб. научных трудов ЗАО «ЦНИИМФ»: Проблемы развития морского флота. – СПб., 2009.
3. Апполонов Е.М. Решение проблем обеспечения прочности судов ледового плавания и ледоколов в условиях круглогодичной эксплуатации в Арктике: диссертация на соискание ученой степени д. т. н. – СПб., 2003.
4. Правила классификации и постройки морских судов. – СПб.: Российский морской регистр судоходства, 1995.

УДК 629.5: 656.07: 629.061: 69.059

Э.К. Блинов

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ РОССИЙСКОГО МОРСКОГО РЕГИСТРА СУДОХОДСТВА В ОБЛАСТИ НОВОГО СУДОСТРОЕНИЯ

В настоящее время реальные промышленные мощности и объемы судостроения в Российской Федерации являются явно недостаточными. Поэтому руководством страны был принят ряд федеральных целевых программ (ФЦП), представляющих собой этапы государственной программы развития многих отраслей индустриального комплекса страны на перспективу ближайших 5 – 10 лет. В результате выполнения этих программ должно произойти как развитие гражданского судостроения, так и восстановление и модернизация производственного потенциала отечественного судостроения.

В связи с вышеизложенным, Российский морской регистр судостроения (РС), являясь активным участником выполнения поставленных Правительством РФ целей и задач по модернизации этого сектора экономики, принял организационные решения по созданию специализированной Службы судостроения в своем составе.

Предлагаемая статьей тема приобретает стратегическое значение для работы и развития самого РС, в ней аргументируются и обосновываются подходы и основания принятого руководством РС организационного решения. Приведены направления деятельности Службы судостроения в сопряжении с конкретными объемами государственного финансирования отечественного судостроения, которые опубликованы в ФЦП по этой теме. В тексте приведены цифры с указанием типов и количества судов по этапам и годам их постройки.

В статье приведен анализ рынка предпочтений, действующих в мировой экономике для судостроителей и судовладельцев многих стран. Приведены примеры возможного участия РС в получении определенной доли в таких предпочтениях, в том случае если Правительство и Государственная Дума Российской Федерации примут соответствующие решения.

По экспертной оценке [1], общая потребность России в судостроительной продукции гражданского назначения до 2020 года оценивается суммой около 3200 млрд руб. Но, как уже говорилось выше, объемы судостроения в настоящее время не удовлетворяют этой потребности, производственные мощности недостаточны, поэтому для решения задач по совершенствованию судостроительной отрасли необходима реализация мер, предусмотренных в ряде федеральных целевых программ, принятых Правительством РФ.

Как известно, в нашей стране уже был период подъема отечественного судостроения и судоходства. В то время Регистр СССР (ГУ РС) сразу отреагировал на эту ситуацию, осуществив соответствующие организационные изменения и создав в 1961 году в своем составе инспекцию по судостроению. Тогда это было вызвано грандиозной программой Правительства СССР по строительству на верфях, отечественных и зарубежных, большого количества морских судов, собственником которых становилось Министерство морского флота СССР. По экспертным оценкам специалистов того времени считалось, что не менее 50 % импортно-экспортных внешнеторговых грузов страны должны перевозиться отечественным тоннажем. В те годы все отечественные новые суда строились на класс РС, и в связи с этим для технического надзора за новостроем требовалась специальная структура в составе ГУ РС. В качестве примера такой активности в судостроении можно привести хотя бы Балтийское морское пароходство ММФ СССР, которое в 1975 – 1985 годах получало от верфей 10 – 15 крупнотоннажных судов ежегодно. К 1990 году в его составе с классом РС было более 170 крупнотоннажных судов разных типов и назначений. После распада СССР программа строительства новых гражданских судов за счет бюджетных средств была остановлена и инспекция судостроения в ГУ РС была реорганизована.

Как показывает опыт прошлых лет, страна, принявшая несколько документов по развитию транспортной инфраструктуры на ближайшие 10 – 30 лет, должна создать и соответствующие структуры для реализации этих ФЦП. Именно такими соображениями обосновыва-

ются решения руководства РС по воссозданию Службы судостроения в Российском морском регистре судоходства.

Одним из важнейших правительственных документов в этой связи является «Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 года», утвержденная распоряжением Правительства РФ от 22 ноября 2008 г. № 1734-р. [2]. Концептуальная цель данной стратегии определена следующим образом: «На новом этапе транспортная стратегия (далее – Стратегия) должна определять активную позицию государства по созданию условий для социально-экономического развития, прежде всего в целях повышения качества транспортных услуг, снижения совокупных издержек общества, зависящих от транспорта, повышения конкурентоспособности отечественной транспортной системы, усиления инновационной, социальной и экологической направленности развития транспортной отрасли». В рамках этой концепции находится раздел, посвященный морской составляющей Стратегии, а именно строительству судов обеспечивающего флота (ледоколов, аварийно-спасательных, природоохранных, гидрографических), объектов берегового базирования бассейновых аварийно-спасательных управлений, приобретению глубоководного мобильного универсального оборудования и т. д.

До 2015 года Россия предполагает построить 90 единиц обеспечивающего флота. В 2016 – 2030 годах планируется продолжить строительство и модернизацию судов обеспечивающего флота (атомные и дизель-электрические ледоколы, аварийно-спасательные суда, включая понтоны, природоохранные, гидрографические и другие суда обеспечивающего флота). Потребность в них составляет не менее 340 единиц.

Реализация этого тезиса Стратегии предусматривает, среди прочего, строительство за счет средств государственного бюджета и активное пополнение обеспечивающего флота:

три атомными ледоколами нового типа мощностью 60 МВт для обеспечения круглогодичной работы транспортных судов на трассах Северного морского пути;

дизель-электрическими ледоколами для обслуживания месторождений на шельфах северных морей и решения других задач, в том числе: ледоколами специального назначения мощностью 20 – 30 МВт для охраны российских арктических акваторий с модификациями для линейной работы, вспомогательными ледоколами мощностью 10 – 12 МВт, а также портовыми ледоколами-буксирами мощностью 6 – 7 МВт;

многофункциональными аварийно-спасательными судами мощностью 7 и 4 МВт, буксирами нового поколения, техническими средствами спасания морских нефтегазовых объектов в ледовых условиях.

Кроме этого, там же предусматриваются поставки морских гражданских судов на основе смешанного частно-государственного финансирования:

судов грузового флота:

1 этап – 446 ед. дедевейтом 20913,2 тыс. т;

2 этап – 144 ед. дедевейтом 6116,5 тыс. т;

3 этап – 302 ед. дедевейтом 14796,7 тыс. т.

судов пассажирского флота:

1 этап – 4 ед.;

2 этап – 21 ед.;

3 этап – 27 ед.

Стратегия так же предусматривает совершенствование научно-технической базы транспортной отрасли и повышение инновационной активности ее предприятий. Одним из инструментов реализации Стратегии является ФЦП «Развитие гражданской морской техники на 2009 – 2016 годы», утвержденная постановлением Правительства РФ от 21 февраля 2008 г. № 103 [3], целью которой, среди прочего, является развитие отечественного научно-технического и проектного потенциала судостроительной промышленности.

Первый этап программы (2009 – 2011 годы) предусматривает разработку первоочередных проектов, базирующихся на уже имеющихся научно-технических достижениях, и выполнение работ по модернизации и развитию опытно-конструкторской и научно-экспериментальной базы судостроительной промышленности. На данном этапе уже необходимо участие РС.

Второй этап программы (2012 – 2016 годы) включает в себя завершение основных работ по модернизации и развитию опытно-конструкторской и научно-экспериментальной базы судостроительной промышленности, а также выполнение проектов по нахождению перспективных научно-технических решений и созданию технологий, реализуемых при создании гражданской морской техники нового поколения. На этом этапе РС так же непременно должен принимать активное участие.

Другим основополагающим руководящим документом является ФЦП «Развитие транспортной системы России на 2010 – 2015 годы, утвержденная постановлением Правительства РФ от 20 мая 2008 г. № 377 [4], которая включает подпрограмму «Морской транспорт».

Наличие такого количества руководящих правительственных документов подчеркивает рост внимания государства к судостроительной отрасли в России и повышает роль и значение вновь созданной в РС Службы судостроения.

В 2007 году в стране была создана новая государственная структура в виде ОАО «Объединенная судостроительная корпорация» (далее – ОАО ОСК).

Это еще один важный факт своевременности решения руководства РС по созданию Службы судостроения (далее – Служба), как соответствующего нового структурного подразделения, координирующего работу РС в области судостроения. Структурно эта Служба подчинена одному из заместителей генерального директора РС, отвечающему за техническое наблюдение за судами в постройке и эксплуатации.

Отечественное судостроение было и остается одним из крупнейших машиностроительных комплексов России. В состав отрасли входят более 170 предприятий и организаций, из которых около 50 являются научно-исследовательскими и проектно-конструкторскими. Однако в 80-е годы XX века отечественное судостроение начало постепенно утрачивать свои позиции. В то же время ряд зарубежных стран, например Китай, Япония, Южная Корея, ранее не являвшиеся крупными судостроителями, активно занялись развитием своей судостроительной промышленности и достигли высоких результатов.

По экспертному мнению, в этих условиях вновь созданная в РС Служба должна сосредоточить свои усилия на следующих важных направлениях:

- участие в проведении единой политики РС при осуществлении технического наблюдения;

- разработка и совершенствование нормативных документов, регламентирующих деятельность Службы;

- участие в разработке и совершенствовании форм и методов технического наблюдения, координация и контроль деятельности подразделений РС;

- участие в подготовке предложений РС по совершенствованию законодательства РФ в области безопасности мореплавания и выполнению требований международных конвенций и соглашений в области морского судоходства по направлениям деятельности Службы;

- участие в разработке и совершенствовании эффективных систем учета судов в постройке, их освидетельствовании и совершенствовании форм документов, выданных по результатам их освидетельствований;

участие в разработке и совершенствовании системы учета данных по результатам технического наблюдения РС за изготовлением материалов и изделий, участие в разработке нормативных документов по техническому наблюдению в промышленности;

участие в организации взаимодействия РС с морскими администрациями государств флага, с объединениями судовладельцев и судоходными компаниями по вопросам технического наблюдения РС на этапах изготовления и постройки новых судов;

подготовка статистической отчетности и информации по запросам подразделений РС и заинтересованных организаций по судам в постройке под техническим наблюдением РС и одобренным материалам и изделиям для судов.

Сегодня работа РС коренным образом отличается от его работы в предыдущие десятилетия, что обусловлено наличием жесткой конкуренции с другими мировыми классификационными обществами. Современный судовладелец может по своему усмотрению выбирать для своего судна флаг и классификационное общество. В создавшихся условиях новая Служба должна сыграть важную роль в сохранении старых клиентов РС и привлечении новых судовладельцев и верфей к сотрудничеству, способствуя укреплению взаимопонимания и повышению качества услуг РС.

С активизацией интереса государства к отрасли возникает вопрос о возможности распространения на РС преференций в случаях, когда государство будет способно предоставлять таковые судостроителям и судовладельцам для новых и уже эксплуатирующихся гражданских судов и другой гражданской морской техники.

Известно, что благополучие судостроительной отрасли, судовладельцев и РС возможно будет зависеть от тех преференций, которые сможет предоставить государство. Проблема преференций в развивающихся отраслях экономики присутствует во многих странах, когда та или иная отрасль в них находится в процессе стагнации. Если говорить о судостроении и судоходстве в России, то во все времена наше государство субсидировало, тем или иным способом, существование этого сектора экономики.

Характерные аргументы в качестве примера. Например, в Японии отечественным судовладельцам при заказе или покупке судов выдается ипотечный кредит под минимальные 5 % годовых. Испанские судостроительные предприятия обеспечиваются кредитами в размере 85 % от цены судна, в США – 87 % на срок до 25 лет и т. д. Правительства Японии и ФРГ предоставляют национальным верфям субсидии в

размере до 30 % для компенсации разницы между затратами верфи и рыночной стоимостью судов. В Испании – до 19 %, в Италии – до 13 %.

В Соединенных Штатах функционирует система протекционистских законов в поддержку национального судостроения. В частности, закон Джонса, согласно которому каботажные и внутренние грузоперевозки в стране могут осуществляться только судами, построенными и зарегистрированными в США и принадлежащими компаниям с долей американского капитала не менее 75 %.

В России этот вопрос находится в стадии обсуждения.

Из сказанного выше следует, что для РС совершенно необходимо, своевременно и справедливо, ставить перед Министерством транспорта РФ, когда оно обращается в Правительство РФ и Государственную Думу при формировании очередного бюджетного закона, вопросы протекционистского характера, касающиеся деятельности РС.

В качестве примера приведем несколько из них, возможных и крайне необходимых.

1. Законодательно утвердить монопольное право России использовать на трассе Северного морского пути суда любого флага, всех типов и назначений, но *только* с классом РС и/или двойным классом. Для этого нужна международная правовая экспертиза этой идеи и обращение Министерства транспорта в Правительство РФ и Государственную Думу РФ.

2. В связи с созданием ОАО ОСК со 100 % государственным капиталом, обратиться в Министерство транспорта и Правительство РФ с просьбой о полном или частичном субсидировании государственных заказов на постройку гражданских судов и морской гражданской техники на верфях и заводах ОСК и других верфях, включая суда для лизинга, *только* при условии их постройки на класс РС или двойной класс.

3. С учетом аварии на буровой платформе «ВР» в Мексиканском заливе США, добиваться через Министерство транспорта и Правительство РФ обязательного государственного требования к владельцам и пользователям буровых газовых или нефтяных платформ о применении данных платформ на российских шельфах Арктики и/или в других морских районах России *только* при наличии у них класса РС и/или двойного класса.

4. Такие же государственные требования должны применяться при строительстве буровых платформ и другой гражданской морской техники на верфях и заводах ОАО ОСК или за рубежом.

5. Использовать инициативу ГУП «Росприроднадзор» и «Ространснадзор» в целях получения от государства права на проверку действующих российских шельфовых платформ, проводимую сейчас в России из-за аварии платформы «ВР» в Мексиканском заливе США, чтобы сохранить приоритет РС по техническому наблюдению за этой прибыльной и высокоэффективной техникой.

Список литературы

1. Литовкин Д. Секретарь Совета безопасности Николай Патрушев: Судостроению нужна модернизация / Дмитрий Литовкин // Известия. – 2010. – 10 июня.
2. Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 года: [утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 22 ноября 2008 г. № 1734-р].
3. Развитие гражданской морской техники на 2009 – 2016 годы: федеральная целевая программа: [утверждена постановлением Правительства Российской Федерации от 21 февраля 2008 г. № 103].
4. Развитие транспортной системы России на 2010 – 2015 годы: федеральная целевая программа: [утверждена постановлением Правительства Российской Федерации от 20 мая 2008 г. № 377].
5. Решетов Н.А., Блинов Э.К. Участие Российского морского регистра судоходства в арктической стратегии Российской Федерации // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – Вып. 32. – СПб., 2009. – С. 3 – 9.

И.А. Баранов, В.Е. Злыгостев

ПЛАВУЧАЯ АТОМНАЯ ТЕПЛОЭЛЕКТРОСТАНЦИЯ ПРОЕКТА 20870 С РЕАКТОРНЫМИ УСТАНОВКАМИ КЛТ-40С

В настоящее время одним из самых интересных и инновационных проектов, осуществляемых в судостроительной отрасли, является создание плавучей атомной электростанции малой мощности «АКАДЕМИК ЛОМОНОСОВ». Это уникальное судно строится в Санкт-Петербурге на Балтийском заводе. От Российского морского регистра судоходства техническое наблюдение за строительством осуществляет филиал по атомным судам.

Прежде всего, необходимо уточнить, что надо понимать под термином «электростанция малой мощности». В документах международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ) используется градация, согласно которой, реакторами малой мощности называются установки с мощностью менее 300 МВт(э).

Эта градация используется, в первую очередь, в энергетике, обеспечивающей работу сети, а не автономного потребителя.

В России традиционно малая энергетика близка к понятию автономных источников энергии. В этой области не требуются блоки большой мощности, потому для подобных целей 300 МВт(э) – излишняя производительность. Поэтому верхняя граница малой атомной энергетики лежит в пределах 50–100 МВт(э).

За рубежом малая атомная энергетика начиналась с военной американской программы в 50–60-х годах. В США была предпринята попытка использовать реакторы различных типов для решения задач по обеспечению энергоснабжения оборонных объектов. В рамках именно этой программы была, в частности, сооружена плавучая АЭС «МН-А1 Sturgis» (на базе атомной подводной лодки), которая базировалась в зоне Панамского канала. Мощность ее установок не превышала 40 МВт(э).

В нашей стране также были развернуты работы по созданию объектов малой атомной энергетики. Первым подобным реактором стала установка ТЭС-3. Это транспортабельная АЭС, размещен-

ная на 4-х вездеходах. Ее в рекордно короткие сроки построили и запустили в Физико-энергетическом институте. Это была небольшая станция, производившая всего 1,5 МВт(э), с водо-водяным корпусным реактором. Энергопуск ТЭС-3 произошел 13 октября 1961 года. Эксплуатация транспортабельной станции продолжалась до 1965 года.

Единственным в мире действующим промышленным объектом малой атомной энергетики является Билибинская АТЭЦ на Чукотке. Четыре блока этой атомной теплоэлектроцентрали, могут поставлять в энергосистему до 48 МВт электроэнергии и надежно снабжают теплом г. Билибино. Станция отработала уже 30 лет, и недавно завершены работы по обоснованию продления ее эксплуатации на следующие 15 лет.

Наиболее продвинутыми оказались проекты атомных станций малой мощности (АСММ) с реакторными установками типа АБВ (Атомная Блочная Водяная). Главной особенностью АБВ является интегральная конструкция: в корпусе реактора размещается не только активная зона, но и парогенератор. Это радикально уменьшает разветвленность радиоактивных контуров, а также дает возможность отказаться от циркуляционного насоса и обеспечить работу реактора на полной мощности при естественной циркуляции теплоносителя внутри корпуса реактора. Весьма заманчивые перспективы с точки зрения и экономики, и безопасности.

Работы по АСММ с реакторами АБВ продвинулись в свое время достаточно далеко. В 1994 году был завершен проект плавучей атомной электростанции (ПАЭС) «ВОЛНОЛОМ-3» с двумя реакторами АБВ-6. Главным конструктором реакторной установки было одно из сильнейших конструкторских предприятий отрасли – ОКБМ им. И.И.Африкантова. Технический проект этой станции выполнила хорошо известная проектная организация ЦКБ «Балтсудопроект».

Судьба проекта ПАЭС «ВОЛНОЛОМ-3» оказалась не самой завидной. Балтийский завод в Санкт-Петербурге был готов принять заказ на изготовление, но заказчик в лице Министерства обороны прекратил финансирование, и строительство ПАЭС пришлось тогда отложить. В конечном итоге, руководство Министерства атомной энергетики, понимавшее перспективность для России плавучих АЭС, приняло решение сделать ставку в продвижении этого направления на петлевой моноблочный реактор КЛТ-40, уже использовавшийся достаточно широко в морской транспортной энергетике на судах ледокольного флота России. Мотивировка была простая: для таких реакторов есть ра-

ботающие прототипы, имеются производственная база и кооперация предприятий. Целесообразно было опереться на этот могучий задел при создании плавучей атомной станции. А первый приказ о строительстве плавучей атомной электростанции для городка Певек Чукотского автономного округа Министерство атомной энергетики выпустило еще в 1995 году. Примерно в то же время проект был анонсирован сразу на нескольких международных выставках, а затем включен в целый ряд государственных программ.

Первоначально были определены четыре перспективные площадки для установки плавучих ПАТЭС: в Северодвинске (Архангельская область), Дудинке (Красноярский край), Вилучинске (Камчатка) и Певеке (Чукотка). Однако в Дудинке работы были заморожены, поскольку власти сделали ставку на разработку местных газовых месторождений. А в Певеке все прекратилось из-за высокого риска неплатежей за поставленную энергию. Поэтому в 2000 году было принято решение о переносе площадки базирования плавучей АЭС в Северодвинск.

Строительство первого плавучего энергетического блока (ПЭБ) мощностью в 70 МВт сейчас оценивается в 9,1 млрд рублей (около 335 млн долларов). Это немало. По данным РАО «ЕЭС России», стоимость строительства первого блока Северо-Западной ТЭЦ мощностью 450 МВт составила 617 млн долларов. Правда надо учесть, что в сумму создания пилотной ПАТЭС включены и расходы на научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы, которые при тиражировании станции будут гораздо меньшими.

Главным инвестором плавучих станций пока выступает ОАО «Концерн Росэнергоатом», который оценивает срок окупаемости плавучей АЭС в 10 лет (остальные 20–25 лет эксплуатации она будет приносить прибыль). Дефицит средств оказался настолько ощутимым, что атомщики всерьез рассматривали предложение китайского Эксимбанка ссудить 85 млн долларов, необходимых для постройки корпуса судна при условии размещения заказа в Китае. Но политически важный проект, все же, достался россиянам.

Общие сведения об атомной станции малой мощности на базе ПЭБ

Атомная теплоэлектростанция состоит из ПЭБ, гидротехнических сооружений и береговой инфраструктуры. ПЭБ предназначен для выработки электрической и тепловой энергии и обеспечивает выдачу в

береговые сети электроэнергетики и теплофикационной воды. Гидротехнические сооружения предназначены для установки и раскрепления ПЭБ у берега. Техническая связь с берегом осуществляется через причальные сооружения. Имеется возможность подхода и швартовки к ПЭБ судов снабжения и обеспечения. Береговые сооружения и специальные устройства предназначены для передачи электроэнергии и тепла потребителям.



Таблица 1

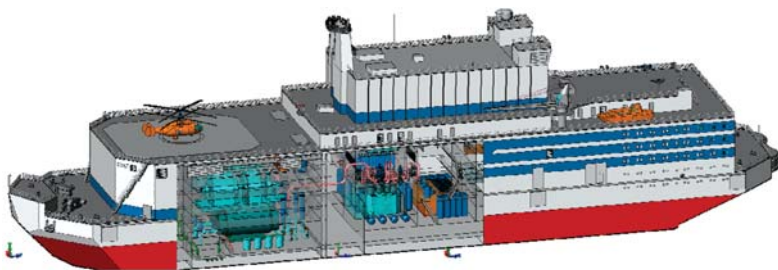
Основные характеристики АСММ на базе ПЭБ с РУ КЛТ-40С

№	Наименование характеристики	Значение
1.	Установленная мощность: электрическая (на клеммах генератора), МВт тепловая, выдаваемая в систему теплоснабжения, Гкал/ч	2×35 2×25
2.	Максимальная электрическая мощность (на клеммах генератора), МВт	2×38,5
3.	Максимальная тепловая мощность (с включенными подогревателями высокого давления), Гкал/ч	2×73
4.	Собственное электропотребление, МВт	4–6
5.	Собственное теплоснабжение, МВт (тепл.)	~3,2
6.	Площадь береговой территории, га	1,5
7.	Площадь акватории, га	6,0
8.	Численность обслуживающего персонала (вахта), чел.	58
9.	Период строительства, лет: первая площадка (без учета времени на лицензирование) последующие	5 4

Плавучий энергетический блок

ПЭБ представляет собой гладкопалубное несамоходное стоечное судно с упрощенными обводами корпуса и многоярусной надстройкой.

Корпус ПЭБ цельносварной, имеющий ледовые подкрепления и специальные средства для буксировки и раскрепления. Основной корпус и силовые конструкции надстройки выполняются из стали, обладающей высоким сопротивлением разрушениям. Подводная часть корпуса защищена от коррозии электрохимической защитой и лакокрасочным покрытием. Реакторный отсек и отсек хранения отработавшего топлива защищены от внешних воздействий (столкновений, посадки на мель) конструктивной противоударной защитой. Конструктивная компоновка ПЭБ включает хранилища отработавших тепловыделяющих сборок (ОВТС), хранение ОВТС, жидких (ЖРО) и твердых (ТРО) радиоактивных отходов и собственный комплекс перегрузок реакторов, обеспечивающий перегрузки без привлечения специальных технологических баз перезарядки в течение межремонтного периода. В проекте реализуются технические решения (создание защитной оболочки, защитного ограждения, автономная система вентиляции), исключающие выбросы радиоактивности в окружающую среду.



ПЭБ состоит из двух основных функциональных модулей: жилого модуля, расположенного в кормовой части и энергетического модуля, расположенного в центральной и носовой части. Жизнедеятельность ПЭБ в целом обеспечивается общесудовыми системами. Функционирование обоих модулей обеспечивается системой автоматического управления.

Энергетический модуль предназначен для выработки электрической и тепловой энергии. В состав модуля входят две реакторные

установки, две паротурбинные установки и электроэнергетическая система. В основу компоновки оборудования положен блочный принцип (1 реактор + 1 турбина + 1 генератор).

Таблица 2

Основные технические характеристики ПЭБ

№	Наименование характеристики	Значение
1.	Тип	Несамоходное стоечное судно
2.	Класс РС	KE ⊕ 2 A2
3.	Длина, м	140,0
4.	Ширина, м	30,0
5.	Высота борта, м	10,0
6.	Осадка, м	5,6
7.	Водоизмещение, т	21 000
8.	Количество кают для персонала, основных/запасных	64 (одноместных) / 10
9.	Срок эксплуатации ПЭБ, не менее, лет	36 (3 эксплуатационных цикла)
10.	Максимальное количество топливных загрузок за эксплуатационный (межремонтный) цикл, шт.	4
11.	Продолжительность ремонта, с учетом буксировки лет	2

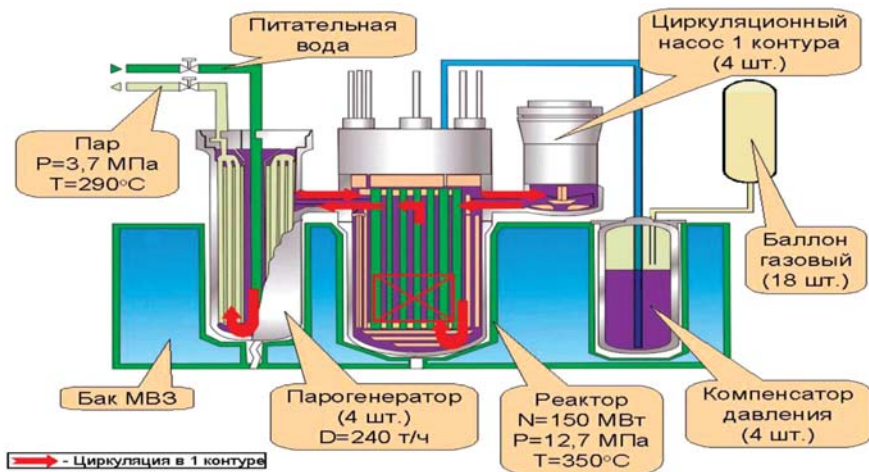
Краткое описание реакторной установки КЛТ-40С

Реакторная установка (РУ) КЛТ-40С разработана на базе РУ ледокольного типа с использованием судовых технологий и технических решений, подтвержденных сорокалетним опытом безаварийной эксплуатации. В состав РУ КЛТ-40С входят: реактор, четыре парогенератора и четыре насоса 1-го контура, которые объединены короткими силовыми патрубками в компактный парогенерирующий блок.

Блок размещен в баке металловодной защиты (МВЗ), который заключен в защитную оболочку.

В РУ КЛТ-40С по сравнению с действующими прототипами применен ряд новых технических решений, обеспечивающих повышенную безопасность, в частности:

1. двухканальная пассивная система отвода остаточных тепловыделений при авариях, связанных с полным обесточиванием ПЭБ, обеспечивающая безопасное состояние РУ в течение суток;



2. система снижения давления в защитной оболочке при максимальной проектной аварии с барботажной и конденсационными подсистемами пассивного принципа действия;

3. активная система аварийного охлаждения активной зоны в авариях с потерей теплоносителя 1 контура имеет два канала, каждый из которых включает цистерну с запасом воды и два насоса и обеспечивает поддержание активной зоны в безопасном состоянии с учетом принципа единичного отказа. Каждый канал включает также подсистему пассивного принципа действия с использованием гидроаккумуляторов. Для сокращения количества требуемой воды и соответствующего уменьшения радиоактивных отходов предусмотрены средства сбора конденсата с последующим возвратом его в реактор;

4. применена система внешнего охлаждения корпуса реактора пассивного принципа действия как средство защиты корпуса реактора от проплавления при запроектных авариях, связанных с осушением и значительным повреждением активной зоны;

5. в качестве страховочных устройств для запроектных аварий, связанных с отказом управляющих систем безопасности, в системе управления и защиты реактора применены самосрабатывающие устройства.

Таблица 3

Основные технические характеристики РУ

Тепловая мощность, МВт	150
Паропроизводительность, т/ч	240
Давление первого контура, МПа	12,7
Давление пара за парогенератором, МПа	3,8
Температура перегретого пара, °С	290
Температура питательной воды, °С	170
Эксплуатационный предел изменения мощности, %	10–100
Кампания активной зоны, лет	2,5–3

Для сокращения количества жидких радиоактивных отходов применена система безотходной технологии, используемая на атомных судах.

Паротурбинная установка

На ПЭБ установлено 2 паротурбинных установки типа ТК-35/38-3.4. Турбина теплофикационного типа, предназначена для выработки тепла и привода генератора как источника электроэнергии. Расход свежего пара на турбину составляет 220 т/ч при температуре 285 °С. В турбине имеется 3 отбора пара. Первый и третий отборы нерегулируемые, предназначены для подогрева питательной воды. Второй отбор – регулируемый, пар этого отбора направляется на подогрев питательной воды и нагрев воды промежуточного контура.

Диапазон регулирования отпуска тепловой энергии на подогреватели промежуточного контура составляет 0 – 100 % при условии наличия нагрузки на клеммах генератора не менее 30 % от номинальной. Указанное ограничение связано с охлаждением последних ступеней турбины. В диапазоне электрических нагрузок 30 – 100 % от номинальной величины обеспечивается независимое регулирование отпуска тепловой и электрической энергии. Возможна работа турбины с отключенными подогревателями промежуточного контура.

Тепловой схемой турбины предусмотрен дополнительный отпуск тепла через пиковые подогреватели промежуточного контура за счет острого пара, отбираемого перед турбиной. При этом происходит снижение электрической мощности. Включение пиковых подогревателей необходимо в зимний период для покрытия пиковых тепловых

нагрузок. Отпуск тепла от турбины осуществляется через промежуточный контур водой под давлением, что является дополнительным барьером от проникновения продуктов радиации к потребителям тепла.

Таблица 4

Основные технические характеристики турбины ТК-35/38-3,4

№	Наименование характеристики	Значение
1.	Номинальная электрическая мощность, МВт	35
2.	Номинальная тепловая мощность, Гкал/ч	25
3.	Максимальная электрическая мощность (без выдачи тепловой мощности), МВт	38,5
4.	Давление пара в регулируемом отборе, МПа	0,357
5.	Температура пара в регулируемом отборе	139,7
6.	Номинальный подогрев воды в конденсаторе, °С	13,4
7.	Способ передачи тепловой энергии с ПЭБ	Промежуточный контур
8.	Теплоноситель промежуточного контура	вода
9.	Давление воды промежуточного контура, МПа	~1,6
10.	Расход воды промежуточного контура, м³/ч	420
11.	Номинальная температура воды промежуточного контура (выход/вход), °С	130/70

Примечание. Характеристики приведены для проектной температуры охлаждающей воды 10 °С. Автономность ПЭБ по запасам масла для турбогенераторных установок составляет 1 год

Электроэнергетическая система. Система выработки и выдачи электроэнергии в энергосистему

Выработка электроэнергии осуществляется двумя синхронными генераторами типа TAG 8123, с воздушной косвенной системой охлаждения, номинальной мощностью 35 МВт каждый, напряжением 10,5 кВ, частотой 50 Гц, сопряженными с паровыми турбинами.

Для подключения генераторов, щитов выдачи электроэнергии и распределения электроэнергии напряжением 10,5 кВ имеются два главных распределительных устройства. Щиты выдачи электроэнергии (ЩВЭ) предназначены для выдачи электроэнергии от ПЭБ на берег с помощью гибких шланговых кабелей, соединяющих ЩВЭ с береговыми приемными устройствами.

Экологические аспекты проекта

Принятые в проекте технические решения практически исключают отрицательное воздействие АСММ на воздушный и водный бассейны района размещения станции.

1. Наличие на ПЭБ экологического блока обеспечивает очистку и обработку сточно-фановых и нефтесодержащих вод, а также сбор, обработку и удаление пищевых и твердых бытовых отходов.

2. Уровни радиационного воздействия на население и окружающую среду при нормальной эксплуатации составляют тысячные доли процента от дозового предела, установленного действующими Нормами радиационной безопасности. Радиационное воздействие при максимальной проектной аварии не превышает 75 % от дозового предела, установленного для населения.

3. Все радиоактивные материалы, накапливающиеся во время эксплуатации и перезарядки реакторных установок, локализуются, перерабатываются и хранятся на ПЭБ в специальных хранилищах, цистернах и контейнерах.

Общий срок строительства ПЭБ – 4 года. Сроки буксировки ПЭБ к месту базирования и пуско-наладочные работы составляют 0,5 – 1 год. Общий срок строительства станции от момента получения лицензии на строительство – 5 лет.

Планируемые места размещения плавучих АЭС



Повышенный интерес к разработке российских конструкторов давно проявляют за рубежом. Привлекает не только мобильность станции. Ядерная установка – надежный источник энергии для опреснительных комплексов. Установив подобное оборудование на ПЭБ, можно получать до 240 тыс. м³ пресной воды в сутки. Однако с инвестициями иностранцы пока не торопятся, ожидая запуска пилотного проекта в Вилучинске.

Список литературы

1. Атомные станции на основе плавучих энергоблоков – основные требования, опыт создания и задачи развития / Зверев Д.Л., Костин В.И., Панов Ю.К., Петрунин В.В., Полуничев В.И., Вешняков К.Б. // V Межотраслевая научно-практическая конференция: Плавучие АТЭС – обоснование безопасности и экономичности, перспективы использования в России и за рубежом (ПАТЭС-2008).

2. Актуальные вопросы реализации проекта строительства плавучих атомных теплоэлектростанций / Завьялов С.Н., Кучерявенко М.Ю. // V Межотраслевая научно-практическая конференция: Плавучие АТЭС – обоснование безопасности и экономичности, перспективы использования в России и за рубежом (ПАТЭС-2008).

М.Н. Кринская, А.В. Фокин, Е.Р. Кайгородов, С.А. Шишкин

ОСВИДЕТЕЛЬСТВОВАНИЕ СУДОВ ДЛЯ ПЕРЕВОЗКИ СЖИЖЕННОГО ПРИРОДНОГО ГАЗА НА КЛАСС РС

Российский морской регистр судоходства (РС) и Американское бюро судоходства (АБС), являясь классификационными обществами-членами МАКО, плодотворно сотрудничают в различных направлениях деятельности на протяжении долгого времени. Одним из таких направлений является подготовка персонала.

Рассматривая перевозку сжиженного природного газа (СПГ) из арктических регионов как перспективное направление и уже приступив к созданию совместных правил, РС и АБС приняли стратегическое решение о разработке учебного курса по судам для перевозки СПГ с ледовыми усилениями с целью обучения сюрвейеров для проведения освидетельствований такого типа судов.



Нет никаких сомнений в том, что объемы транспортировки газа из Арктических регионов будут увеличиваться, а, следовательно, уже сегодня морской индустрии и обществу в целом нужна гарантия безопасности таких перевозок.

На сегодняшний день РС является лидером в области разработки правил для ледоколов и судов ледового плавания благодаря столетнему опыту навигации судов в суровом арктическом климате, постоянным научным исследованиям в области освоения Арктики, нашедшим свое отражение в создании уникальной системы требований к ледовым усилениям арктических судов. В свою очередь, АБС – лидер в вопросах постройки и технического освидетельствования газовозов. Объединение опыта двух сильнейших классификационных обществ, обладающих огромной научной и практической базой, позволило в октябре 2008 года на базе учебного центра РС в Санкт-Петербурге провести совместный РС – АБС учебный курс «LNG New Construction» по освидетельствованию судов для перевозки СПГ с ледовыми усилениями.

16 специалистов РС, прослушав данный курс и успешно сдав экзамены, получили Сертификат о завершении учебного курса. Лекторами со стороны РС и АБС были освещены следующие темы: постройка и освидетельствование судов для перевозки сжиженного природного газа, вопросы, связанные с ледовыми усилениями, функционированием механизмов в ледовых условиях, винторулевым комплексом и т. д.

В течение 2009 – 2010 годов была организована практическая подготовка инспекторов РС на верфях Португалии, Сингапура, Китая, Объединенных Арабских Эмиратов, Малайзии, после завершения которой специалистам РС были оформлены сертификаты, позволяющие проводить освидетельствования судов для перевозки СПГ.

Уникальный опыт, последние научно-технические разработки, репутация, заслуженная благодаря высокому качеству услуг, предоставляемых на протяжении десятилетий, наряду с успешным сотрудничеством с ведущими классификационными обществами позволяют РС занимать лидирующую позицию в области обеспечения высоких стандартов безопасности при перевозке грузов, включая арктические регионы, что становится все более и более важным и перспективным в наши дни. РС надеется, что данный совместный проект покажет готовность со стороны РС к освидетельствованию газовозов, а также привлечет внимание морской индустрии в отношении новых проектов.

Немаловажным и, без преувеличения, знаковым событием в истории РС стало подписание в июле 2009 года Меморандума о Соглаше-

нии между ОАО «СОВКОМФЛОТ», компанией «Unicom Management Services (Cyprus) Ltd.», Регистром Ллойда и РС на совместную классификацию судна для перевозки СПГ «GRAND ANIVA», IMO No. 9338955. Знаменательно это событие тем, что впервые за всю историю РС в его класс должно было быть введено судно такого типа.

Суда, перевозящие СПГ, являются уникальными техническими сооружениями и имеют ряд особенностей. В силу того, что СПГ, являясь энергетическим сырьем, перевозится большими партиями, суда для его перевозки имеют большие размеры и грузовместимость. Поскольку СПГ перевозится в специально выделяемых изолированных емкостях, а также в связи с тем, что его удельный вес составляет всего $0,42 \text{ т/м}^3$, т. е. почти в два раза меньше удельного веса сырой нефти, перевозящие его суда при одинаковых (например, с танкерами) главных размерениях обладают существенно меньшей грузоподъемностью. Так, судно для перевозки СПГ в размерах танкера дедвейтом 150 тыс. т способно перевозить лишь 50–55 тыс. т сжиженного газа. На величину главных размерений определенное влияние оказывает выбор типа танков, в которых перевозится сжиженный газ. Запатентовано большое количество типов грузовых танков для судов, перевозящих СПГ. Однако практическое применение в настоящее время находят в основном два из них:

1. вкладки сферические танки (система Kvaerner–Moss), имеющие толщину стенок 30–70 мм (экваториальный пояс – 200 мм), изготавливаемые из алюминиевых сплавов с наружной изоляцией пенополиуретаном. Они устанавливаются («вкладываются») в корпус судна без соединения с корпусными конструкциями, опираясь на днище судна через специальные опорные цилиндры;

2. встроенные мембранные танки (система Gas Transport–Technigas), имеют форму, близкую к прямоугольной. Мембраны изготавливаются из тонкого (0,5–1,2 мм) листа легированной стали либо инвара (сплав железа и никеля) и являются лишь оболочкой, в которую загружается сжиженный газ. Все статические и динамические нагрузки через слой теплоизоляции передаются на корпус судна. Безопасность требует наличия основной и вторичной мембраны, обеспечивающей сохранность СПГ на случай повреждения основной, а также двойного слоя теплоизоляции – между мембранами и между вторичной мембраной и корпусом судна.

Анализируя имеющиеся материалы, можно сделать вывод, что при вместимости судна для перевозки СПГ до 130 тыс. м^3 использование сферических танков более эффективно, чем мембранных. В

диапазоне 130–165 тыс. м³ их технико-экономические характеристики примерно равны, при дальнейшем увеличении вместимости использование мембранных танков становится предпочтительным в силу того, что мембранные танки примерно вдвое легче, чем сферические, их форма позволяет использовать корпусное пространство судна с максимальной эффективностью. Благодаря этому, суда с танками мембранного типа, имеют меньшие размеры и водоизмещение в расчете на единицу грузоподъемности. Они дешевле при постройке примерно на 15–20 %, чем суда со сферическими танками. В абсолютных цифрах – стоимость судна с танками мембранного типа, имеющего стандартную вместимость (155 тыс. м³), дешевле на 20–30 миллионов долларов США. Также суда с танками мембранного типа экономичнее в эксплуатации, в частности, за счет более низких портовых сборов и платы за проход через Суэцкий и Панамский каналы (плата за каждый проход судна с танками мембранного типа меньше примерно на 100 тыс. долларов США). В настоящее время, распределение примененных систем сохранения груза на судах для перевозки СПГ в эксплуатации следующее:

65 % – мембранные;

33 % – сферические.

На строящихся в настоящий момент судах для перевозки СПГ мембранная система применяется в 80 % случаев.

Возвращаясь к т/х «GRAND ANIVA» отметим, что судно построено в 2008 году на верфи Mitsubishi Heavy Industries Ltd., Нагасаки. Систему сохранения груза на нем составляют 4 независимых грузовых танка системы Kvaerner-Moss общей вместимостью 145 тыс. м³ СПГ.

Главные размерения судна: длина полная – 288 м; ширина – 49 м; высота борта – 26,8 м; валовая вместимость – 122 239 ед.

Судно снабжено паротурбинной установкой с турбинами переднего и заднего хода. Усилие на вал передается через редуктор. Пар поступает от двух главных котлов, работающих как на тяжелом топливе, так и на природном газе. Электростанция судна состоит из двух вспомогательных дизель-генераторов мощностью 1730 кВт и двух турбогенераторов мощностью 3200 кВт. Класс автоматизации согласно требованиям Регистра Ллойда – UMC (Unmanned Machinery Spaces).

Освидетельствование по вводу судна в совместный класс было закончено с положительными результатами 10 января 2010 года. Судну присвоен класс PC с символом: **KM★Ice2 [2] AUT1-C OMBO LI BWM Gas carrier type 2G (methane).**

Без сомнения, принятие в класс РС судна такого типа послужит хорошей базой для подготовки инспекторов, и позволит перенять у Регистра Ллойда опыт освидетельствования судов для перевозки СПГ. Хочется надеяться, что «GRAND ANIVA» станет лишь первым шагом РС на рынке перевозок сжиженного природного газа, и уже в ближайшие годы в классе РС появится еще не одно современное судно для перевозки СПГ.

Список литературы

1. Вовк В.С., Новиков А.И., Глаголев, А.И. и др. Мировая индустрия и рынки сжиженного природного газа: прогнозное моделирование. – М.: Газпром экспо, 2009. – 312 с.
2. Цапко Ю.М. Эксплуатация танкеров-газовозов. – Одесса: ЦПАП, 1998. – 142 с.

УДК 629.5.067:625.173.7

М.А. Ганноев

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ И ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕОРИИ РИСКОВ ДЛЯ ДАЛЬНЕЙШЕГО СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ БЕЗОПАСНОСТИ СУДНА ПРИ ЗАМЕНЕ БАЛЛАСТА В МОРЕ

1. Описание методики применения условных рисков для оценки безопасности морских судов [1]

Оценка риска служит той мерой, которая еще на стадии предпроектной проработки из имеющихся вариантов технических решений позволяет осуществить оптимальный выбор с точки зрения минимизации затрат на создание объекта и возможных убытков при реализации данного решения на практике. При этом под риском R обычно понимают сочетание вероятности наступления нежелательного события P и возможного ущерба от него C , описываемое выражением:

$$R = P \cdot C. \quad (1-1)$$

С этой целью ИМО для морского судоходства в 1997 г. разработала Временное руководство по формализованной оценке безопасности (ФОБ), а в 2007 г. представила консолидированный текст Руководства [2].

ФОБ направлена на повышение безопасности в судоходстве и предназначена для использования в качестве инструмента: при разработке новых правил, при сравнении требований существующих правил с требованиями новых нормативных документов, анализе различных технических и эксплуатационных решений, включая челове-

ский фактор, и установлении баланса между безопасностью и ценой ее обеспечения. Главное достоинство ФОб заключается в том, что недостаточность или отсутствие информации по авариям и отказам при оценке риска восполняется применением экспертной оценки.

Прямое использование ФОб для решения инженерных вопросов достаточно трудоемко из-за необходимости проведения процедуры экспертной оценки. Кроме того, независимые группы экспертов при решении одной и той же задачи могут получить разные результаты.

Источниками возможных погрешностей ФОб могут быть следующие:

1. ошибки при классификации аварийных случаев (АС);
2. то обстоятельство, что при ранжировании тяжести последствий ФОб не дает конкретных указаний, какие последствия следует относить к незначительным, значительным, серьезным и катастрофическим, т. е. экспертам необходимо иметь ориентиры, которых они могли бы придерживаться, чтобы оценки выполнялись в едином масштабе;
3. погрешность экспертной оценки частоты АС.

Поэтому ФОб следует рассматривать как методологическую основу для разработки инженерных методик оценки риска.

В данном случае для решения определенного круга задач, используя как экспертную оценку, так и статистические данные по авариям, необходимо выполнить следующее:

- определить основные виды опасностей (виды АС);
- получить таблицу соответствия описания последствий АС со степенью ущерба и определить зоны распределения тяжести ущерба;
- выявить критичные элементы судна, отказ которых приводит к существенным последствиям, и определить для них параметры, характеризующие их техническое (текущее) состояние;
- подобрать или разработать математическую модель отказа критичных элементов, позволяющую вычислять вероятность возникновения АС;
- получить распределение степени тяжести ущерба при отказе критичного элемента;
- представить результаты расчета риска в условном виде как отношение риска при фактическом техническом состоянии критичного элемента к риску при состоянии, соответствующем минимальным требованиям нормативных документов.

Подобная методика позволила бы инженеру выполнять оценку риска обычными расчетными методами уже без применения экспертной оценки и могла бы использоваться при разработке нормативных документов.

Виды опасностей

В основу классификации по видам опасностей или видам АС положены такие состояния судна, при которых создается реальная угроза его безопасности и происходит потеря мореходных качеств. К таким состояниям относятся 6 основных видов опасностей, а именно:

1. повреждение корпуса и нарушение его целостности вследствие воздействия внешних экстремальных эксплуатационных нагрузок;
2. опрокидывание судна или чрезмерное его накренение, не позволяющее продолжить рейс, вызванное неправильной загрузкой, смещением груза и повреждением средств его крепления, обледенением;
3. затопление судна вследствие нарушения герметичности наружного контура корпуса, непосредственно не связанное с воздействием экстремальных эксплуатационных нагрузок;
4. потеря хода и управляемости вследствие отказа главного двигателя, редуктора или вало-винто-рулевого комплекса;
5. контакт с внешними объектами (навигационные АС);
6. пожар или взрыв в помещениях судна.

Оценка тяжести ущерба от аварийного случая

Возможный ущерб C в формуле (1-1) можно представить в следующем виде:

$$C = C_{\max} 10^{-(S_{\max}-S)}, \quad (1-2)$$

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

Для определения ущерба, который эксперты должны оценить по описаниям в извещении об АС или в акте о внеочередном освидетельствовании в связи с АС, необходимо располагать таблицей, которая связывает качественное описание развития АС и их последствий со степенью ущерба S .

Таблица 1

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

R_s	Масштаб последствий	Последствия	S_{cp}	Нижняя граница S_n	Верхняя граница S_v
1	2	3	4	5	6
0	Несущественный	Никакого существенного вреда для людей, не влияет на эксплуатационную безопасность, не имеет заметных последствий			
1	Незначительный	Незначительное ухудшение характеристик управления или допустимых условий эксплуатации; локальный пожар без повреждения ответственного электрооборудования и кабелей, ликвидированный средствами пожаротушения или судовой системой водяного пожаротушения без привлечения посторонней помощи	1,22	0,50	1,50
2		Умеренные повреждения без утраты мореходных качеств; кратковременная потеря мореходных качеств с проведением аварийно-ремонтных работ силами экипажа или нахождение на мели менее 24 ч; смещение груза без утраты мореходных качеств; умеренные повреждения лопастей гребного винта; вмятины в наружной обшивке или бухтины верхней палубы без нарушения герметичности; повреждения фальшборта, конструкций надстроек выше первого яруса; пожар в пределах грузового отсека, в машинном отделении, в нескольких помещениях надстройки без повреждения ответственного электрооборудования и кабелей	2,14	1,50	2,50

Продолжение табл. 1

1	2	3	4	5	6
3	Значительный	Потеря хотя бы одного мореходного качества или посадка на мель на срок свыше 24 ч; существенное ухудшение эксплуатационных характеристик и характеристик управления, но позволяющее закончить рейс; легкие травмы или заболевания вследствие АС; облом лопасти гребного винта, отказ главного двигателя или редуктора в судовой энергетической установке из двух и более главных двигателей, отказ валопровода и винторулевого комплекса в двух- и более вальной движительной установке; нарушение герметичности верхней палубы, наружной обшивки выше ватерлинии или в районе двойного борта, второго дна, форпика; пожар с повреждением конвенционного электрооборудования или кабелей	3,13	2,50	3,60
4		Необходимость получения посторонней помощи или буксировки; тяжелые травмы или заболевания; поступление воды в отсек с сохранением плавучести судна; пожар с повреждением электрооборудования и кабелей, обеспечивающих управление, контроль и энергообеспечение судна	4,33	3,60	4,87

1	2	3	4	5	6
5	Опасный	Повреждение судна, приведшее к гибели людей; значительные повреждения, создающие угрозу безопасности судна; поперечные трещины в миделевом сечении корпуса; необходимость получения посторонней помощи; поступление воды в отсек с угрозой затопления судна; затопление машинного отделения с сохранением плавучести; выгорание всех помещений надстройки	5,10	4,87	5,32
6	Катастрофический	Гибель судна, единичные смерти; выгорание всех помещений судна; загрязнение окружающей среды	5,80	5,32	6,27
7		Гибель судна и людей; серьезный экологический ущерб	6,47	6,27	6,81

Необходимо отметить, что использование защитных мер не снижает вероятность появления повреждений, но может заметно уменьшить масштаб тяжести последствий при наступлении АС, т. е. защитные меры могут как сместить распределение тяжести последствий в область низких значений степени ущерба, так и преобразовать плотность распределения S к усеченному виду. Примером усечения распределения может стать наличие избыточной плавучести судна при нарушении общей прочности корпуса. В этом случае избыточная плавучесть не влияет на вероятность разлома и гибели судна, но ее наличие, когда одна из половин корпуса остается на плаву, дает дополнительное время на проведение спасательных операций и уменьшает число людских потерь.

Выявление критичных элементов

На первый взгляд, определение риска для системы «судно-груз-человек», состоящей из сотен тысяч узлов и элементов, выглядит трудновыполнимым из-за большого объема элементов. Но если задачу сузить и рассматривать только критичные узлы и элементы, отказ которых приводит к существенному риску нанесения ущерба, то количество рассматриваемых элементов системы уменьшится на не-

сколько порядков. Выполнение будет еще более упрощено, если использовать статистические базы данных по аварийности, поскольку они содержат информацию только по тем элементам (узлам), которые имели отказ, приведший к АС.

Вероятность отказа критичных элементов

Вероятность отказа критичного элемента обычно получают с использованием математических моделей отказа. Наиболее распространенными моделями отказа элементов сложных инженерных систем являются модель предельной (разовой) нагрузки и кумулятивные модели накопления повреждения.

Модель предельной (разовой) нагрузки описывает случаи, когда внешняя нагрузка достигает предельной несущей способности конструкции. Кроме задач строительной механики и деталей машин, эта модель пригодна, например, для расчета вероятности опрокидывания судна при качке, отказа главного двигателя из-за тепловой перегрузки и в других случаях. Для этой модели наступление отказа в рассматриваемом периоде времени имеет равную вероятность в любой момент времени.

К кумулятивным моделям накопления повреждений могут быть отнесены линейная модель коррозионного износа, модель усталостного повреждения и модель механического износа пар трения. Время наступления отказа зависит от скорости накопления повреждения и наступает тогда, когда накопленные повреждения достигают некоторого критического уровня. Возможны также комбинации этих моделей.

В случае отсутствия аналитической модели или недостаточности исходных данных для расчета могут использоваться статистические модели, основанные на методах статистического планирования эксперимента.

Кроме вышеперечисленных моделей встречаются нерасчетные случаи, которые обычно являются следствием следующего:

1. отказ критичного элемента вызван воздействием нагрузок, не предусмотренных условиями нормальной эксплуатации судна;
2. отказ является следствием ошибок проектирования, обслуживания или ремонта;
3. причину отказа не представляется возможным установить, например, в связи с гибелью судна.

То, что рассматриваемый отказ относится к нерасчетным случаям, не означает, что его можно игнорировать. Их следует учитывать в качестве «фоновых» АС при интегральной оценке степени безопасности судна. Вероятность отказа $P(\tau)$ находится по известной формуле теории надежности:

$$P(\tau) = 1 - \exp\left[-\int_0^{\tau} \lambda(\tau) d\tau\right], \quad (1-3)$$

где $\lambda(\tau)$ – интенсивность отказов, зависящая от времени.

Если не удастся получить зависимость $\lambda(\tau)$ от времени, то ее принимают постоянной и равной среднестатистической частоте отказа f .

Границы доверительного интервала для риска

В соответствии с формулой (1-1) нижняя и верхняя границы доверительного интервала для риска связаны с верхними и нижними границами доверительных интервалов для вероятности отказа P и возможного ущерба C следующими соотношениями:

$$R_{\gamma/2} = P_{\alpha/2} C_{\beta/2}, \quad R_{1-\gamma/2} = P_{1-\alpha/2} C_{1-\beta/2}, \quad (1-4)$$

где $C_{\beta/2}$, $C_{1-\beta/2}$ – значения ущерба по формуле (1-2), вычисленные при $S_{\beta/2}$ и $S_{1-\beta/2}$ соответственно;

α , β – вероятность непопадания в доверительный интервал вероятности отказа P и возможного ущерба C соответственно.

При этом вероятность непопадания в доверительный интервал γ для R равна $\alpha\beta/2$. Откуда, задаваясь вероятностью γ , можно определить вероятности непопадания в доверительный интервал для вероятности отказа P и возможного ущерба C

$$\alpha = \beta = \sqrt{2\gamma}. \quad (1-5)$$

Расчет условных рисков

Расчет риска нанесения вреда жизни и здоровью людей, имуществу и окружающей среде при отказе критичных элементов предполагает сравнение с допустимым уровнем. При этом данная оценка не должна вступать в противоречие с существующей системой технического регулирования и контроля.

Условные риски $\tilde{R}$ представляют собой отношение фактического риска R рассматриваемого элемента к допустимому уровню $[R]$.

При этом допустимый уровень риска $[R]$ вычисляется при значениях технических параметров, равных предельно допустимым величинам согласно требованиям действующих нормативных документов.

Так как требования нормативных документов должны выполняться, то значение $\tilde{R}$ не превышает 1. При пересмотре требований нормативных документов и изменении допустимых характеристик меняется

допустимый уровень риска, что автоматически корректирует значение относительного риска.

Другим достоинством условного риска является его слабая чувствительность к применяемым методикам расчета. Любая методика оценки рисков имеет погрешности, которые обычно смещены в одну и ту же сторону, при определении как фактического риска, так и его допустимого уровня. Возможны ситуации, когда разные группы исследователей, оценивая риск при отказе одного и того же элемента, могут получить существенные расхождения результата в абсолютном виде. При использовании относительного риска погрешности методики расчета будут входить как в числитель, так и в знаменатель выражения для определения условного риска, что частично нивелирует ошибку. Расчеты показывают, что применение условных рисков позволяет более чем в 10 раз уменьшить погрешность по сравнению с представлением риска в абсолютном виде.

Для наглядности представления результатов расчета по аналогии с коэффициентом запаса прочности удобно ввести понятие коэффициента запаса безопасности, который характеризует, во сколько раз фактический риск для рассматриваемого элемента меньше допустимого уровня.

Интегральная оценка безопасности судна

При оценке безопасности морских судов полезно знать не только значения относительных рисков для отдельных критичных элементов, но и более укрупненно, для видов и подвидов опасностей, а также для всего судна в целом. Для последнего случая введем интегральную оценку безопасности судна $S_{\text{судна}}$, равную:

$$S_{\text{судна}} = 1 - R_{\text{судна}} / [R]_{\text{судна}} = 1 - \sum_i G_i \sum_j g_{ij} [\sum_k \gamma_{ijk} \check{R}_{ijk} + (1 - \sum_k \gamma_{ijk})], \quad (1-6)$$

где G_i , g_{ij} , γ_{ijk} – удельный вес АС для вида, подвида опасности и критичного элемента соответственно, определяемые по результатам анализа аварийности;

i, j, k – индексы, соответствующие номеру вида опасности, подвида и критичному элементу;

$(1 - \sum_k \gamma_{ijk})$ – величина, соответствующая вкладу в общий риск некритичных элементов и элементов с нерасчетными случаями.

Величина $S_{\text{судна}}$ определена в области от 0 до 1, где 0 соответствует случаю, когда технические характеристики всех критичных элементов равны предельно допустимым величинам согласно требованиям действующих нормативных документов; 1 – для абсолютно безопасного судна.

Аналогичным образом можно провести суммирование по виду и подвиду опасности и получить значение относительного риска по этим укрупненным показателям.

В качестве заключения следует отметить, что расчет рисков не подменяет собой существующую систему наблюдения и надзора за безопасностью судов, а расширяет ее возможности. На практике, будь-то современное судно или старое, с изношенным корпусом и морально устаревшим оборудованием, – оба они получают документы, разрешающие их эксплуатацию, если минимальные требования классификационного общества и органов государственного надзора будут для них выполнены. В то время как очевидно, что уровень безопасности для этих судов различен.

Оценка безопасности представляет дополнительную информацию:

1. предупреждает судовой экипаж о наличии возможных опасностей с целью избежания необоснованных рисков;
2. дает возможность судовладельцу предусмотреть дополнительные защитные меры;
3. обращает внимание органов наблюдения и надзора на наличие слабых элементов;
4. предоставляет сведения остальным участникам транспортного процесса (фрахтователям и страховщикам) о фактическом уровне безопасности судна для учета при назначении фрахтовых ставок и страховых взносов.

Оценка безопасности может быть также полезна при проектировании судна и судового оборудования. Несмотря на то, что приведенный выше подход основан на статистических данных по аварийности, которая, в основном, относится к судам, находящимся в эксплуатации, а при создании современной техники используются новые технические решения, они, как правило, содержат уже известные элементы. Поэтому результаты расчета рисков по этим элементам позволяют и тут выбирать оптимальные решения.

2. Анализ возможности использования формализованной оценки безопасности морских судов при планировании замены балласта в море

Для выполнения анализа возможности использования ФОб при планировании замены балласта в море рассмотрим все основные этапы, описанные в предыдущем параграфе.

Виды опасностей

К основным видам опасностей при замене балласта в море следует отнести:

1. повреждения корпуса и нарушение его целостности вследствие непредусмотренного при проектировании изменения состояния нагрузки судна в процессе сброса и приема балласта;

2. опрокидывание судна или чрезмерное его накренение, не позволяющее продолжить рейс, также вызванное непредусмотренным при проектировании изменением состояния нагрузки судна в процессе сброса и приема балласта;

3. потеря хода и управляемости вследствие возникновения непредусмотренного при проектировании дифферента и оголения гребного винта;

4. контакт с внешними объектами (навигационные АС) вследствие возникновения непредусмотренных при проектировании значений крена и/или дифферента, существенно уменьшающих видимость с ходового мостика.

Оценка тяжести ущерба от аварийного случая

Оценка тяжести ущерба от АС при замене балласта может быть выполнена в прямом соответствии с таблицей и методикой, предложенными для этой цели в разд. 1, поскольку, как следует из приведенного выше обзора вида опасностей, процесс замены балласта в море не создает никаких принципиально новых видов опасностей, а последствия в результате возникновения избыточных нагрузок на судовые конструкции, снижения параметров остойчивости, потери хода и столкновения или посадки на мель учтены в вышеупомянутых таблице и методике.

Выявление критичных элементов

Представляется совершенно очевидным, что с точки зрения выявления критичных элементов процесс замены балласта методом последовательной замены аналогичен обычному процессу погрузки/балластировки судна, т. е. выявления каких либо дополнительных критичных элементов не требуется. В то время как использование методов прокачки и разбавления, с большой вероятностью, создадут ряд новых опасностей для судовых конструкций, судовых насосов, механизмов, систем и арматуры вследствие возникновения давления, превышающего расчетные значения, использованные при проектировании судна, или вакуума, возрастания нагрузки на судовые механизмы и, особенно, насосы в связи с увеличением частоты их использования, дополнительной (по сравнению с проектной) нагрузки

на судовые системы (балластную и осушительную) и запорную арматуру. Следовательно, при использовании этих методов возможно появление новых критичных элементов. Однако, в связи с отсутствием надежной статистики АС при замене балласта, выявление их в настоящий момент времени представляется затруднительным.

Вероятность отказа критичных элементов

В настоящее время, в связи с тем, что возможность проведения замены балласта в море пока не рассматривается на этапе проектирования судна, возможные отказы критичных элементов, вызванные воздействием нагрузок, не предусмотренных (при проектировании) условиями нормальной эксплуатации судна, в процессе замены балласта, следует отнести к нерасчетным случаям.

Границы доверительного интервала для риска

Определение границ доверительного интервала для риска в настоящее время также представляет собой достаточно сложную и неоднозначную задачу в связи с отсутствием надежной статистики АС при замене балласта.

Расчет условных рисков

Положения по расчету рисков, приведенные в разд. 1 применимы к оценке рисков при планировании замены балласта в море.

Интегральная оценка безопасности судна

Совершенно очевидно, что АС, возникновение которых возможно в процессе замены балласта в море, могут и должны быть учтены при выполнении интегральной оценки безопасности судна в качестве «фоновых» АС.

3. Предложение о целесообразности применения теории рисков для дальнейшего совершенствования методики оценки безопасности судна при замене балласта в море

На основании анализа, выполненного в разд. 2, представляется возможным сделать вывод о том, что, в принципе, использование ФОБ может быть рекомендовано для целей планирования замены балласта в море. Однако, максимально эффективное использование ФОБ возможно только на этапе проектирования судна, когда все возможные отказы критичных элементов и их последствия учтены в общей интегральной оценке безопасности судна.

В качестве основы для выполнения принципиальной оценки целесообразности применения теории рисков для нормирования безопасности судна при замене балласта предлагается использовать общее

представление о задачах, решаемых с помощью теории надежности и безопасности, описанное И.А. Рябининым [3].

В качестве основных причин бесполезности выполнения расчетов надежности на стадии предварительного проектирования могут быть указаны следующие:

1. для новых разрабатываемых образцов нет достаточных статистических данных из-за отсутствия прототипов;
2. составляющие систему элементы используются в принципиально новых режимах работы, и поэтому сказать что-либо об их надежности не представляется возможным;
3. ожидаемая надежность системы настолько велика, что полученные в результате расчетов показатели надежности невозможно подтвердить экспериментально.

В первом случае расчет надежности вряд ли имеет смысл в тех случаях, когда структура системы проста, а статистическая информация о составляющих эту систему элементах и прототипы подобной системы отсутствуют. Если же структура системы сложна, то проведение сравнительных расчетов надежности весьма полезно и при полном отсутствии статистической информации.

То же самое относится и к случаю, когда элементы используются в необычном режиме работы и, следовательно, статистическая информация о надежности отдельных элементов практически отсутствует.

Наконец, в отношении последней причины следует сказать, что при высокой ожидаемой надежности системы расчеты надежности необходимо производить именно потому, что в этом случае они несут единственно возможную информацию об уровне надежности проектируемого изделия.

Принимая во внимание отсутствие статистических данных по АС, произошедших в процессе или вследствие замены балласта в море, а также тот факт, что в процессе замены балласта судно подвергается воздействию нагрузок, не предусмотренных условиями нормальной эксплуатации судна, для определения необходимости выполнения расчетов надежности при планировании замены балласта в море следует руководствоваться пояснениями, данными к первым двум причинам возможной бесполезности выполнения таких расчетов.

В настоящее время в связи с тем, что Международная конвенция по контролю и управлению судовыми балластными водами и осадками в силу еще не вступила, а количество государств, требующих выполнения обязательной замены балласта перед заходом в свои порты, сравнительно не велико, вопросы нормирования безопасности

при замене балласта в море не рассматриваются (или практически не рассматриваются) при проектировании новых судов. Для новых судов (построенных после 1 января 2009 г.), в свете сроков, указанных для обязательного исполнения стандартов управления судовыми балластными водами и осадками, куда более актуально стоит задача обеспечения надлежащей обработки балласта на борту. Т. е. необходимость подтверждения безопасности замены балласта сегодня возникает только для судов, находящихся в эксплуатации и заходящих в порты стран, требующих обязательной замены балласта.

В свете вышеизложенного и учитывая наличие достаточно надежных методов детерминистической оценки безопасности при замене балласта, можно сделать вывод о том, что разработка специальной методики выполнения ФОВ для планирования замены балласта на сегодняшний день не представляется актуальной задачей. Однако, в случае изменения ситуации, связанной с необходимостью выполнения требований вышеупомянутой Конвенции, т. е. в случае затягивания процесса вступления ее в силу, при одновременном росте числа стран, включивших замену балласта в обязательные требования своих местных, национальных или региональных нормативных документов, нормирование безопасности при замене балласта однозначно войдет в список вопросов, нормируемых при проектировании судов, и тогда применение ФОВ может и должно быть рекомендовано как для использования проектными организациями, так и в качестве основы для разработки требований нормативных документов классификационных обществ и органов государственного контроля.

Список литературы

1. Емельянов М.Д. Применение условных рисков для оценки безопасности морских судов // Транспорт Российской Федерации. – № 3 – 4 (22–23), 2009. – С. 40 – 45.
2. Consolidated text of the Guidelines for Formal Safety Assessment (FSA) for use in the IMO Rule-making process. (MSC/Circ. 1023 – MEPC/Circ/392). – 14.05.2007
3. Рябинин И.А. Надежность и безопасность структурно-сложных систем. – СПб.: Изд-во С.Петербург. ун-та, 2007.

УДК 629.12.539.4

М.С. Бойко, О.Н. Рабинович, В.Н. Тряскин

ПРЯМОЙ МЕТОД РАСЧЕТА НЕЛИНЕЙНЫХ ИЗГИБАЮЩИХ МОМЕНТОВ В КОРПУСЕ СУДНА ПРИ СЛЕМИНГЕ

Введение

Снижение аварийности транспортных судов в условиях морского волнения среди множества средств достигается с помощью совершенствования методов расчета и проектирования корпусных конструкций судна и более глубокого изучения физики явлений, происходящих с корпусом судна на волнении. Обеспечение прочности корпуса судна требует решения трех взаимосвязанных задач: задачи внешних сил; задачи внутренних сил; задачи оценки и нормирования прочности. При решении задачи внешних сил определяется величина и характер действующих на корпус судна нагрузок при различных условиях его эксплуатации, что является важным этапом на пути обеспечения безопасности эксплуатации судна.

Прочность корпуса современных морских транспортных судов обеспечивается, в первую очередь, соответствующим выбором размеров конструктивных элементов согласно требованиям правил классификационных обществ. Правила содержат формулы для определения величины расчетных нагрузок на корпус судна, формулы для определения размеров балок корпуса судна, толщины листов и т. п.

Однако для судов, характеристики которых выходят за интервалы, определенные нормативными документами, а также для проведения проверочных расчетов, в исследовательских целях для прогнозирования возможных величин нагрузок используются специальные мето-

дики, основанные на непосредственном (прямом) решении задачи о поведении корпуса судна на нерегулярном морском волнении.

При рассмотрении тяжелых и экстремальных режимов волнения, а также при определении нагрузок на суда с большим развалом борта в носовой оконечности и относительно высокой скоростью хода (контейнеровозы, лихтеровозы и т. п.), влияние нагрузок при днищевом (оголение днища и последующий удар о жидкость) и бортовом (удар жидкости в развал борта) слеминге на общую и местную прочность корпусных конструкций может оказаться весьма значительным. Поэтому для современных методов расчета волновых нагрузок на корпус судна характерна тенденция к уточнению расчета т. н. слеминговой нелинейной составляющей.

Общая постановка задачи

При изучении силовых воздействий на корпус судна, его традиционно принято считать полой коробчатой балкой переменного по длине поперечного сечения, непроницаемой снаружи и свободно плавающей на воде. При этом внешние волновые воздействия должны быть представлены в виде таких интегральных характеристик от волновых гидродинамических и гидростатических давлений, как волновые перерезающие силы, изгибающие и крутящие моменты.

Традиционно результат взаимодействия судна и воды представляется в виде суммы двух составляющих – усилий на тихой воде (статическая составляющая) и дополнительных усилий на волнении. Методы оценки статической составляющей достаточно просты и хорошо отработаны. Определение усилий на тихой воде в каждом конкретном случае в настоящее время не встречает принципиальных затруднений. Вторая же составляющая определяется в большой степени климатическими условиями акваторий, в которых эксплуатируется судно, что предопределяет случайный характер изменения ее параметров.

Суммарную нагрузку, действующую на корпус судна на волнении, условно разделяют на две составляющие: волновую, линейно связанную с высотой волны и качкой судна, и дополнительную динамическую нагрузку, нелинейно зависящую от высоты волны и перемещений корпуса. Нелинейные нагрузки, связанные с непрямолинейностью борта корпуса судна в оконечностях, действуют при каждом значительном (соизмеримом с осадкой или высотой надводного борта) изменении положения действующей ватерлинии в оконечности, когда ватерлиния пересекает резко непрямолинейные участки борта, т. е. при интенсив-

ном волнении практически в каждом цикле продольной качки. Дополнительные динамические нагрузки, возникающие при слеминге, вызывают сложную реакцию корпуса судна. Это выражается, с одной стороны, в изменении качки судна, то есть его перемещений как твердого тела, и, с другой стороны, в появлении упругих изгибных колебаний корпуса с частотой, имеющей порядок частоты первого тона.

Линейная задача о качке и волновых нагрузках на реальном нерегулярном волнении решается на базе спектральной теории, используя амплитудно-частотные характеристики реакций корпуса судна и спектр волнения. В связи с тем, что математический аппарат спектральной теории разработан исключительно для линейных динамических систем, его применение к нелинейным реакциям корпуса судна встречает определенные затруднения.

Решением указанной проблемы моделирования нелинейных волновых нагрузок на корпус судна и определения их статистических характеристик является имитационное (стохастическое) моделирование нелинейных процессов в реальном времени. Имитационная модель позволяет рассмотреть всю последовательность перемещений корпуса судна в реальном времени: всплытие с возможным выходом из воды части сечений, последующее погружение, заливание палубы водой. Полученные временные реализации анализируемых процессов (кинематические параметры движения корабля, суммарные нагрузки и т. п.) дают возможность определить их статистические характеристики, необходимые для расчета предельной прочности и усталостной долговечности.

В соответствии с предлагаемым в статье подходом, задачи определения линейных и нелинейных реакций корпуса судна решаются отдельно. На первом этапе выполняется расчет линейных реакций корпуса судна на нерегулярном морском волнении. Строятся реализации линейной качки корпуса судна, линейных погонных гидродинамических нагрузок, линейных перерезывающих сил и изгибающих моментов. Затем на основе известных кинематических параметров движения корпуса судна выполняется прямой расчет нелинейных реакций корпуса судна (погонной гидродинамической нагрузки, нелинейных изгибающих моментов и т. п.). После этого проводится суммирование в каждый момент времени нелинейных и линейных реакций корпуса судна; полученные реализации затем могут быть подвергнуты статистическому анализу, результатом которого является, в первую очередь, стандарт соответствующей величины.

Данный подход характеризует предлагаемое решение как первое приближение.

Полученная величина волнового изгибающего момента в корпусе судна далее суммируется с величиной изгибающего момента на тихой воде.

Моделирование морского волнения

Начальным этапом имитационного моделирования нелинейных волновых нагрузок на корпус судна является моделирование нерегулярного морского волнения. В соответствии с современными представлениями, с точки зрения теории вероятности и математической статистики, распределение двумерных нерегулярных волн следует рассматривать как нормальный стационарный случайный процесс с нулевым математическим ожиданием, некоторой корреляционной функцией, спектром волнения и дисперсией, обладающий свойством эргодичности:

$$\zeta_{\text{в}}(t) \in N(0, D_{\zeta}), \quad (1)$$

где D_{ζ} – заданная дисперсия;

$\zeta_{\text{в}}(t)$ – случайные величины (ординаты морского волнения).

В задачах оценки волновых нагрузок, действующих на корпус судна, «входное» воздействие – морское волнение – является, строго говоря, трехмерным. На сегодняшний день задача моделирования трехмерного морского волнения принципиальных математических трудностей не вызывает. Однако следует учесть тот факт, что расчетные (тяжелые) режимы волнения близки к установившемуся двумерному волнению.

Применительно к исследованию задачи качки и вибрации корпуса судна на волнении процесс изменения ординаты волнового профиля, как стационарный гауссов процесс, может быть представлен каноническим разложением по гармоническому базису (спектральным разложением) вида [1]:

$$\zeta_{\text{в}}(x, t) = \sum_{i=1}^{\infty} a_i \cos(\omega_i t - k_{1i} x + \delta_i), \quad (2)$$

где a_i – амплитуды регулярных составляющих волнения;

ω_i – кажущаяся частота регулярной составляющей;

k_{1i} – волновое число;

δ_i – фаза волны (случайное число, равномерно распределенное в интервале $[0; 2\pi]$).

Величина a_i определяется по формуле:

$$a_i = \sqrt{2 S(\omega) \Delta \omega}, \quad (3)$$

где $S(\omega)$ – спектр морского волнения.

Спектр морского волнения может приниматься в виде, предложенном II Конгрессом по конструкции и прочности:

$$S(\omega) = 98,2 h_{3\%}^2 \bar{T} (\bar{T} \omega)^{-5} \exp \left[-\frac{686}{(\bar{T} \omega)^4} \right], \quad (4)$$

где $\bar{T}$ – средний период волнения;

$h_{3\%}$ – высота волны 3 % обеспеченности.

Заметим, что в рамках предлагаемой математической модели вместо бесконечных сумм по частотам следует использовать конечные суммы. Количество регулярных составляющих может варьироваться. В качестве первого приближения можно принять 50 регулярных составляющих. При определении шага моделирования процесса по времени следует учитывать требование к стабильности статистических характеристик моделируемых случайных процессов, требования к оптимизации машинного времени и другие факторы. В первом приближении можно рекомендовать величину шага 0,01 с.

Решение задачи качки

В соответствии с предлагаемой математической моделью, результаты решения задачи линейной качки используются для определения нелинейных нагрузок при слеминге. Уравнения качки могут быть получены из условия уравниваемости корпуса на воде при действии суммарной погонной нагрузки $q(x, t)$. Далее рассматриваются только уравнения продольной (вертикальной и килевой) качки корпуса судна. Соответствующие уравнения качки (уравнения в форме, предложенной Д.М. Ростовцевым) могут быть записаны в следующем виде [2]:

$$\begin{cases} a_{11} \ddot{\zeta} + b_{11} \dot{\zeta} + c_{11} \zeta + a_{12} \ddot{\psi} + b_{12} \dot{\psi} + c_{12} \psi = F_z^{\text{возм}}(t) \\ a_{21} \ddot{\zeta} + b_{21} \dot{\zeta} + c_{21} \zeta + a_{22} \ddot{\psi} + b_{22} \dot{\psi} + c_{22} \psi = M_y^{\text{возм}}(t), \end{cases} \quad (5)$$

где $F_z^{возм}(t)$ и $M_y^{возм}(t)$ – возмущающая сила и возмущающий момент;
 ζ – реализация вертикальной качки;
 ψ – реализация килевой качки.

Коэффициенты в левой части уравнений, а также выражения для определения возмущающих сил, могут приниматься в соответствии с рекомендациями [2].

Решение уравнений (5) следует искать в виде $\zeta(t) = \zeta_1 \cos(\omega_k t + \delta) + \zeta_2 \sin(\omega_k t + \delta)$ и $\psi(t) = \psi_1 \cos(\omega_k t + \delta) + \psi_2 \sin(\omega_k t + \delta)$. Решение уравнений (5) можно вести в частотной области, а затем по принципу суперпозиции переходить к реализации качки во временной области.

После решения задачи линейной качки можно перейти к определению линейной погонной нагрузки на корпус судна, а затем – к линейным перерезывающим силам и линейным изгибающим моментам.

Определение нелинейной нагрузки при слеминге

Для приближенной оценки величины нелинейной погонной гидродинамической нагрузки воспользуемся энергетическим методом. Нелинейная погонная гидродинамическая нагрузка в сечении корпуса судна при слеминге $q_{сл}(t)$ на основании уравнений Лагранжа может быть представлена в виде:

$$q_{сл}(t) = \mu(T_{мгн}) \ddot{T}_{мгн}(t) - \frac{1}{2} \dot{T}_{мгн}^2 \frac{\partial \mu(T_{мгн})}{\partial T_{мгн}}, \quad (6)$$

где $T_{мгн}$ – мгновенная осадка в сечении;
 $\mu(T_{мгн})$ – мгновенная присоединенная масса в сечении.

Величина $\dot{T}_{мгн}$ и $\ddot{T}_{мгн}$ определяется в результате решения задачи о линейной качке судна. Влияние слеминговой погонной гидродинамической нагрузки на качку судна может быть получено в результате процедуры последовательных приближений.

При определении погонной нелинейной нагрузки при слеминге в соответствии с выражением (6) следует учитывать пологую волну вытеснения, которая изменяет величину мгновенной осадки в сечении и зависит от начального угла килеватости сечения. В качестве мгновенной присоединенной массы можно принять ее высокочастотный предел, соответствующий мгновенному значению осадки в данном сечении [2].

Результаты определения нелинейной погонной нагрузки при слеинге должны быть представлены в виде реализации, т. е. массива действительных чисел, определяющих величину нагрузки на корпус судна в каждый момент времени.

Динамической реакцией корпуса судна на данную нагрузку является его перемещение как твердого тела и упругие затухающие изгибные колебания («выпинг»). При каждом из этих перемещений в корпусе судна возникают инерционные нагрузки, увеличивающие его общую нагруженность. Для определения перемещений следует воспользоваться дифференциальным уравнением колебаний корпуса судна [2], решение которого следует проводить методом Бубнова-Галеркина. При этом задача перемещений корпуса судна как твердого тела и упругой вибрации будут решаться отдельно.

В связи с тем, что нелинейная погонная нагрузка является функцией общего вида, решение задачи определения упругих колебаний следует проводить численными методами (например, методом Рунге-Кутты 4 порядка).

После построения реализации перемещения корпуса судна строится реализация погонной инерционной нагрузки, а также соответствующих перерезывающих сил и изгибающих моментов. Данные реакции судна являются нелинейными, т. е. нелинейно зависят от высоты волны. Определение их статистических характеристик (стандартов) проводится в соответствии с традиционными методами теории вероятностей и математической статистики.

В каждый момент времени нелинейный изгибающий момент складывается с линейным, а также с изгибающим моментом на тихой воде. Полученная реализация может быть статистически обработана, в результате чего может быть получено максимально возможное значение суммарного изгибающего момента с заданной обеспеченностью (при данном режиме волнения и скорости хода судна).

Предложенный алгоритм автоматизирован. Специальное программное обеспечение позволяет решать задачи как моделирования «входного» процесса (морского волнения), так и соответствующих реализаций «выходных» процессов (качки, вибрации, изгибающих моментов и перерезывающих сил), а также проводить их статистическую обработку.

Список литературы

1. Луговский В.В. Динамика моря. – Л.: Судостроение, 1976. – 200 с.
2. Короткин Я.И., Рабинович О.Н., Ростовцев Д.М. – Волновые нагрузки корпуса судна. – Л.: Судостроение, 1987. – 236 с.

УДК 669.14.018.41:621.78

В.В. Орлов, В.А. Сувориков, В.Ю. Сырцев, В.К. Башаев, В.В. Галкин

ОСВОЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА СТАЛЕЙ ДЛЯ СУДОСТРОЕНИЯ С ПРЕДЕЛОМ ТЕКУЧЕСТИ 235 – 390 МПа В ТОЛЩИНАХ ДО 50 мм ПО ГОСТ Р 52927-2008 НА ОАО «МАГНИТОГОРСКИЙ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЙ КОМБИНАТ»

Введение

В 2009 году на Магнитогорском металлургическом комбинате (ММК) введен в эксплуатацию толстолистовой стан (ТЛС) «5000» производительностью 1,5 млн т проката в год. Основным поставщиком оборудования стана «5000» явился немецкий машиностроительный концерн «SMS-Siemag». Комплексная система автоматизации, которой оснащен стан, позволяет обеспечить высочайший уровень технологической стабильности производства и качества продукции по точности прокатки, геометрическим размерам и другим параметрам. Технологические возможности стана позволяют выпускать листовой прокат для нефтяных платформ, работающих в условиях Арктики, современных судов ледового класса, танкеров, а также для нефтегазового сектора методами термомеханической обработки (ТМО).

Наиболее востребованными сталями при производстве судов самого различного класса – от легких речных до судов ледового плавания – являются судостроительные стали с пределом текучести 235 – 390 МПа различной хладостойкости. Традиционно это стали, легированные марганцем (0,9 – 1,6 %) с небольшими добавками микролегирующих элементов: ванадия, ниобия, титана в сумме до 0,012 %. Листовой прокат поставлялся в горячекатаном состоянии или после

контролируемой прокатки. При использовании этих технологий с увеличением толщины листа до 25 мм и выше становится проблематичным обеспечение вязкости стали при испытании на ударный изгиб образцов с острым надрезом при низких температурах. Кроме того, в 2008 году вышел новый ГОСТ Р 52927 на поставку судостроительных марок стали под техническим наблюдением Российского морского регистра судоходства (РС) взамен ГОСТ 5521-93. В новом ГОСТе предусмотрена поставка сталей с нормируемым уровнем Z-свойств с более высокими требованиями к качеству листового проката.

В период с 2006 по 2008 год на ТЛС «5000» ЧерМК ОАО «Северсталь» были успешно проведены работы по освоению производства листового проката толщиной до 60 мм из низкоуглеродистых судостроительных сталей с пределом текучести 235 – 460 МПа, по технологии термомеханической обработки (ТМО) с ускоренным охлаждением (УО). Изготовленный листовой прокат толщиной до 60 мм соответствовал требованиям РС к сталям нормальной и повышенной прочности, в том числе с хладостойкостью до категории «F» [1, 2].

Сравнительный анализ показал, что стан «5000» ОАО «ММК» обладает большим усилием прокатки по сравнению со станом «5000» ЧерМК ОАО «Северсталь», но в тоже время отличается меньшим моментом прокатки, что потребовало создания новых технологий управления структурой листового проката для обеспечения требуемых механических свойств и характеристик работоспособности.

Охлаждение проката в потоке ТЛС «5000» ОАО «ММК» после термомеханической обработки осуществляется в установке ускоренного охлаждения, включающей систему спреерного и ламинарного охлаждения. Система ускоренного охлаждения в потоке ТЛС «5000» ЧерМК ОАО «Северсталь» представляет собой систему охлаждения форсуночного типа, состоящую из двух зон: более интенсивного и менее интенсивного охлаждения. Таким образом, при производстве листового проката по технологии ТМО с УО на стане «5000» ОАО «ММК» необходимо обеспечить равномерность охлаждения по всей площади раската при достаточно высоких скоростях охлаждения до заданных температур.

Целью работы является оценка уровня механических свойств и качества листового проката толщиной до 50 мм из марганцевой стали нормальной и повышенной прочности категорий от А до Е40, в том числе обеспечивающей высокий уровень Z-свойств, производства ОАО «ММК».

Материал и методика исследования

Материалом для исследования послужила сталь марганцевой композиции легирования, отвечающая требованиям РС к химическому составу сталей нормальной и повышенной прочности (табл. 1). Требования к механическим свойствам представлены в табл. 2.

Таблица 1

**Химический состав Z-сталей с пределом текучести 235 – 390 МПа
с контролем работы удара при минус 40 °С (категории Е)**

Марка стали	№ состава	Массовая доля элементов, %						
		C	Si	Mn	P	S	Ni	V+Nb+Ti
09ГФБТ	1	0,09	0,20	0,7	0,006	0,002	0,02	0,09
09ГФБТ	2	0,10	0,20	1,0	0,006	0,003	0,02	0,10
Требования РС		не более						
		≤0,18	≤0,50	1,6	0,035	0,008	0,40	≤0,12

Таблица 2

Требования к механическим свойствам стали

Толщина, мм	Rm, МПа	Re, МПа	A ₅ , %	Работа удара		Zz, %	Работа удара KV, Дж, после механического старения
				KV, Дж	Т испытания		
		Не менее					
EZ35	400 – 520	235	22	50	– 40	35	50
E32Z35	440 – 570	315	22				
E36Z35	490 – 630	355	21				
E40Z35	510 – 660	390	20				

Выплавку проводили в 370-тонном конверторе ОАО «ММК» с внепечной обработкой и вакуумированием с разливкой в непрерывнолитые слябы сечением 250 мм, прокатку – на стане «5000» ОАО «ММК».

Исследование микроструктуры выполнено на шлифах после травления в 3 % спиртовом растворе HNO₃ по ГОСТ 5640. Для исследования микроструктуры использовали образцы, вырезанные на полную толщину проката параллельно направлению прокатки по нормали к плоскости прокатки.

Фазовые превращения исследовали при непрерывном охлаждении и деформационном воздействии, имитирующем условия производства, с построением термокинетических диаграмм на dilatометре «BÄHR Thermoanalyse». Определяли температуру Ar_3 . Имитация формирования мелкого аустенитного зерна заключалась в нагреве образцов до 1000 °С.

Механические свойства при растяжении листового проката определяли по ГОСТ 1497 на образцах тип 6 № 3. Испытания на ударный изгиб проводили по ГОСТ 9454 на образцах сечением 10 × 10 мм с острым надрезом (тип 11), вырезанных в поперечном прокатке направлении. Склонность к механическому старению определяли после деформации со степенью 5 % при температуре +20 °С и выдержки 1 час при температуре 250 °С. Определение относительного сужения в направлении толщины листа проводили в соответствии с ГОСТ 28870-90 при температуре +20 °С. Количество вязкой составляющей в изломе проб натурной толщины определяли по ГОСТ Р 52927.

Разработка технологических параметров производства судостроительной стали с пределом текучести 235 – 390 МПа по технологии ТМО с учетом особенностей ТЛС «5000» ОАО «ММК» и изготовление опытно-промышленных партий толстолистового проката для проведения освидетельствования на соответствие требованиям РС

При освоении данных марок судостроительных сталей на стане «5000» ЧерМК ОАО «Северсталь», изготавливаемых по технологии ТМО, мелкозернистая и квазиоднородная структура в листовом прокате обеспечивалась за счет прохождения динамической, метадинамической и статической рекристаллизации аустенита на черновой стадии прокатки при максимально возможной деформации сляба благодаря достаточно высокому моменту прокатки. Получение однородной мелкозернистой структуры не более 9 баллов по ГОСТ 5639 обеспечивало получение требуемых характеристик прочности и пластичности проката.

Для обеспечения комплекса свойств проката, производимого на стане «5000» ОАО «ММК», и снижения себестоимости судостроительной стали был разработан химический состав с содержанием углерода не более 0,11 %, марганца 0,60 – 0,80 % для стали нормальной прочности и с содержанием углерода не более 0,11 %, марганца 0,90 – 1,20 % с микролегированием ванадием, ниобием и титаном (в сумме не более 0,12 %) – для стали повышенной прочности.

Введение микролегирования титаном позволило существенно расширить диапазон температур аустенитизации за счет сдерживания роста аустенитного зерна вплоть до температуры 1210 °С. Столь высокие температуры нагрева способствовали максимальному растворению микролегирующих элементов при нагреве слябов под прокатку и более эффективному выделению карбидов и нитридов ванадия и ниобия и реализации дисперсионного упрочнения. Наряду с этим повышение температуры нагрева обеспечило более высокие обжаты на черновой стадии прокатки при имеющихся ограничениях по моменту прокатки. Микролегирование ванадием, ниобием также позволило эффективно управлять размером зерна на черновой стадии прокатки и обеспечивать формирование мелкого зерна феррита при ускоренном охлаждении.

Основываясь на исследованиях процессов рекристаллизации, проведенных ранее [3], для судостроительных сталей марганцевой композиции легирования измельчение исходной аустенитной структуры реализовано за счет прохождения метадинамической рекристаллизации в приповерхностных слоях раската и статической рекристаллизации по всей толщине при подстуживании промежуточного раската. При этом интенсивное выделение ниобия из твердого раствора при температурах черновой прокатки обеспечивало отсутствие собирательной рекристаллизации в металле.

Для прохождения процессов динамической рекристаллизации при максимально возможных обжатах на первых проходах черновой прокатки, метадинамической и статической рекристаллизации на стадии подстуживания и при междеформационных паузах, была выбрана оптимальная толщина подката перед подстуживанием. Разработка деформационных режимов на черновой стадии прокатки учитывала необходимость обеспечения достаточной суммарной степени деформации не менее 40 %. Суммарная степень деформации не менее 60 % на чистовой стадии прокатки при регламентированной величине обжатий за проход обеспечила формирование субструктуры в аустените и максимальное измельчение ферритных зерен при последующем охлаждении.

При разработке температурно-деформационных режимов на чистовой стадии прокатки основной целью явилось обеспечение при последующем охлаждении формирования феррито-перлитной структуры с равноосными ферритными зёрнами размером не ниже 9 номера по ГОСТ 5639 с развитой субструктурой и общим содержанием перлита в структуре не более 10 %. Требуемое измельчение зерна

достигается при температурах проведения чистовой стадии прокатки вблизи A_{r3} , при этом учитывался интенсивный деформационный разогрев металла за счет более горячей середины сляба и интенсивной прокатки.

Анализ фазовых превращений низколегированных сталей разработанного химического состава показал (рис. 1, 2), что обеспечение квазиизотропной мелкозернистой феррито-перлитной структуры с незначительным содержанием бейнита в сталях как нормальной, так и повышенной прочности, происходит при скоростях охлаждения 10 – 20 °/с. Основываясь на данных исследования, были предложены режимы ускоренного охлаждения листового проката из сталей нормальной и повышенной прочности толщиной до 50 мм.

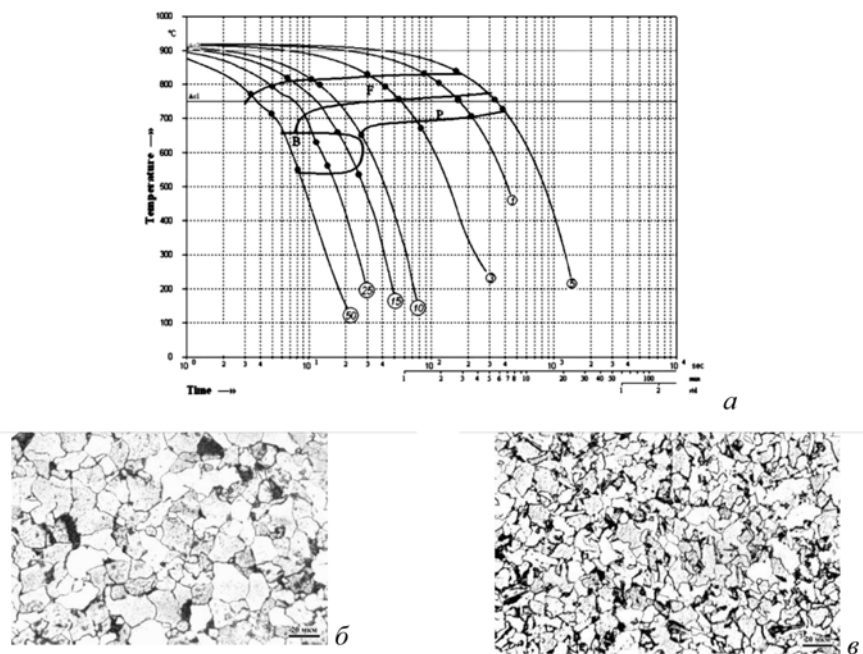


Рис. 1

Термокинетическая диаграмма превращения аустенита стали нормальной прочности при охлаждении мелкозернистого деформированного аустенита (а); структура после охлаждения со скоростью 3 °/с (б) и 50 °/с (в), x500

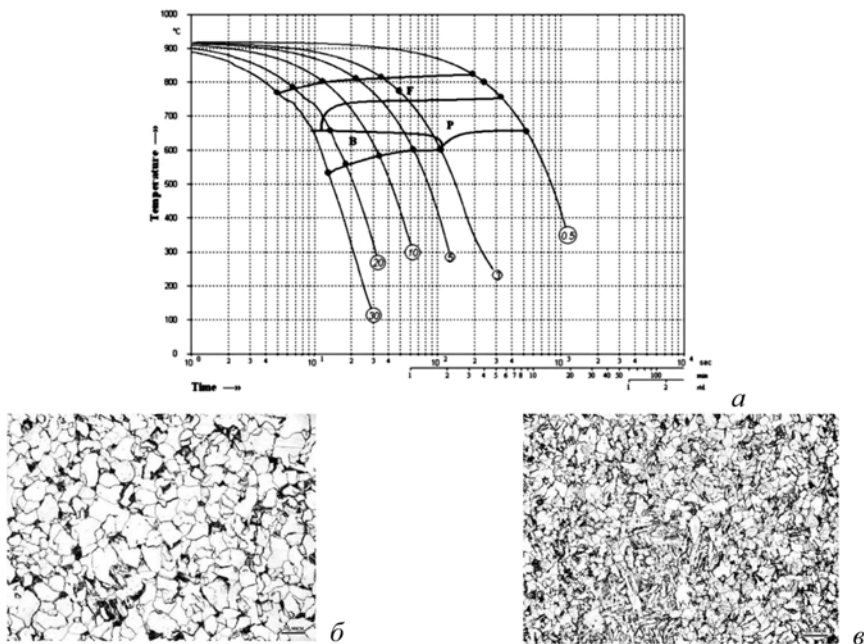


Рис. 2

Термокинетическая диаграмма превращения аустенита стали повышенной прочности при охлаждении мелкозернистого деформированного аустенита (а); структура после охлаждения со скоростью 5 °/с (б) и 30 °/с (в), x500

Таким образом, на стане ОАО «ММК» разработаны технологии термомеханической обработки толстолистового проката из судостроительных марок стали, отличные от технологий, реализованных на ЧерМК ОАО «Северсталь».

Механические свойства и структура судостроительной стали нормальной и повышенной прочности

На основе проведенных исследований были разработаны технологические режимы ТМО листового проката судостроительной стали нормальной и повышенной прочности марки и проведено освидетельствование металла на соответствие требованиям РС для категорий А-Е, А27-Е27, А32-Е32, А36-Е36, А40-Е40, включая Z-стали.

Анализ микроструктуры изготовленного листового проката показал, что заданные режимы прокатки обеспечили формирование перед началом ускоренного охлаждения деформированной структуры аустенита, что обусловило увеличение дисперсности структурных составляющих за счет интенсификации диффузионных процессов и увеличения числа мест появления зародышей ферритных зерен. При охлаждении раскатов в выбранном температурном интервале со средней скоростью охлаждения 10 – 15 °/с сформировалась феррито-перлитная структура с содержанием бейнита около 10 – 15 % (рис. 3).

В листах толщиной 16 и 30 мм наблюдалась незначительная феррито-перлитная полосчатость, характерная для сталей, изготовленных по технологии ТМО. Однако это не оказало существенного влияния на комплекс полученных механических свойств и, вероятнее всего, явилось следствием высоких деформаций на чистовой стадии прокатки и ускоренного охлаждения при прокатке листов толщиной 16 – 25 мм. В связи с этим, для обеспечения большей изотропности структуры и механических свойств в дальнейшем при прокатке листов толщиной до 25 мм было рекомендовано проводить их дальнейшее охлаждение на воздухе.

В листах толщиной 30 – 50 мм наблюдается такой же набор структурных составляющих, как в середине по толщине, однако между структурой в четверти по толщине и в середине листа наблюдается увеличение размера зерна на 1 номер по ГОСТ 5639 (на величину до 2 мкм). Наблюдаемое различие структуры по толщине объясняется большей скоростью охлаждения и степенью деформации у поверхностных слоев по сравнению с внутренними, что обуславливает увеличение дисперсности структуры поверхности и обеспечивает высокую прочность и вязкость стали при испытании механических свойств.

Таким образом, микроструктура листов, изготовленных по разработанным режимам, отличалась высокой изотропностью и мелкозернистостью (размер зерна феррита не превышал 10 – 12 мкм), что обеспечило высокий уровень прочности, пластичности и работы удара. Плотное волокнистое строение без признаков расслоений изломов технологических проб натурной толщины свидетельствует о высоком металлургическом качестве стали (рис. 4).

В листовом прокате металла для освидетельствования на соответствие требованиям РС для категорий А-Е, А27-Е27, А32-Е32 значения предела текучести составили 400 – 440 МПа, при значениях временного сопротивления и относительного удлинения 480 – 520 МПа и 23 – 31 % соответственно (рис. 5). Испытания на ударный изгиб и ме-

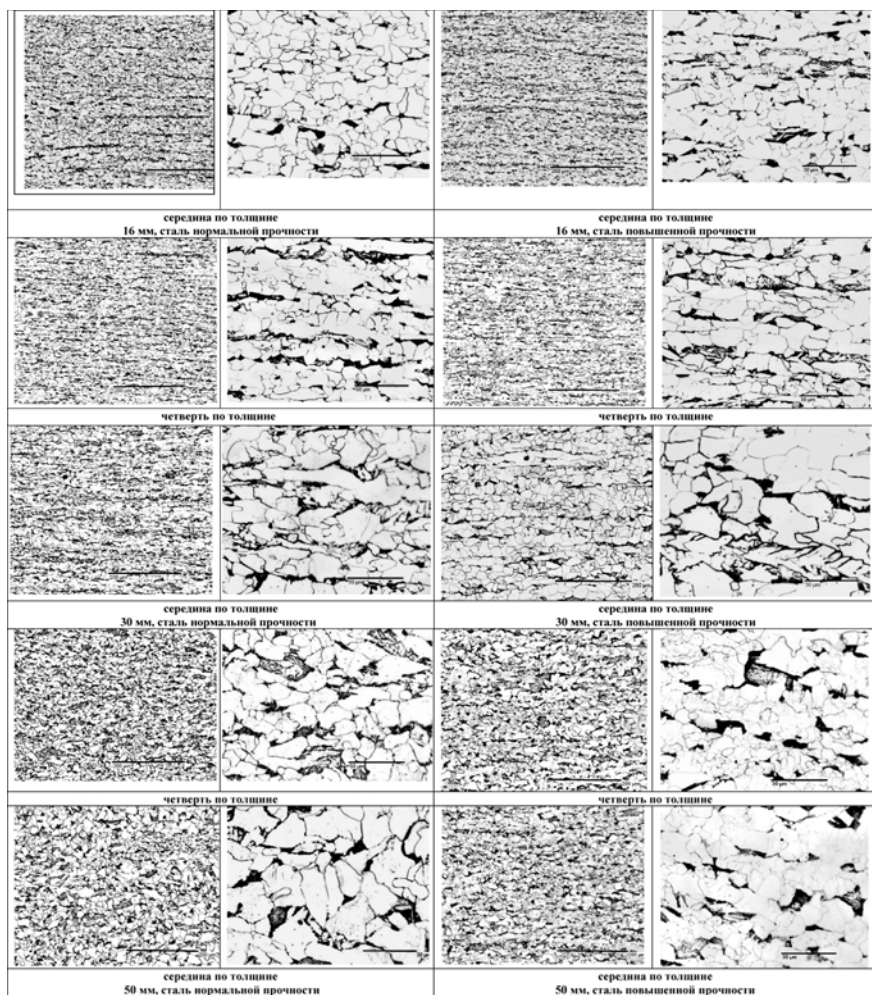


Рис. 3
Структура опытной партии листового проката судостроительной стали
нормальной и повышенной прочности



a



б



в

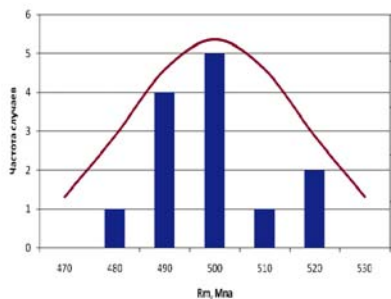


г

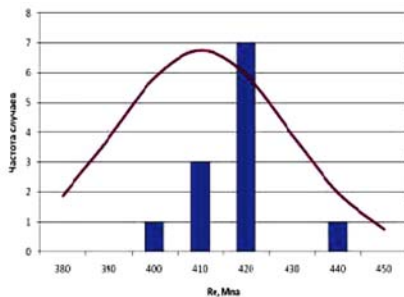


д

Рис. 4
Изломы судостроительной стали нормальной (б, в)
и повышенной прочности (а, г, д)



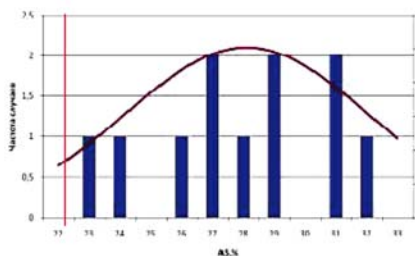
$R_{m\min}=480$ МПа, $R_{m\max}=520$ МПа, $R_{m\text{cp}}=500\pm 20$ МПа



$R_{e\min}=400$ МПа, $R_{e\max}=440$ МПа, $R_{e\text{cp}}=420\pm 20$ МПа

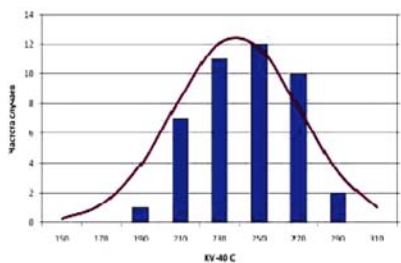
a

б



$A_{S\min}=23\%$, $A_{S\max}=31\%$, $A_{S\text{cp}}=27\pm 4\%$

в



$KV_{\min}=190$ Дж, $KV_{\max}=290$ Дж, $KV_{\text{cp}}=240\pm 50$ Дж

г

Рис. 5

Статистическое распределение механических свойств для опытной партии листового проката судостроительной стали с пределом текучести 235 – 315 МПа:

a – временное сопротивление;

б – предел текучести;

в – относительное удлинение;

г – работа удара при $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$

механическое старение показали средний уровень работы удара 240 Дж при температуре испытаний $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$, рис. 7-1. Значения относительного сужения при испытании на растяжение образцов, вырезанных в направлении толщины листа (Z-свойства) составили не менее 50 %.

Уровень механических свойств полученной опытной партии листового проката для освидетельствования на соответствие требованиям РС для категорий А36-Е36 и А40-Е40 представлен на рис. 6. Видно, что полученные значения предела текучести соста-

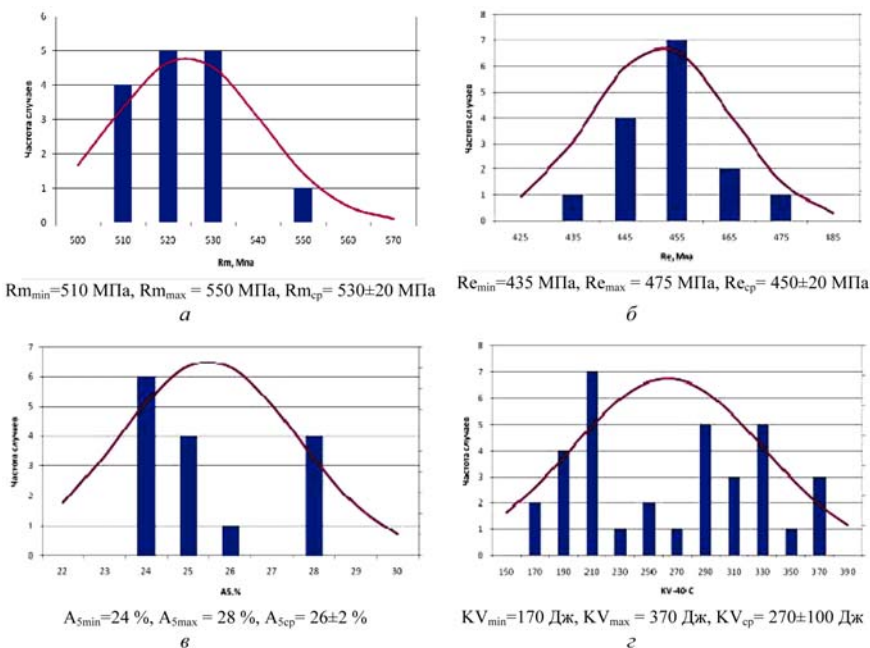


Рис. 6

Статистическое распределение механических свойств для опытной партии листового проката судостроительной стали с пределом текучести 355 – 390 МПа:

а – временное сопротивление;

б – предел текучести;

в – относительное удлинение;

г – работа удара при -40 °С

вили 435 – 475 МПа, временного сопротивления 510 – 550 МПа при относительном удлинении 24 – 28 %, при этом средний уровень работы удара при температуре испытаний -40 °С составил 270 Дж (рис.7-2).

Испытание на растяжение в направлении толщины показали, что значения относительного сужения в полученном листовом прокате толщиной 23 – 50 мм составляют не ниже 45 %, что отвечает требованиям к стали с индексом «Z35» [4].

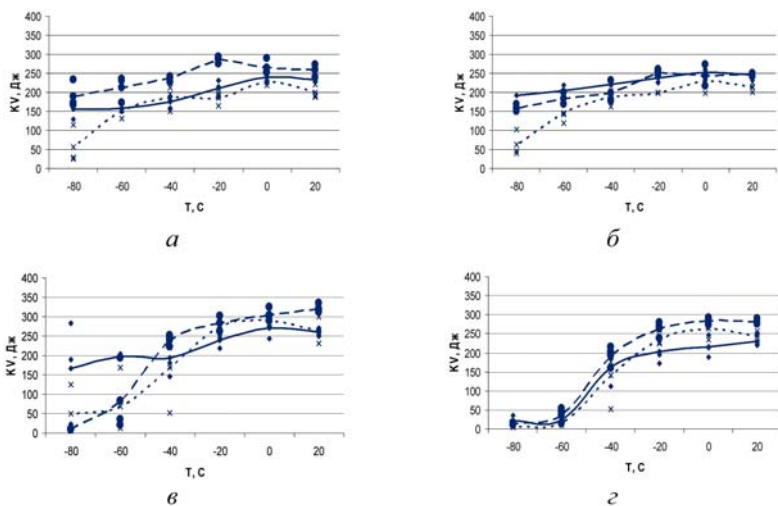


Рис. 7-1

Зависимость работы удара в поперечном прокатке направлении от температуры испытаний листового проката судостроительной стали с пределом текучести 235 – 315 МПа толщиной: а – 16 мм; б – 30 мм; в, г – 50 мм (в – $\frac{1}{4}$; г – $\frac{1}{2}$ по толщине)

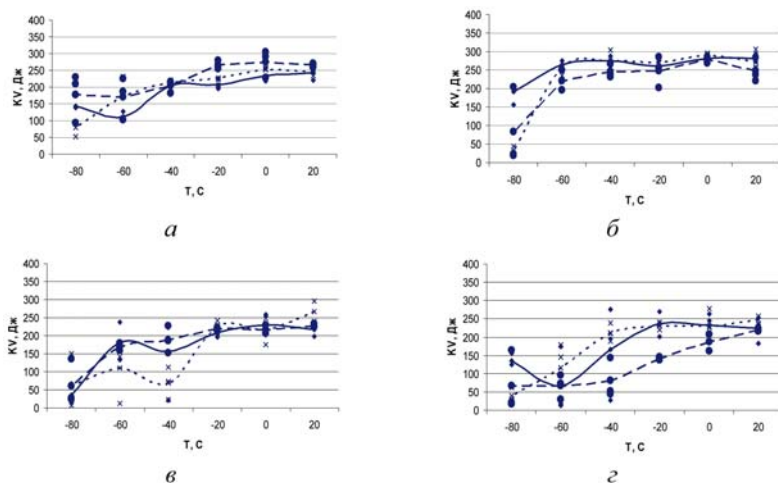


Рис. 7-2

Зависимость работы удара в поперечном прокатке направлении от температуры испытаний листового проката судостроительной стали с пределом текучести 355 – 390 МПа толщиной: а – 16 мм; б – 30 мм; в, г – 50 мм (в – $\frac{1}{4}$; г – $\frac{1}{2}$ по толщине)

Изготовление промышленной партии листового проката судостроительной стали нормальной и повышенной прочности

После изготовления партии судостроительной стали нормальной и повышенной прочности для освидетельствования с целью подтверждения воспроизводимости и стабильности технологических параметров производства листового проката на ОАО «ММК» была изготовлена промышленная партия проката толщиной от 15 до 50 мм сталей категории A-D36 по заказам судостроительных предприятий объемом более 1200 т.

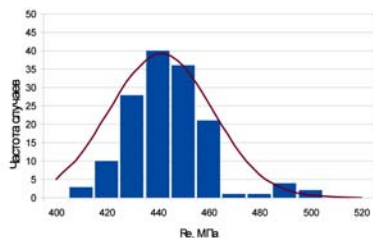
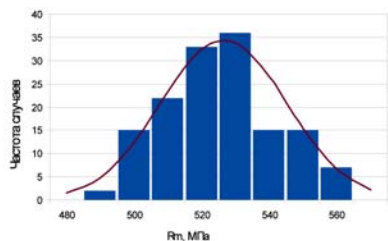
Воспроизводимость и стабильность технологических параметров производства подтверждены высоким уровнем механических свойств изготовленного листового проката (рис. 8, 9).

Заключение

При изготовлении листового проката толщиной до 50 мм по технологии двустадийной термомеханической обработки с окончанием прокатки при температуре вблизи A_{r3} для стали с содержанием углерода не более 0,11 %, марганца 0,60 – 0,80 % и для стали нормальной прочности с содержанием углерода не более 0,11 %, марганца 0,90 – 1,20 % с микролегированием ванадием, ниобием и титаном (в сумме не более 0,12 %) обеспечивается формирование мелкозернистой феррито-перлитной структуры с размером ферритного зерна до 12 мкм по всему сечению проката больших толщин, что удовлетворяет требованиям по хладостойкости и прочностным характеристикам, предъявляемым к сталям категорий от A до E40.

Выполнены испытания листового проката стали нормальной и повышенной прочности с пределом текучести 235 – 390 МПа, в том числе с Z-свойствами, в толщинах до 50 мм, на соответствие требованиям Правил РС. Результаты испытаний подтвердили пригодность разработанных сталей и технологий их производства для применения в судостроительной отрасли. Соответствующее Свидетельство о признании изготовителя для ОАО «ММК» находится на стадии оформления в Российском морском регистре судоходства.

Промышленные партии листового проката, изготовленные по разработанной технологии, отличаются высокой стабильностью механических свойств, что свидетельствует о воспроизводимости технологии.

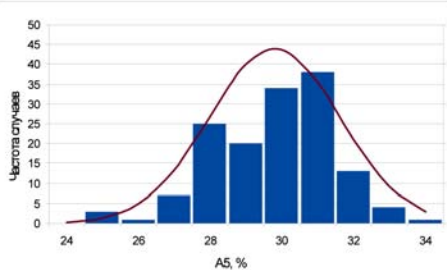


$R_{m_{\min}}=485 \text{ МПа}$, $R_{m_{\max}}=575 \text{ МПа}$, $R_{m_{\text{cp}}}=526 \pm 19 \text{ МПа}$

$Re_{\min}=340 \text{ МПа}$, $Re_{\max}=500 \text{ МПа}$, $Re_{\text{cp}}=441 \pm 20 \text{ МПа}$

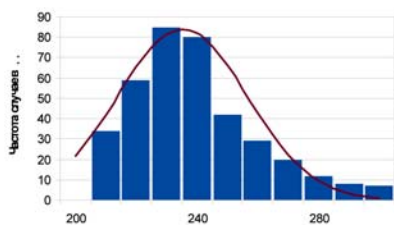
a

б



$A_{5\min}=24 \%$, $A_{5\max}=36 \%$, $A_{5\text{cp}}=30 \pm 2 \%$

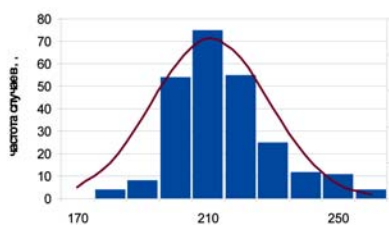
в



работа удара KV-20, Дж

$KV_{\min}=187 \text{ Дж}$, $KV_{\max}=308 \text{ Дж}$, $KV_{\text{cp}}=235 \pm 21 \text{ Дж}$

з



работа удара KCA-20, Дж

$KCA_{\min}=170 \text{ Дж}$, $KCA_{\max}=263 \text{ Дж}$, $KCA_{\text{cp}}=252 \pm 18 \text{ Дж}$

д

Рис. 8

Статистический анализ механических свойств листового проката толщиной 14 – 30 мм из стали марок А, А32, D32, D36:

a – временное сопротивление;

б – предел текучести;

в – относительное удлинение;

з – работа удара при -20°C ;

д – работа удара после механического старения

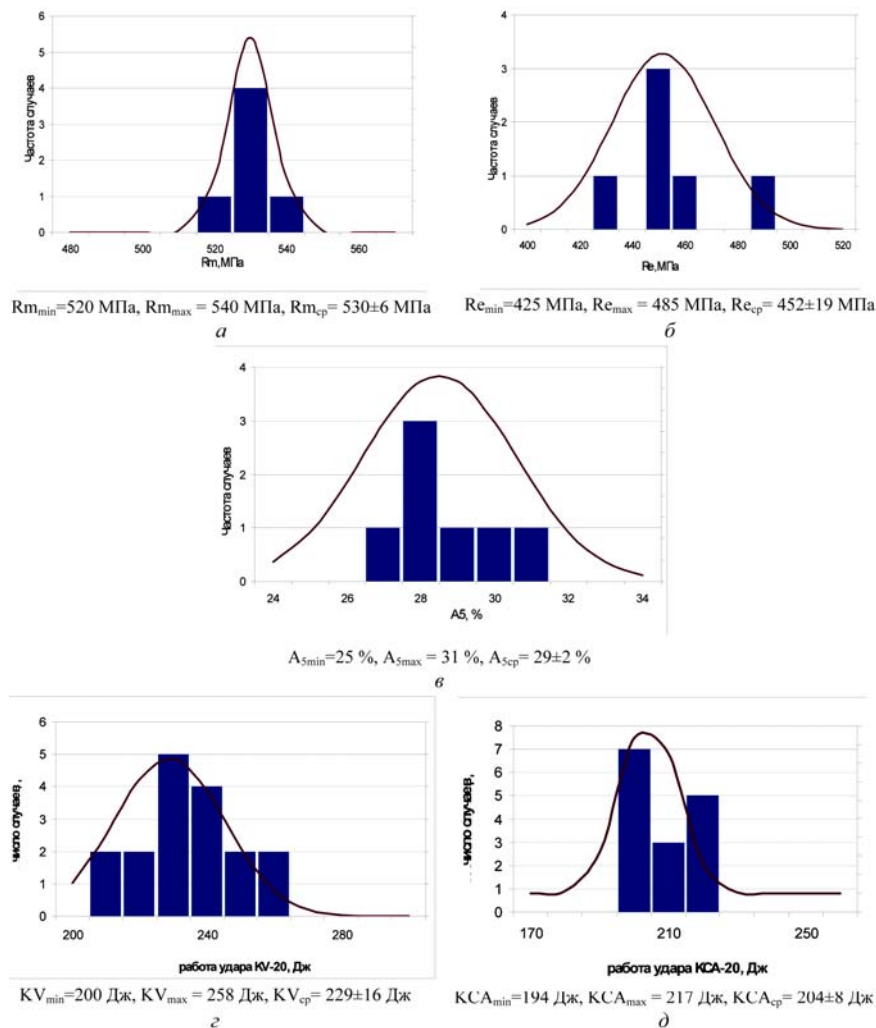


Рис. 9

Статистический анализ механических свойств листового проката толщиной 35 – 50 мм из стали марок А, А32, D32, D36:

а – временное сопротивление;

б – предел текучести;

в – относительное удлинение;

г – работа удара при $-20 \text{ }^{\circ}\text{C}$;

д – работа удара после механического старения

Список литературы

1. Башаев В.В., Круглова А.А., Орлов В.В., Подтелков В.В., Хлусова Е.И. Освоение технологии термомеханического упрочнения стали марок E36W и F36W толщиной до 60 мм на ОАО «Северсталь» // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – СПб., 2006. – Вып. 29. – С. 158 – 174.
2. Круглова А.А., Орлов В.В., Сувориков В.А., Хлусова Е.И., 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. – СПб., 2008. – Вып. 31 – С. 176 – 188.
3. Хлусова Е.И., Круглова А.А., Орлов В.В. Влияние технологических режимов и химического состава на размер аустенитного зерна в низкоуглеродистой стали // Митом. – 2007. – № 12. – С. 8 – 12.
4. ГОСТ Р 52927-2008, 49 с.

УДК 629.54:621.436.72

В.А. Баранов, А.А. Сергеев, В.К. Шурняк

АНАЛИЗ ПЕРСПЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ АЛЬТЕРНАТИВНОГО ТОПЛИВА НА МОРСКИХ СУДАХ

На протяжении многих десятилетий, двигатели, работающие на мазуте, были и остаются стандартом для торговых судов, поскольку мазут в настоящее время является самым дешевым и доступным источником энергии. Однако в последнее время в судоходстве и судовой энергетике происходят события, которые указывают на возможность изменения в обозримом будущем этого положения, что делает актуальным рассмотрение вопроса о применении различных видов альтернативного топлива в судоходстве. Жесткие экологические нормы, которые установлены Приложением VI к Международной конвенции МАРПОЛ 73/78 (Приложение VI), и требования Евросоюза (ЕС) в отношении выбросов с судов открывают возможности для новых решений по внедрению экономически эффективных технологий и поиска новых видов топлива и источников энергии на судах. Кроме экологических проблем перед судоходством неизбежно возникнут экономические трудности, связанные со снижением мировых ресурсов нефти и, как следствие, удорожанием всех видов нефтепродуктов.

В настоящее время Приложение VI вводит жесткие ограничения на выбросы NO_x и SO_x , причем если количество выбросов SO_x связано с содержанием серы в топливе, то содержание NO_x в выхлопных газах связано с организацией термодинамического цикла используемого двигателя и, прежде всего, с максимальной температурой в процессе горения топлива. В соответствии с Приложением VI, уже вступившим

в силу, выбросы NO_x и SO_x во всем мире и в особых районах контроля выбросов серы (SECAs) ограничиваются и планируется дальнейшее ужесточение ограничений по выбросам SO_x как это показано в табл. 1. Особые районы охватывают на сегодняшний день Балтийское море, Северное море и пролив Ла-Манш. В будущем количество особых районов может увеличиться.

Таблица 1

Требование Приложения VI к МК МАРПОЛ 73/78 по содержанию серы в топливе				
Регион	Год			
	2010	2012	2015	2020
Особые районы (SECAs)	1,0 %	–	0,1 %	–
Весь мир	4,5 %	3,5 %	–	0,5 %

Хотя нормы ИМО по выбросам серы в особых районах достаточно жесткие, Морская Администрация каждой страны вправе устанавливать в своих портах еще более жесткие нормы. Европейская комиссия установила, что с 1 января 2010 года выброс серы с любого судна при нахождении в порту ЕС не должен превышать 0,1 %, ином случае судно должно использовать питание с берега.

Содержание окислов серы SO_2 в выхлопных газах зависит от содержания в топливе серы, которая может быть удалена из него на нефтеперерабатывающих предприятиях в процессе технологической гидроочистки. Большинство нефтеперегонных заводов (НПЗ) традиционно мало интересуются бункерным рынком, мазут для них является побочным продуктом при производстве бензина и дизельного топлива. В результате, на протяжении многих десятилетий мировое судоходство являлось удобной нишей для сбыта высокосернистого мазута (HSFO). В 2007 году всего в мире было продано 369 млн т судового топлива, из которых только 83 млн т (22,5 %) составляли малосернистые сорта: малосернистый мазут (LSFO), дизельное топливо (MDO) и газойль (MGO). В 2008 году аналогичные данные составляли 354 млн т и 92 млн т соответственно, т. е. доля, приходящаяся на малосернистые сорта, увеличилась за год до 26 %. Принятый ИМО план по поэтапному полному переходу до 2025 года на малосернистые сорта топлива позволяет с уверенностью предположить, что доля высокосернистых сортов на рынке бункерного топлива будет увеличиваться и дальше, что заставит судовладельцев идти на дополнительные затраты или искать пути уменьшения расхода топлива и выбросов SO_x .

Рассмотрим далее основные пути снижения содержания серы в выхлопных газах морских судов.

Уменьшение содержания серы в топливе путем его очистки (замена топлива с высоким содержанием серы на низкосернистые сорта)

Наиболее простой способ получения низкосернистого топлива – так называемый «блендинг», то есть разбавление мазута дизельным топливом, именно этот способ используется многими российскими поставщиками судового топлива для получения топлива с содержанием серы до 1,5 %. Однако этот способ имеет определенные пределы применения, так как не решает принципиально вопроса извлечения серы из топлива. По мере ужесточения стандартов по выбросам SO_x в особых районах придется переходить на чистое дизельное топливо.

В 2009 году в морском порту Санкт-Петербурга средняя цена темного бункерного топлива (марки IFO-180) с высоким содержанием серы составила 12,9 тыс. руб. за тонну (включая НДС). Средняя стоимость такого же темного топлива с низким содержанием серы (до 1,5 % массовой доли) за тот же период составила 13,5 тыс. руб. за тонну (включая НДС). Стоимость дизельного топлива на бункерном рынке Санкт-Петербурга варьировалась вокруг уровня 17,5 тыс. руб. за тонну. В первом квартале 2010 года средняя стоимость высокосернистого бункерного топлива (марки IFO-180) составила 12,2 тыс. руб. за тонну (включая НДС), низкосернистого – 12,6 тыс. руб. за тонну (включая НДС), дизельного топлива – 16,8 тыс. руб. за тонну (включая НДС). Таким образом, с учетом небольшой в настоящее время разницы в цене высокосернистого мазута и дизельного топлива, стоимость низкосернистого (с содержанием серы 1,5 %) топлива отличалась от стоимости мазута с высоким содержанием серы всего на 5 %. Однако эта разница будет увеличиваться после введения в 2010 году допустимой нормы 1 % содержания серы в топливе для особых районов и это уже наблюдается.

Избавиться от выбросов сернистого газа можно, лишь удалив из топлива серу. Известны и широко применяются для очистки автомобильного топлива технологии, позволяющие удалить серу практически полностью и сделавшие возможным внедрение известного стандарта «Евро-4». Основной способ очистки топлива от серы заключается в барботировании через него водорода в присутствии катализаторов при повышенных температурах и давлениях. При

этом водород реагирует с серой, образуя сероводород – газ, плохо растворимый в топливе, а потому легко от него отделяемый. Затем сероводород разделяют на серу и водород. Чистая сера идет в продажу, что заметно снижает себестоимость процесса, а водород – назад, в установку. При этом стоимость очистки 1 т топлива для снижения содержания серы с 3 % до 1,5 % при существующих технологиях очистки составит 45 – 80 долл. США [1]. Кроме того, существенным является уменьшение смазывающих свойств мало-сернистого топлива, что может привести к повышенному износу пар трения. Для компенсации изменения смазывающих свойств эффективным способом являются специальные добавки (например, 2 % биодизельного топлива), что дополнительно увеличивает стоимость низкосернистого топлива. На момент написания статьи стоимость 1 т топлива HSFO составляет около 460 долл., а, следовательно, его доочистка увеличит себестоимость топлива не менее чем на 15 – 20 %. Как следствие этого можно ожидать существенный рост цен на низкосернистое топливо, который будет обусловлен не только себестоимостью очистки топлива от серы, но и дефицитом низкосернистого топлива, который неизбежно возникнет, так как его производство в настоящее время ограничено. Учитывая, что топливная составляющая охватывает обычно не менее 60 % от общих затрат на содержание судна, переход на низкосернистые сорта топлива в судоходстве приведет к общему росту стоимости перевозок морем, экономии топлива путем эксплуатации судов на малых скоростях хода, внедрение других способов экономии топлива, например использование ветра и т. д.

Оборудование судов системами очистки (скрубберами)

Данный способ состоит в пропускании выхлопных газов через воду с высоким содержанием pH (щелочную среду). При этом оксиды серы вступают в реакцию с водой, образуя кислоты, которые нейтрализуются щелочами. Установка состоит из скруббера и системы подачи воды. Кроме того, требуется внесение дополнительных реагентов, так как морская вода не всегда обладает необходимым уровнем pH, а для пресной воды это требуется постоянно. Эмиссия оксидов серы при применении таких систем очистки на судне уменьшается на 69 – 94 % [2], однако затраты достаточно существенны. По оценкам [3], стоимость такой установки при монтаже на строящемся судне будет составлять 0,5 – 4 млн долл. в зависимости от мощности двигателя (рас-

смагивался диапазон мощностей 3000 – 25 000 кВт), а ее монтаж на существующем судне (модернизация) потребует затрат примерно в 1,5 раза больших. Кроме того ежегодные затраты на химические реактивы (каустическую соду) и очистку скруббера будут составлять 2 – 5 долл. на каждый кВт мощности двигателя. Таким образом, применение систем очистки выхлопных газов в скруббере требует от судовладельца достаточно серьезных материальных затрат, которые не могут не привести к росту стоимости перевозок.

Переход на альтернативные виды топлива (не нефтяного происхождения)

Одним из экономически приемлемых путей повышения экологической эффективности и энергетической безопасности судов является переход на альтернативные виды топлива, использование которых обеспечивает сокращение вредных выбросов в окружающую среду судовыми двигателями. Для применения нового вида топлива на судах требуется одновременное выполнение нескольких условий:

- экономическая привлекательность и большие доступные запасы сырья для его производства (нет смысла переходить на вид топлива, источник которого может исчерпаться так же быстро, как запасы нефти);

- низкие финансовые затраты на установку на судне дополнительного оборудования (затраты должны быть по крайней мере ниже стоимости установки для очистки выхлопных газов на судне);

- присутствие в достаточном количестве на рынке (доступность в портах бункеровки, наличие необходимой инфраструктуры или незначительные затраты на ее создание);

- безопасность (а также наличие нормативных документов, регламентирующих безопасное применение на судне).

В настоящее время можно выделить следующие виды нового топлива, которые рассматриваются в печати как альтернативные существующим для различных видов транспорта и энергетики:

- биотопливо из органического сырья;

- водород;

- водотопливная эмульсия;

- природный газ.

Рассмотрим далее каждый из этих видов топлива с точки зрения возможности его использования в ближайшее время и наличия необходимых нормативных документов для его применения на судах.

Биотопливо из органического сырья

Биотопливо – это топливо, получаемое из биологического сырья, как правило, отходов сельскохозяйственного или деревообрабатывающего производства. Различается жидкое биотопливо (спирты (этанол и метанол), биодизельное топливо), твердое биотопливо (дрова, солома) и газообразное (биогаз). В настоящее время в некоторых странах спирт нашел широкое применение в качестве топлива для автомобилей, но, даже не прибегая к экономическим расчетам, можно с уверенностью сказать, что спирт и метанол не могут быть использованы на судах в качестве жидкого топлива из-за своей низкой температуры вспышки и повышенной пожароопасности.

В отличие от спирта, органическое топливо, производимое из маслянистых культур (биодизельное топливо) может быть использовано на судах и его использование не требует какой-либо модернизации топливной системы или главного двигателя.

Биодизельное топливо – это нетоксичный, разлагающийся в обычных условиях вид топлива, используемый для замены обычного дизельного топлива. Биодизельное топливо производится из растительных масел, масла, использованного для приготовления пищи, и животного жира. Притом что энергетическая ценность биодизельного топлива приблизительно равна энергетической ценности обычного дизельного топлива, биодизельное топливо является гораздо более чистым топливом и более безопасным при хранении и использовании по сравнению с обычным дизельным топливом.

Биодизельное топливо – один из видов альтернативного топлива, способного снизить нефтяную зависимость и уменьшить глобальное загрязнение атмосферы. Использование концентрированных смесей биодизельного топлива в существующих транспортных дизельных двигателях может обеспечить их существенные преимущества по сравнению с работой на дизельном топливе в отношении экологических показателей, ядовитых выделений, при этом биодизельное топливо является возобновляемым. Биодизельное топливо – это неядовитое, разлагаемое микроорганизмами жидкое топливо, состоящее из длинных цепей моноалкиловых эфиров жирных кислот и может использоваться либо в чистом виде, либо в смеси с дизельным нефтяным топливом.

Объем выпуска этого топлива в Европе постоянно растет. Оно предназначено, в основном, для использования в грузовых автомобилях. Существуют три наиболее крупных центра промышленного производства этого топлива в Европе – Австрия, Франция и Германия, где

выпуск биодизельного топлива составляет сейчас, соответственно, 7,5 %, 0,7 % и 0,4 % от общего количества потребляемого в этих странах дизельного топлива. В среднем в мире потребление биодизельного топлива составляет ~ 1 % от расхода дизельного топлива. Обычно биодизельное топливо из-за его высокой стоимости смешивают с дизельным топливом. Цена на биодизельное топливо зависит от региона его производства, используемого сырья и от процентного содержания в смеси с дизельным топливом. Цена биодизельного топлива марки B100 примерно в два раза выше цены обычного дизельного топлива, в то время как при меньшем его содержании в смеси с дизельным топливом стоимость такого топлива соответственно снижается.

Биодизельное топливо может использоваться в различных целях. Его можно применять в качестве смазывающей добавки (1...2 %) к дизельному топливу с крайне низким содержанием серы, а смесь 20 % биодизельного с 80 % дизельного топлива (B20) может служить заменой дизельного топлива, при этом происходит лучшее сгорание дизельного топлива, за счет чего наблюдается его экономия до 5 %. Чистое биодизельное топливо (B100) можно использовать в двигателе только после соответствующей подготовки. В настоящее время B20 – самая распространенная биодизельная смесь в США. Считается, что она позволяет удачно сбалансировать требования, связанные с особенностями дизельного топлива, рабочими характеристиками, эмиссией отработавших газов и стоимостью. Эта смесь может использоваться в системах, предназначенных для работы на дизельном топливе, в том числе в дизельных двигателях, нефтяных нагревательных котлах и турбинах, не требуя никаких переделок. Однако, при несомненном положительном влиянии применения биодизельного топлива на выбросы SO_x , по выбросам NO_x наблюдалась несколько более сложная картина. Исследования, проведенные в 2001 – 2002 годах в США на пароме «OSKI» показали, что при содержании в топливе 20 % биодизельного топлива содержание NO_x в выхлопных газах увеличивается на 11 % и только при использовании чистого биодизельного топлива (B100) выбросы NO_x уменьшаются на 50 %.

Хотя при использовании биодизельного топлива проблема вредных выбросов (в том числе CO_2) решается (выбросы почти не содержат оксидов серы, в два раза снижается дымность газов, а концентрация CO , углеводородов и твердых частиц, особенно сажи, уменьшается на 25 – 50 %), цена этого вида экологически чистого топлива не позволяет рассматривать его на судах в качестве серьезной альтернативы топливу нефтяного происхождения. Возможно, стимулы по применению

биодизельного топлива появятся у судовладельцев после введения ИМО ограничений по выбросам CO_2 , которые активно обсуждаются в ИМО в последнее время. Кроме того, бункеровочные компании должны подготовить определенную инфраструктуру, емкости для его хранения во избежание смешивания различных сортов топлива.

Применение жидкого топлива из органического сырья на судах полностью находится в пределах существующих норм и правил Международной конвенции СОЛАС-74, нашедших отражение также в Правилах классификации и постройки морских судов Российского морского регистра судоходства (РС) [4], т. е. спирты запрещены как топливо с низкой температурой вспышки, а по применению биодизельного топлива ограничений нет.

Использование твердого и газообразного биотоплива на водном транспорте имеет достаточно длительную историю применения. Речные суда, на которых получение биогаза производилось непосредственно на судне из твердого биотоплива (отходов деревообработки), эксплуатировались до второй половины прошлого века. Достаточно сказать, что на 1 января 1941 года во всех пароходствах СССР числилось 469 газоходов разного назначения. На этих судах использовались серийные тракторные двигатели внутреннего сгорания, получающие газ от разработанного на Московской судостроительной верфи газогенератора МСВ-84 с керамической камерой сгорания. Рядом с машинным отделением находился бункер, вмещавший трехсуточный запас топлива – для обеспечения работы двух двигателей общей мощностью 100 л.с. газогенератор ежедневно (!) поглощал кубометр хвойных чурок [5]. Безусловно, при строжайшей экономии в условиях военного времени использование такого вида топлива для речных судов было целесообразно. Но в ближайшем будущем, хотя для возвращения к подобному виду топлива технических трудностей нет, сложности по обеспечению морских судов дровами и экономическая целесообразность их использования вызывают большие сомнения.

Все эти проблемы не позволяют всерьез рассматривать топливо органического происхождения в качестве возможной альтернативы для применения на морских судах в ближайшем обозримом будущем.

Водород

В настоящее время на транспортных средствах возможно применение водорода в качестве топлива для двигателей внутреннего сгорания или в топливных элементах.

Отличительной особенностью водорода является его высокие энергетические показатели, экологическая чистота и практически неограниченная сырьевая база. По массовой энергоемкости водород превосходит традиционные углеводородные виды топлива в 2,5–3 раза. Водород обладает низкой энергией воспламенения в широких пределах коэффициента избытка воздуха – водородно-воздушная смесь устойчиво воспламеняется в широком диапазоне концентраций от $\alpha = 0,2$ до $\alpha = 10$. Это обеспечивает возможность работы в широком диапазоне скоростных режимов двигателей внутреннего сгорания, работающих по циклу Отто, однако самовоспламенение водородно-воздушной смеси в цилиндре двигателя при степени сжатия, соответствующей дизельным двигателям, не происходит. Для самовоспламенения этой смеси необходимо обеспечить температуру конца сжатия не менее 750 °С. В дизельном двигателе возможно воспламенение воздушной смеси от запальной порции углеводородного топлива, то есть водород может применяться в дизельном двигателе только в варианте двухтопливного двигателя с внешним или внутренним смесеобразованием. В то же время возможность преждевременного воспламенения водородно-воздушной смеси требует дополнительных мероприятий по предупреждению неконтролируемого воспламенения – подачи воды во впускной трубопровод. В общем необходимо отметить, что использование водорода для сжигания в судовых ДВС требует дополнительных серьезных исследований процессов сгорания водорода, изучения процессов смесеобразования и управления ими, существенных разработок фирм-производителей судовых дизельных двигателей. Учитывая свойства водорода (высокая диффузионная способностью, большая скорость сгорания, широкие пределы воспламенения, низкая энергия воспламенения), конвертация судовых ДВС для использования водорода представляется значительно более сложной задачей, чем, скажем, их конвертация для использования природного газа.

Другой, менее затратный и более перспективный вариант использования водорода в судовом ДВС заключается в применении его в качестве присадки к обычному мазуту, при котором топливо частично замещается водородом, а каких-либо серьезных дорогостоящих модернизаций двигателя не требуется. Для насыщения топлива водородом используется специальная камера в топливной системе, куда подается топливо и водород под небольшим давлением. Полученная смесь по трубопроводу через топливоподкачивающий насос, насос высокого давления и форсунку подается в цилиндр двигателя. Устройство до-

бавки до 10 % водорода в топливо является эффективным средством увеличения энерго-экологических показателей двигателя, так как насыщение водородом топлива обеспечивает его полное сгорание. При этом присадка водорода позволяет улучшить условия смесеобразования и сгорания дизельного топлива, и благодаря этому можно достичь экономии углеводородного топлива, снизить дымность и токсичность выхлопных газов, сократить выбросы, особенно сажи и угарного газа, кроме того увеличивается топливная эффективность силового агрегата и немного возрастает его мощность. Системы с использованием водорода в качестве присадки к дизельному топливу уже исследовались ранее и применяются за рубежом в автомобильном транспорте [6]: небольшое количество водорода получается из дистиллированной воды путем электролиза и затем подается в топливо. Сообщается о значительном снижении вредных выбросов и уменьшении расхода топлива за счет более полного сгорания. Применение таких систем на судах не приведет к значительным затратам. При получении водорода на борту необходимый объем баллона для его хранения минимален и опасности, связанные с его хранением, а так же стоимость значительно меньше, чем при использовании водорода в качестве основного топлива. Учитывая, что физические свойства водорода и метана достаточно близки (плотность меньше воздуха, низкий предел взрываемости), к топливной системе таких двигателей должны быть применены все требования к системам газового топлива, которые уже содержатся в [4].

Наиболее известный и многообещающий способ применения водорода на судах и в стационарной энергетике – это использование в его топливных элементах. Хотя первые топливные элементы появились уже около 50 лет назад, доступных данных об опыте их длительной непрерывной эксплуатации нет, так как они использовались либо как экспериментальные образцы, либо как источник энергии разового назначения (в космических аппаратах), либо в военных целях на подводных лодках. Примерами применения топливных элементов в судовой энергетике (как в нашей стране, так и за рубежом) могут служить только дизельные подводные лодки, где применение топливных элементов дает неоспоримые преимущества. В Германии производятся подводные лодки класса U-212 с топливными элементами производства «Siemens AG». Субмарины U-212 стоят на вооружении Германии (4 ед.) и Италии (2 ед.), планируется их дальнейшая постройка. Под водой лодка работает на водороде и практически не производит шумов. Испанская судостроительная компания «Navantia, S.A.» плани-

рует начать производство подводных лодок класса S-80 с силовыми установками на водородных топливных элементах мощностью 300 кВт. Водород планируют производить на борту подводной лодки из этанола. Поставщик топливных элементов компания «UTC Power» (США).

Исследования по созданию топливных элементов, которые в СССР было принято называть электро-химическими генераторами (ЭХГ), для малых подводных лодок начались в нашей стране еще 30 лет назад. В 1978 году головным разработчиком пропульсивных систем с ЭХГ стало Специальное конструкторское бюро котлостроения. Оно использовало опыт Уральского электрохимического комбината и НПО «Энергия», сумевших создать такие генераторы для космических аппаратов. На основе данного опыта был сконструирован, построен и испытан ЭХГ «Кристалл-20». Однако в дальнейшем эти разработки не нашли своего применения ни на малых подводных лодках типа «ПИРАНЬЯ», ни в проектах 877/636 «ВАРШАВЯНКА». В открытых источниках нет информации о проблемах отечественных ЭХГ судового назначения, однако их отсутствие до настоящего времени на российских субмаринах говорит о том, что результаты натурных испытаний не устраивают руководство ВМФ РФ.

Топливом для топливного элемента служит водород. Топливные элементы относятся к химическим источникам тока. Они осуществляют прямое превращение энергии топлива в электричество, минуя малоэффективные, идущие с большими потерями, процессы горения. Топливный элемент содержит протонопроводящую полимерную мембрану, которая разделяет два электрода – анод и катод. Каждый электрод обычно представляет собой угольную пластину (матрицу) с нанесенным на нее катализатором – платиной или сплавом металлов-платиноидов. На катализаторе анода водород (который подводится из внешних коммуникаций) теряет электроны. Протоны проводятся через мембрану к катоду, но электроны отдаются во внешнюю цепь, так как мембрана не пропускает электроны. На катализаторе катода молекула кислорода (который также подводится из внешних коммуникаций) соединяется с электроном и пришедшим протоном и образует воду, которая является единственным продуктом реакции. Это электрохимическое устройство в результате высокоэффективного «холодного» горения топлива непосредственно вырабатывает электроэнергию. У топливных элементов КПД может составлять 60 – 80 % и, в отличие от теплового двигателя, их КПД почти не зависит от коэффициента загрузки. В отличие от обычного гальванического элемента, вещества для электрохимической реакции подаются в топливный элемент из-

вне. Поэтому главная проблема применения топливных элементов на судах – это хранение водорода на борту и заправка им судов в портах. Эти проблемы настолько трудно решаемы, что всерьез рассматривать переход на водородное топливо на морских судах в настоящее время и в обозримом будущем не приходится, а экономические показатели существующих топливных элементов вообще ставят под сомнение экономическую целесообразность применения топливных элементов в составе обычных надводных установок. По данным открытой печати, стоимость топливных элементов за рубежом равна 5 – 10 тыс. долл. за 1 кВт установленной мощности, ресурс самых лучших опытных образцов составляет менее 6 000 ч, а средний КПД за весь цикл жизни – не более 30 % (с учетом затрат на получение водорода). Отечественный электрохимический генератор «Фотон», разработанный Уральским электрохимическим комбинатом при мощности 27 кВт имеет моторесурс не более 2 000 ч и стоит около 300 тыс. долл. [7].

Несмотря на столь непривлекательные экономические показатели, первое судно «Zemships» (Zero Emission Ship), работающее на топливных элементах, построено в Германии на верфи SSB в Гамбурге. Проект финансируется Еврокомиссией. Эксплуатация судна началась 29 августа 2008 года на реке Альстер, судовладелец – туристическая компания ATG Alster-Touristik GmbH. Судно имеет длину 25,5 м, ширину – 5,2 м, вместимость – 100 пассажиров. Энергетическая установка судна состоит из электродвигателя мощностью 100 кВт и двух водородных топливных элементов Proton Motor PM 600 мощностью по 50 кВт. Баллоны для хранения топлива вмещают 50 кг водорода под давлением 35 МПа. Этого количества достаточно для трех дней работы.

В 2008 году DNV были выпущены требования к топливным элементам и требования по их размещению на судах [8]. Анализ требований Правил DNV показывает, что они разработаны на основе анализа риска с учетом опыта перевозки и использования опасных газов на судах. Требования указанных Правил представляют определенный интерес для специалистов, но практического применения их на гражданских транспортных судах ожидать не приходится, поэтому в РС разработка аналогичных требований в настоящее время не планируется.

В тоже время примеры удачного применения водорода в морской индустрии за рубежом есть, и связаны они с получением водорода на судне с использованием энергии ветра.

Немецкий танкер «HYDROGEN CHALLENGER» (1967 года постройки) был переоборудован в 2004 году в судно-производитель водорода с использованием вертикальной воздушной турбины. Суд-

но вырабатывает водород, стоя у причала или, при необходимости, совершая рейсы в районах с постоянными сильными ветрами у северного побережья Германии. Водород на судне производится путем электролиза воды, хранится на судне (предусмотрены емкости объемом 1194 м³) и сдается на берег для продажи на рынке.

Совмещение технологии получения водорода на судне с помощью энергии ветра с последующей подачей водорода в виде присадки к топливу может стать достаточно перспективным для применения на морских судах уже в ближайшем будущем.

Водотопливная эмульсия

При использовании на судах водотопливной эмульсии уменьшается нагарообразование, повышается надежность работы цилиндропоршневой группы, газовыпускного тракта, топливной аппаратуры, увеличивается срок между очистками топливных фильтров. С уменьшением температуры выпускных газов снижается теплонапряженность деталей цилиндропоршневой группы, скорость загрязнения смазочного масла, снижается токсичность выхлопных газов.

В настоящее время водотопливная эмульсия, которая производится на судне в специальной установке, находит применение на судах в главных и вспомогательных двигателях, позволяет экономить топливо, уменьшает выбросы NO_x (до 30 % в зависимости от содержания воды в эмульсии), но не оказывает существенного влияния на выбросы SO_x. Примером установки для получения на судне водотопливной эмульсии может быть недавно успешно испытанная в эксплуатации на судне «КОММУНАРЫ НИКОЛАЕВА» кавитационная гидродинамическая установка УКГ-6 (производитель ООО «Энергосберегающие технологии», г. Миасс), на которую в 2008 году было выдано Свидетельство РС о типовом одобрении. Испытания показали экономию 8 % топлива на главном двигателе и 10 % на вспомогательном котле. При испытании установки замеры NO_x не производились, но по некоторым источникам [1] уменьшение NO_x прямо пропорционально содержанию воды в эмульсии и снижение выбросов NO_x возможно до 20 %. Поскольку содержание SO_x в выхлопе зависит от содержания серы в исходном топливе, то уменьшение расхода топлива может частично компенсировать судовладельцам увеличение затрат на приобретение мазута с низким содержанием серы. При этом нельзя забывать, что на судне существенно увеличивается потребление воды от опреснительной установки.

Так как установки по производству водотопливной эмульсии недорогие, легко монтируются на существующих судах, при этом быстро окупаются и не требуют какой-либо дополнительной портовой инфраструктуры, можно ожидать их появления на судах. Однако применение водотопливной эмульсии приводит только к незначительной экономии топлива, не оказывая серьезного влияния как на экологическую ситуацию, связанную с выбросами в атмосферу с судов, так и экономические проблемы, связанные с уменьшением запасов нефти.

Газовое топливо

1. Применение природного газа в качестве топлива на судах с паротурбинной установкой

Применение природного газа в качестве топлива на судах имеет уже продолжительную историю, которая связана, прежде всего, с судами-газовозами, где газ успешно применяется как основное топливо на протяжении многих десятилетий. Как известно, на судах-газовозах жидкий природный газ непрерывно испаряется, и перед проектантами стоит дилемма: повторное сжижение газа на судне или сжигание его в энергетической установке. Первый путь требует наличия на судне сложной холодильной установки в специальном помещении и соответствующих затрат. В последнее время выбор чаще делается в пользу сжигания его в качестве топлива, при этом мощность и соответствующее потребление газа энергетической установкой выбираются из расчета испаряемости газа в грузовых емкостях. Для судов-газовозов основным нормативным документом был и остается Международный кодекс по газовозам (Кодекс IGC), где в гл. 16 изложены требования по применению газа (перевозимого груза) в качестве топлива. При этом в котлах, двигателях внутреннего сгорания и газовых турбинах допускается применение только метана как единственного из углеводородных газов с плотностью меньше воздуха. Требования РС по использованию груза в качестве топлива на судах, предназначенных для перевозки газов наливом, изложены в гл. 10 части VI «Системы и трубопроводы» Правил классификации и постройки газовозов [9], и полностью соответствуют требованиям Кодекса IGC. Требования [9] также полностью аналогичны требованиям правил других членов МАКО для судов, предназначенных для перевозки сжиженных газов наливом.

Двигатель внутреннего сгорания может работать на газовом топливе по циклу Отто с принудительным зажиганием смеси в цилин-

дре от искры. Однако при этом сохраняются и даже усугубляются все недостатки, присущие бензиновым двигателям внутреннего сгорания. Воспламенение газового топлива от искры приводит к потере до 15 % мощности двигателя в газовом варианте из-за снижения степени сжатия. Надежность работы двигателя при таком режиме зависит от работоспособности свечей зажигания. При высоких степенях сжатия плотность заряда в момент прохождения искры оказывается настолько высокой, что пробивное напряжение на электродах свечи превосходит допустимые пределы. При таких напряжениях и в условиях повышенных температур заряда в цилиндре надежность свечей зажигания заметно снижается и повышается эрозия электродов. Бездетонационная работа обеспечивается снижением степени сжатия в цилиндре и, как следствие, большим, чем у дизельного двигателя, удельным расходом топлива. Поэтому такой способ использования газа получил широкое распространение в автомобилестроении, но не прижился в судоходстве.

Единственное преимущество таких двигателей – полная независимость от жидкого дизельного топлива оборачивается проблемой при возникновении необходимости использования дизельного топлива при отсутствии газового. Поэтому когда перед судовладельцем возникла дилемма – ДВС по циклу Отто или паровая турбина, выбор был очевиден. На газовозах получили распространение паротурбинные установки, в которых наиболее просто организовать сжигание газа в котлах и при этом сохранить возможность сжигания мазута.

Так как на судне легче всего организовать сжигание газа в котлах, первым судовым типом двигателя на газовом топливе стала паровая турбина. Примером судна с паротурбинной установкой, работающей на природном газе, может быть газовоз «GRAND ANIVA», имеющий совместный класс РС и Регистра Ллойда. Судно имеет одну паровую



Рис. 1

Газовоз «GRAND ANIVA» с паротурбинной установкой, работающей на природном газе

турбину мощностью 23600 кВт, получающую пар давлением 6 МПа от двух главных водотрубных котлов, в которых сжигается испарившийся груз или мазут. Мощность передается на винт фиксированного шага через механическую передачу.

После того как дизелестроительные фирмы организовали производство двухтопливных двигателей внутреннего сгорания, работающих на природном газе по циклу Дизеля с воспламенением топлива в цилиндре от сжатия, этот тип двигателя на судах-газовозах стал получать все большее распространение. При этом различают газодизельные двигатели с внешним смесеобразованием и непосредственным впрыском газового топлива в цилиндр.

2. Применение газа в качестве топлива на судах с дизельными установками

Октановое число, которое характеризует способность топлива сгорать в цилиндрах двигателя без детонации, у природного газа (метана) составляет не менее 105 единиц [10], т. е. выше, чем у любого бензина. Именно детонация ограничивает степень сжатия бензиновых двигателей, что делает моторы, работающие по циклу Отто, менее эффективными, чем двигатели, использующие цикл Дизеля. Так как октановое число природного газа выше, чем у самого высокооктанового бензина, газ способен работать в дизельном двигателе, но для того чтобы в цилиндре не произошло преждевременной детонации топлива, газозвдушная смесь должна быть достаточно «бедной», т. е. содержание газового топлива в газозвдушной смеси должно быть пониженным, что будет способствовать снижению уровня выбросов NO_x .

Существенным преимуществом газодизельного цикла является то, что мощность источника зажигания в нем значительно больше, чем в двигателе с искровым зажиганием, кроме того, рабочая смесь поджигается не в одной точке у холодной стенки, а в центре заряда. Благодаря этому одной из важных особенностей газодизельного процесса является возможность надежной работы на обедненной рабочей смеси.

Газодизельный процесс при внешнем смесеобразовании выглядит как показано на рис. 2: из впускного коллектора в цилиндры дизельного двигателя поступает не воздух, а газозвдушная смесь, которая после закрытия впускных клапанов сжимается в цилиндре. Но максимального давления сжатия в цилиндре не достаточно для самовоспламенения газового топлива, так как температура самовоспламенения метана составляет 650 – 720 °С, что намного выше, чем у

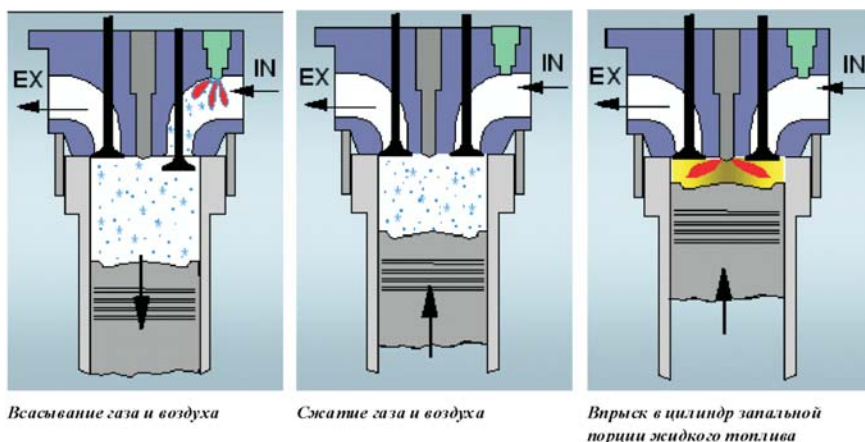


Рис. 2

Схема работы четырехтактного газодизельного двигателя с внешним смесеобразованием (по материалам фирмы Wärtsilä)

обычного дизельного топлива ($320 - 380^{\circ}\text{C}$). Поэтому при окончании такта сжатия в цилиндр через обычную жидкотопливную форсунку впрыскивается небольшая доза жидкого дизельного топлива, которую принято называть запальной или пилотной. У высокооборотных дизельных двигателей расход жидкого топлива, используемого для воспламенения и полного сгорания газо-воздушной смеси, составляет $10 - 20\%$ от количества, расходуемого при обычном дизельном процессе. В средне- и малооборотных двигателях требуется лишь $5 - 8\%$ дизельного топлива для воспламенения. В настоящее время уже есть двигатели, использующие для воспламенения всего 1% пилотного топлива, и ведутся работы по дальнейшему уменьшению его количества. Именно такой способ реализован фирмой Wärtsilä в модельном ряду производимых ей двухтопливных двигателей W32DF и W50DF, которые включают по 8 типоразмеров и охватывает диапазон мощностей от $1,6$ до 16 МВт , с соответствующим эффективным КПД от 44 до 48% . При таком способе сохраняется возможность быстрого перехода с газового топлива на дизельное и обратно. То есть дизельный двигатель, переведенный на газ, становится двухтопливным.

В конструкцию системы питания газодизельного двигателя добавляются: газовый смеситель, механизм ограничения подачи дизельного

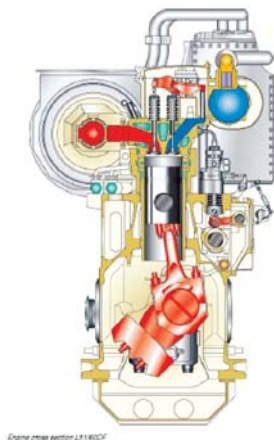
топлива, система регулирования подачи газа и устройство для взаимосвязанного управления топливным насосом дизельного двигателя и подачей газа. Жидкое топливо подается в цилиндр через совмещенную форсунку с двумя иглами. Первая используется при работе двигателя на жидком топливе, вторая – для подачи «зажигающей» порции дизельного топлива, играющего роль воспламенителя рабочего тела при работе двигателя на газе. Часть форсунки, предназначенная для работы двигателя только на жидком топливе, выполнена по стандартной схеме с иглой, нагруженной пружиной. Игла «зажигающей» части форсунки управляется электроникой, а топливо поступает от топливного насоса высокого давления.

Газ подается к впускному патрубку на крышке цилиндра под давлением 4 – 6 атм. Во избежание детонации и пропусков вспышек в цилиндрах соотношение «топливо-воздух» постоянно контролируется электронным блоком управления, а подача газа дозируется специальным клапаном. Для уменьшения вероятности детонации газового топлива в цилиндре двигателя с внешним смесеобразованием смесь делают обедненной, что ведет к уменьшению мощности двигателя. При неожиданном прекращении подачи газа двигатель, не снижая мощности, автоматически переключается на жидкое топливо. Обычно четырехтактные среднеоборотные двигатели фирмы Wärtsilä используются на судах в сочетании с электрической передачей на винт.

Газодизельный процесс при внутреннем смесеобразовании с непосредственным впрыском газа в цилиндр имеет преимущество перед газодизельным двигателем с внешним смесеобразованием, так как степень сжатия в нем не ограничена условием отсутствия детонации газозоудшной смеси при ее сжатии в цилиндре. Однако при этом возникает другая сложность – для подачи газа в цилиндр требуется высокое давление (выше давления в цилиндре), что предполагает необходимость наличия компрессора и трубопровода газа высокого давления, расположенных в машинном отделении, а это значительно увеличивает вероятность утечки газа в машинном отделении.

Газодизельный процесс при внутреннем смесеобразовании с непосредственным впрыском газа в цилиндр реализован фирмой MAN в двигателе L51/60DF (рис. 3).

В конструкции двигателя L51/60DF предусмотрен впрыск в цилиндр газового топлива и жидкого дизельного топлива, причем минимальное количество жидкого топлива зажигания (пилотного) уменьшено до 1 % от общего потребления. Помимо экономии жидкого топлива уменьше-



В 2007 году на двухтопливный двигатель L51/60DF РС выдал Свидетельство о типовом одобрении. Номинальная цилиндровая мощность составляет 1000 кВт при 514 об/мин, число цилиндров 6 – 9.

Рис. 3

Четырехтактный двухтопливный дизельный двигатель L51/60DF фирмы MAN

ние количества пилотного топлива очень важно для уменьшения выбросов NO_x . Так при работе на газовом топливе двигатель L51/60DF выделяет всего $1,5 \text{ г/кВт} \cdot \text{ч NO}_x$, что полностью соответствует требованиям Приложения VI (уровень Tier III) для особых районов контроля выбросов NO_x . Аналогичный показатель для двигателей с 6 % пилотного топлива составляет $14 \text{ г/кВт} \cdot \text{ч NO}_x$.

В настоящее время двигатель L51/60DF нашел применение на судне-газовозе испанской судоходной компании «EN Elcano» в составе установки с электрической передачей на винт.

В 1996 г. МАКО были разработаны унифицированные требования: UR M59 – Control and Safety Systems for Dual Fuel Diesel Engines (Системы управления и безопасности двухтопливных дизельных двигателей), в которых изложены требования к дизельным двигателям, использующим в качестве топлива натуральный газ (метан) высокого давления, который впрыскивается в цилиндр двигателя, а жидкое топливо используется в качестве запального топлива для воспламенения в цикле. Во многом эти требования аналогичны упомянутым выше требованиям Кодекса IGC, что не удивительно, так как при их разработке ориентировались на аналогичный уровень безопасности,

учитывая особенности работы дизельных двигателей. Требования UR M59 изложены в разд. 9 «Двухтопливные двигатели внутреннего сгорания» части IX «Механизмы», а также в гл. 13.12 «Применение природного газа (метана) в качестве топлива» части VIII «Системы и трубопроводы» [4]. Изложенные требования были размещены в [4], а не в [9] для того, чтобы они могли применяться не только на газовозах, но и на обычных судах. Это возможно при условии согласования с Морской Администрацией флага отступления от требований СОЛАС-74 о применении жидкого топлива с температурой вспышки более 60 °С или на судах, к которым требования СОЛАС-74 не применимы (прежде всего, буровые платформы и суда, не совершающие международные рейсы). Указанные выше разделы [4] включают требования к двигателям, автоматической защите, к системам подвода газового топлива, обнаружения утечек, вентиляции машинных помещений.

3. Применение газа на судах, не являющихся газовозами

За рубежом в настоящее время имеется опыт применения природного газа в качестве топлива не только на судах-газовозах. Во избежание взрывов на судах СОЛАС-74 требует применения топлива с температурой вспышки 60 °С и более, делая исключение только для судов-газовозов, использующих в качестве топлива груз. Вопрос использования на обычных судах газового топлива впервые стал актуален для судов, обслуживающих буровые добывающие платформы, для которых возможна бункеровка газом на самих платформах. Для того чтобы устранить противоречие таких судов с требованиями СОЛАС-74 КБМ ИМО выпустил циркуляр MSC.285(86) «Interim Guidelines on Safety for Natural Gas-Fuelled Engine Installations in Ships» (Временное руководство по безопасности для двигательных установок на судах, использующих в качестве топлива природный газ).

По данным зарубежных печатных источников, в настоящее время успешно эксплуатируется около 20 таких судов малого и среднего водоизмещения, данные о некоторых из них приведены в табл. 2. Например, построенное в Норвегии для обеспечения буровых платформ судно «VIKING ENERGY» (рис. 4) длиной 94,9 м и дейдвейтом 2,886 т имеет энергетическую установку с четырьмя главными двухтопливными двигателями Wärtsilä 60/32DF мощностью 2010 кВт каждый. Судно оборудовано емкостями для хранения жидкого природного газа общей вместимостью 234 м³. В результате использования природного газа в качестве топлива выбросы NO_x уменьшились на 90 %, CO₂ – на 30 %, SO_x – отсутствуют.

Таблица 2
Данные об использовании природного газа в качестве топлива на судах, не являющихся газовозами

Страна, год постройки	Судно	Способ хранения газа	Описание установки	Источник газа
1	2	3	4	5
Канада, 1972, Переоборудование на газ 1985/1988	Речные паромы «KLATAWA» и «KULLEET» Длина: 47,46 м Мощность: 650 л.с. Скорость: 10 уз Валовая вместимость: 355 Вместимость: 26 автомобилей и 150 пассажиров	CNG	Нет данных	Газ поступает по наземному трубопроводу давлением 0,87 МПа и сжимается в трехступенчатом компрессоре до 25 МПа при котором он хранится в 50 стальных баллонах общей вместимостью 14,7 м³
Норвегия, 2001	FPSO Petrojarl 1	LNG	Два дизель-генератора 3720 кВт каждый при 720 об/мин	Газ из месторождения
Норвегия, 2000 (строился в Польше)	Паром «GLUTRA» Длина: 95 м, Вместимость: 86 легковых автомобилей, 8 трейлеров и 300 пассажиров Скорость: 12 уз.	LNG 2 × 27,2 м³	Дизель-электрический привод, четыре генератора «Mitsubishi diesels», 675 кВт, воспламенение от искры	Бункеруется каждые 5 – 6 дней специальным автомобилем-газовозом. Бункеровка длится 2 ч
Норвегия, 2003	судно обеспечения платформ на шельфе «VIKING ENERGY»	LNG, 2 емкости общей вместимостью 234 м³ с вакуумной изоляцией	4 двухтопливных двигателя Wartsila 60/32DF 2010 кВт каждый	Бункеруется от FPSO

1	2	3	4	5
Норвегия, 2010 (строился в Польше)	Паром «MOLDEFJORD» (+ заказано 2 однотипных – Roms- dalsfjord and Fannefjord) Длина: 122,7 м Вместимость: 390 пассажиров, 125 легковых автомобилей	LNG	Нет данных	Бункеруется каждые 5 – 6 дней специальным автомобилем-газовозом. Бункеровка длится 2 ч
Россия, 1994	Речной пассажирский теплоход «НЕВА-1» (проект Р51)	CNG Баллоны 20 МПа	2 двигателя 3Д6 (6Ч 15/18) по газодизель- ному циклу	



Рис. 4
Судно «VIKING ENERGY» использует сжиженный природный газ в качестве топлива
[11]

В нашей стране применение природного газа на судах началось 1995 г. в Санкт-Петербурге с опытной эксплуатации речного пассажирского теплохода «НЕВА-1» (проекта Р51), переведенного на газовое топливо (рис. 5). Для хранения газового топлива в кормой части тепло-



Рис. 5
Речной теплоход «НЕВА-1» использует сжатый природный газ в качестве топлива

хода оборудованы две секции для баллонов, рабочее давление в которых составляет 200 атм. Два главных судовых двигателя ЗДб (6Ч 15/18) конвертированы для работы по двухтопливному газодизельному циклу. Запальная доза дизельного топлива на этом судне велика – около 30 %. Поэтому по экологическим показателям (выбросам NO_x) газовый теплоход не намного превосходит теплоход, работающий на дизельном топливе, но экономия дизельного топлива составляет около 60 %. По результатам эксплуатации первого в стране судна-газохода Российский Речной Регистр в 2008 году выпустил Временные технические требования к судам-газоходам, использующим компримированный газ [12].

4. Способы хранения газа на судах

Как известно, в настоящее время применяются два способа хранения природного газа:

в сжиженном состоянии при давлении, близком к атмосферному, и температуре около $-162\text{ }^{\circ}\text{C}$;

в компримированном (сжатом) виде в баллонах при обычной температуре под давлением от 200 до 400 бар (в зависимости от прочности баллонов).

Перевозки сжиженного природного газа (СПГ) регламентируются Кодексом IGC и в настоящее время широко применяются на судах-газовозах. Эффективность перевозки компримированного природного газа (КПГ) в ~3 раза ниже, чем его перевозка в сжиженном виде в емкости такого же объема.

Другие способы хранения метана пока получили реальное воплощение только в виде экспериментальных технологий – в виде соединений метана с водой (газгидратов), хранения в пористых материалах или в связанном виде.

На судах, не являющихся газовозами, наибольшее распространение получил способ хранения газа в сосуде с вакуумной термоизоляцией. Преимуществом такого способа является то, что можно использовать уже наработанные технологии транспортировки сжиженного газа в контейнер-цистернах. Примером такой контейнер-цистерны может служить контейнер-цистерна для СПГ модели КЦМ-35/0.6, производимой ОАО «Уралкриомаш» (Нижний Тагил), конструкция которой была одобрена РС. Цистерна проектировалась в соответствии с требованиями Международного морского кодекса по опасным грузам, регламентирующими перевозку опасных грузов в контейнерах.

Вместимость контейнер-цистерны КЦМ-35/0.6 немного больше, чем у цистерны для СПГ, которая используется на норвежском пароме «GLUTRA» (35 м^3 против 27 м^3 – см. табл. 2).

Произведем приблизительную оценку дополнительных затрат, которые потребуются, в случае, если судовладелец решит дооборудовать строящееся судно для работы на природном газе. За основу расчета взяты данные проекта сухогруза типа «река-море», большая серия таких судов уже построена в г. Петрозаводске. При этом для упрощения считаем, что:

- КПД двигателя не меняется и равен 0,45;
- коэффициент нагрузки ГД – 0,8;
- запальное дизельное топливо составляет 5 %;
- стоимость цистерны принимаем 170 тыс. долл.

Расчет показывает, что содержимого одной цистерны хватает на 60 ч ходового времени. Однако разместить на судне цистерны СПГ возможно только за счет грузового трюма, примыкающего к машинному отделению. При этом возможны 2 варианта: либо высота кормового трюма уменьшается на ~3 м, либо его длина – на такую же величину. В первом варианте на судне продольно размещаются 6 топливных цистерн, при этом запас газового топлива будет соответствовать 15 сут. ходового времени. Потеря объема грузовых трюмов будет составлять 13 %. Во втором варианте на судне поперечно можно разместить 3 топливные цистерны, при этом запас газового топлива будет соответствовать 7,5 сут. ходового времени. Потеря объема грузовых трюмов будет составлять 4 %.

Затраты на дооборудование судна будут состоять из стоимости криогенных сосудов, дополнительных переборок и палуб, дополнительной противопожарной изоляции, систем топливоподготовки, газообнаружения, вентиляции, замены или конвертации дизельного двигателя. В первом варианте затраты составят 1,5 – 2 млн долл., во втором варианте – от 1 до 1,5 млн долл.

5. Дополнительные опасности, связанные с использованием газового топлива на судах

Применение газа на судах связано с появлением дополнительной опасности – возможностью утечки газа, возникновения взрывоопасной концентрации газа в машинном отделении и, как следствие, объемного взрыва, так как в машинных помещениях категории А источники воспламенения практически всегда присутствуют (работающие котлы и ДВС, электрооборудование).

Опасность объемного взрыва в машинном отделении различна для разных углеводородных газов, что связано с их различной плотностью. Метан – единственный углеводородный газ, плотность которого при нормальных условиях меньше воздуха. Следовательно, при

утечке он не накапливается в нижней части машинного отделения, а стремится в его верхнюю часть, откуда легко удаляется работающей системой вентиляции, так же как и водород. Все прочие углеводородные газы имеют большую плотность, и поэтому при их применении опасность их скопления и появления взрывоопасной концентрации значительно выше. Именно поэтому все действующие нормативные документы [12, 13] допускают использование на судах только метана.

Как мы уже говорили, требования [9] охватывают все вопросы по применению газа в качестве топлива на судах-газовозах. Не охваченными в [4] остаются вопросы хранения газового топлива и бункеровки им судна, которое не является газовозом. Кроме того, должны быть сформулированы дополнительные требования к противопожарным системам, так как при наличии газа на борту сценарий пожара будет другим, и поэтому в дополнение к обычным системам пожаротушения должны быть установлены системы, применяемые на газовозах: порошкового тушения, водораспыления, инертизации пространств для хранения емкостей газового топлива. Наиболее разумным представляется в этой связи для судов с газовыми двигателями применять требования части V «Противопожарная защита», а к размещению топливных емкостей – требования части IV «Грузовые емкости» [9].

6. Развитие требований РС [4] в части применения газового топлива на судах

В последнее время в свете ужесточения требований к выбросам NO_x и SO_x в прессе активно обсуждается вопрос о применении газа в качестве топлива. При применении газа в качестве топлива действительно значительно уменьшаются выбросы NO_x и практически полностью отсутствуют выбросы SO_x . Однако практическое решение этого вопроса в ближайшее время представляется весьма маловероятным не из-за технических трудностей обеспечения безопасности на таких судах, а из-за отсутствия береговой инфраструктуры для снабжения обычных транспортных судов таким видом топлива. Можно с уверенностью сказать, что основная часть транспортных судов по-прежнему будет использовать жидкое топливо, при необходимости используя его малосернистые сорта.

Однако применение сжиженного природного газа на морских судах, безусловно, может в будущем найти более широкое применение в случае значительного удорожания жидкого топлива нефтяного происхождения и серьезных жестких экологических ограничений. Для того чтобы отсутствие нормативной базы не препятствовало применению газа на судах, в РС в настоящее время разрабатывают-

ся требования для судов, которые будут иметь специальный знак в классификационной символике **GFS** (gas fuelled ship), применимый для судов-газоходов. Указанная классификационная характеристика будет применяться как для газозовов, так и для других судов, прежде всего на буровых платформах, а так же на судах, не совершающих международные рейсы. В специальных требованиях к таким судам будут полностью учитываться требования Кодекса IGC (для судов-газовозов) и Временного руководства IMO MSC.285(86) «Interim Guidelines on Safety for Natural Gas-Fuelled Engine Installations in Ships» (для всех прочих судов). Первое судно, соответствующее таким требованиям, в классе PC уже есть. Это газовоз «GRAND ANIVA». После введения в [4] новой классификационной символики судну может быть присвоен соответствующий класс.

Выводы

Основным видом топлива на морских судах в ближайшем будущем останется жидкое топливо нефтяного происхождения.

Для экономии жидкого топлива на судах могут быть предложены технологии по уменьшению расхода топлива, например, в виде добавления к мазуту присадок водорода, воды (в виде водотопливной эмульсии), биотоплива, применение которых улучшает экологические показатели ДВС, но эти меры существенно не влияют на количество выбросов SO_x .

Единственным новым видом топлива, применение которого существенно влияет на экологические показатели судовых двигателей, является природный газ.

Отечественная промышленность производит все элементы, необходимые для перехода на газовое топливо на судах небольшого водоизмещения: двигатели мощностью до 1000 кВт, работающие на газовом топливе, криогенные емкости для хранения сжиженного газа, приборы-газоанализаторы. Все это оборудование не только производится, но и уже имеет одобрение PC. При условии экономической целесообразности возможно широкое применение природного газа на морских судах.

Главным препятствием на пути применения природного газа на морских судах является отсутствие инфраструктуры по бункеровке судов сжиженным природным газом. Технических трудностей и нормативных ограничений в [4] по применению на судах этого вида топлива в настоящее время нет.

Список литературы

1. Fournier A. Controlling Air Emissions from Marine Vessels: Problems and Opportunities. – University of California Santa Barbara, 2006. – 85 с.
2. Раевски П. Снижение уровня эмиссии оксидов серы на судах морского флота // Дизелестроение. – 2007. – № 1. – С. 43 – 45.
3. Горбов В. М., Митенкова В. С. Анализ методов снижения эмиссии серы на водном транспорте // Судостроение. – 2008. – № 8. – С. 29 – 31.
4. Правила классификации и постройки морских судов. – СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2010.
5. Алексеев И., Богданов Б., Павлов А. Историческая серия ТМ. Сибирские газоходы // Техника молодежи. – 1982. – № 5.
6. Матиевский Д. Д., Вагнер В. А. Осуществление присадки водорода к топливу и ее влияние на показатели работы дизеля // Двигателестроение. – 1985. – № 2. – С. 53 – 56.
7. Кириллов Н. Г., Лазарев А. Н. Анализ перспективности различных видов альтернативных моторных топлив: сжиженный природный газ – моторное топливо XXI века // Дизелестроение. – 2010. – № 1. – С. 26 – 33.
8. DNV Rules for ships, Part 6, Ch. 23, Fuel cell installations – 2008, p. 22.
9. Правила классификации и постройки газозовов. – СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2004.
10. ГОСТ 27577-2000 Газ природный топливный компримированный для двигателей внутреннего сгорания ТУ.
11. Ship Technology: Viking Energy LNG-fueled Supply/Cargo Vessel - <http://www.ship-technology.com/projects/viking/index.html>.
12. Правила Российского Речного Регистра в 4-х томах. Том 4, Дополнение 2: Временные технические требования к судам-газоходам, использующим компримированный газ. – М., 2008. – С. 67 – 86.
13. DNV Rules for ships, Part 6, Ch. 13, Gas fuelled engine installations – 2010, p. 25.

В.И. Евенко, А.В. Андриюшин, Л.Г. Цой, А.А. Сергеев

ПРОЕКТ НОВЫХ ТРЕБОВАНИЙ ПРАВИЛ КЛАССИФИКАЦИИ И ПОСТРОЙКИ МОРСКИХ СУДОВ РОССИЙСКОГО МОРСКОГО РЕГИСТРА СУДОХОДСТВА К ПРОПУЛЬСИВНОЙ МОЩНОСТИ ТРАНСПОРТНЫХ СУДОВ ЛЕДОВОГО ПЛАВАНИЯ

Введение

Обеспечение безопасной и эффективной эксплуатации ледокольных судов является необходимым условием успешного освоения Арктического шельфа, поддержания транспортных морских магистралей в период зимней навигации. Решение указанной проблемы является комплексным и включает требования к обеспечению эксплуатационной прочности корпуса, элементов пропульсивной установки и к поддержанию движения судна в ледовых условиях, соответствующих категории судна. Для выполнения последнего пропульсивный комплекс должен переработать мощность главного двигателя (ГД) в тягу, необходимую для преодоления сопротивления льда движению судна (ледового сопротивления). Поэтому пропульсивная мощность ГД (мощность ГД для обеспечения тяги пропульсивного комплекса) должна быть достаточной для поддержания движения судна во льдах и обеспечения его эффективных эксплуатационных скоростей. Нормирование пропульсивной мощности (тяговых характеристик пропульсивного комплекса) имеет первостепенное значение, так как безопасность и эффективность эксплуатации судна во льдах зависит не только от его ледовой прочности, но и от ледовой ходкости, что подтверждается многолетним опытом эксплуатации отечественного флота в замерзающих морях, а также освоения Арктики и Антарктики.

Можно привести немало аргументов в обоснование зависимости безопасности и эффективности эксплуатации судна от ледовой ходкости, в том числе:

1. судно с недостаточной ледовой ходкостью может быть остановлено льдами и в случае ледового дрейфа может быть вынесено на мель, подводные скалы. При работе в ледовых условиях около терминалов,

буровых платформ, включая швартовные операции по загрузке нефти, недостаточная тяга пропульсивного комплекса (ледовая ходкость) может привести к аварийным ситуациям, таким как навал на терминал, разрыв грузозачного устройства с последующим загрязнением акватории;

2. судно, застрявшее во льду, из-за неспособности движения (недостаточной мощности), может вмерзнуть в лед и оказаться в ледовом плену на весь зимний период, подвергаясь повышенной опасности получить повреждения корпуса, винторулевого комплекса и затонуть. В качестве примера в табл. 1 приводится описание вынужденных дрейфов экспедиционных ледокольных судов, совершавших автономное плавание в Антарктиду и их повреждений;

Таблица 1

Основные сведения о вынужденных дрейфах судов в антарктических льдах

Судно	Район	Период	Место начала и окончания дрефа		Протяженность дрейфа, км		Средняя скорость дрейфа, м/с	
			широта	долгота	общая	по прямой	общая	по прямой
1	2	3	4	5	6	7	8	9
«Бельжика»	Море Беллинсгаузена	02.03.1898-10.03.1899	71°30' 70°50'	82°15' W 102°15' W	3070	600	0,10	0,02
«Дойчланд»	Море Уэдделла	08.03.1912-26.11.1912	73°40' 63°42'	31°00' W 36°20' W	2940	1134	0,13	0,05
«Эндьюренс»	Море Уэдделла	10.01.1915-09.04.1916	76°34' 61°56'	31°30' W 54°05' W	3268	1728	0,09	0,04
«Аврора»	Море Росса и Балленский ледяной массив	06.05.1915-12.02.1916	77°38' 64°49'	166°24' E 152°40' E	2144	1440	0,09	0,06
«Обь»	Балленский ледяной массив	23.04.1973-22.07.1973	68°05' 64°54'	156°39' E 160°32' E	1015	673	0,13	0,09
«Михаил Сомов»	Балленский ледяной массив	02.02.1977-26.03.1977	68°48' 67°19'	156°39' E 152°19' E	452	380	0,09	0,04

1	2	3	4	5	6	7	8	9
«Михаил Сомов»	Тихоокеанский ледяной массив	15.03.1985-26.07.1985	74°21' 74°54'	135°10' E 153°03' E	997	517	0,09	0,05
Примечание. «ОБЬ» – 1973 г. получила серьезные повреждения корпуса при ледовых сжатиях; «МИХАИЛ СОМОВ» – 1985 г. высвобожден ледоколом «ВЛАДИВОСТОК»; «МИХАИЛ СОМОВ» – 1986 г. снова прибывал в вынужденном дрейфе; «МИХАИЛ СОМОВ» – 1991 г. попал в ледовый плен на всю зиму с июня по декабрь; «СТЕПАН КРАШЕНИНОВ» – попал в ледовую реку, тащило кормой вперед и повредило кормовую оконечность.								

3. недостаточная ледовая ходкость транспортного судна приводит к снижению эксплуатационных скоростей, что может привести к срыву поставок перевозимых грузов. Особенно это актуально для ледокольных танкеров, когда сроки поставки нефти строго регламентированы.

В указанных случаях потребуются спасательные операции по высвобождению судна из ледового плена, снятию людей, привлечению дополнительных ледоколов, очистке акватории от загрязнения и т. д., что повлечет за собой большие материальные затраты (потери). Дополнительно необходимо принимать во внимание риск потери человеческой жизни, а также политические аспекты.

Из истории зимнего плавания в Арктике известны случаи вовлечения в дрейф даже мощных ледоколов. Так, атомный ледокол (а/л) «ЛЕНИН» в конце марта – начале апреля 1976 г. после разведки «корпусом» в районе Карских Ворот выходил из пролива в условиях встречного дрейфа льда в течение 40 ч, находясь, практически, на одном месте между широтами 70° 12' и 70° 22'.

В марте следующего 1977 г. ледокол (л/к) «МУРМАНСК» в том же районе попал в «ледяную реку», которая текла вдоль припая со скоростью 4–5 уз. Для оказания помощи был вызван а/л «АРКТИКА».

Сжатия в результате дрейфа льда часто являются причиной ледовых повреждений корпуса и винторулевого комплекса судов. Известны случаи гибели судов в условиях сжатий в Арктике (п/х «ЧЕЛЮСКИН» в 1934 г., п/х «КАЗАХСТАН» в 1949 г., т/х «ВИТИМЛЕС» в 1965 г., т/х «НИНА САГАЙДАК» в 1983 г.).

Поэтому, наряду с обеспечением ледовой прочности, судно должно также обладать необходимой ледовой ходкостью, позволяющей безопасно оперировать в соответствующих его классу ледо-

вых условиях как по району, так и по сезону плавания в полярных водах.

Действующие требования к пропульсивной мощности транспортных судов ледового плавания Правил классификации и постройки морских судов РС (Правила РС) не подвергались принципиальным изменениям с 1990 г. Расчетная формула (2.1.1) в части VII «Механические установки» для назначения мощности была заимствована из Финско-Шведских ледовых правил, (изд. 1985 г.) [1]. В соответствии с указанной расчетной формулой пропульсивная мощность прямо назначается в функции от водоизмещения судна и его ширины. Форма корпуса учитывается коэффициентом в функции от угла наклона форштевня. Ледовая категория учитывается эмпирическими коэффициентами. Адаптация формулы для пропульсивной мощности из требований Морской администрации Финляндии (ФМА) применительно к судам арктических категорий в классе РС, предназначенных для трасс Северного морского пути (СМП), была выполнена путем коррекции эмпирических коэффициентов в зависимости от ледовой категории на основе предшествующего опыта эксплуатации. В частности, эмпирические коэффициенты соответствуют практике проводки ледокольных судов, ширина которых меньше ширины проводящего ледокола. Действующие Правила РС не регламентируют расчетные режимы эксплуатации и ледовые условия для назначения сопротивления льда (ледового сопротивления) и пропульсивной мощности соответственно, что значительно осложняет процедуры их назначения для современных судов. Расчетная формула (2.1.1) Правил РС не в полной мере учитывает влияние обводов судна на сопротивление льда движению судна. Например, для адекватного определения ледового сопротивления дополнительно к углу наклона форштевня необходимо учесть углы развала шпангоутов и угол входа ватерлинии носовой оконечности. В работах [2, 3] был выполнен сравнительный анализ требований классификационных обществ (КО) и морских администраций к пропульсивной мощности ГД. В частности показано, что в соответствии с требованиями действующих Правил РС и Финско-Шведских правил 1985 г. пропульсивная мощность не обеспечивает одинаковую ледовую ходкость (ледопроезжимость) судов в зависимости от водоизмещения при прочих равных условиях. Для водоизмещений, меньших 10000 т, ледопроезжимость резко снижается. Последнее противоречит принципу равной безопасности судов в рамках заданной категории (ледового класса). Учитывая вышеизложенное, действующие требования Правил РС к пропульсивной мощности не в полной мере соответствуют

современным требованиям проектирования и эксплуатации. Требуется разработка новых требований РС, которые должны базироваться на реальных физических процессах взаимодействия корпуса судна с ледовым покровом. Точность процедур назначения пропульсивной мощности должна соответствовать практике проектирования современных ледокольных судов. В первую очередь, современные требования КО к пропульсивной мощности должны четко определять нормативные ледовые условия и эксплуатационные режимы движения для назначения ледового сопротивления (тяги пропульсивного комплекса). Пропульсивная мощность должна определяться в функции от назначенного ледового сопротивления с учетом индивидуального для каждого судна взаимодействия пропульсивного комплекса с корпусом.

В 1999 г. ФМА опубликовала проект новых требований к мощности двигателей судов ледового плавания. После апробации эти требования были введены в действие с 2002 г. Бюллетенем № 13/1.10.2002 ФМА [4]. В основу этих новых требований заложен сценарий самостоятельного плавания судов в старом, частично смерзшемся канале, проложенном ледоколами в сплоченных льдах, что отражает специфику эксплуатации транспортных судов в Ботническом и Финском заливах в период зимней навигации. Толщина набитого льда в канале задается в зависимости от ледовой категории судна. Требования содержат расчетную формулу для назначения ледового сопротивления с последующим пересчетом для назначения пропульсивной мощности. Расчетная формула учитывает все необходимые параметры корпуса судна для определения ледового сопротивления с точностью, соответствующей современной практике проектирования. Дополнительно к новым требованиям ФМА (Бюллетень № 13/1.10.2002) рекомендуется использовать положения Руководства по применению требований Финско-Шведских правил в части уточнения методов назначения пропульсивной мощности на основе самоходных и буксировочных испытаний на чистой воде и в ледовом опытовом бассейне [5]. Подробный анализ указанных новых требований ФМА выполнен в работах [2, 3]. Важно отметить, что в сравнении с действующими требованиями РС новые требования ФМА значительно увеличивают расчетное ледовое сопротивление для судов с водоизмещением меньше 10000 т, что связано с необходимостью обеспечения одинаковых скоростей движения для «малых» и «больших» судов. Последнее соответствует принципу обеспечения равной безопасности для судов в рамках заданной категории при прочих равных условиях (см. выше).

Важно отметить, что новые требования ФМА составной частью вошли в соответствующие нормативные документы DNV, ABS, GL для

судов, плавающих в районе Балтийского моря, что делает их международными нормативами. Последнее необходимо учитывать и при разработке новых требований РС.

В марте 2004 г. выпущены разработанные прибалтийскими странами ЕС при участии России Рекомендации Хельсинской комиссии (Хелком 25/7) по обеспечению безопасности зимнего судоходства в районе Балтийского моря [6]. В этих Рекомендациях в качестве критерия для назначения достаточной мощности судов различных ледовых классов принимается предельная толщина ровного льда, в котором судно в состоянии двигаться самостоятельно со скоростью 1–2 уз., т. е. ледопроходимость.

В частности, допускается плавание судов с классами:

1C – при толщине льда 15–30 см;

1B – при толщине льда 30–50 см;

1A – при толщине льда более 50 см.

Для минимального ледового класса, соответствующего категории II (по требованиям ФМА), предельная толщина ровного льда составляет 10–15 см.

В настоящее время в ABS начаты исследования по корректировке действующих требований к пропульсивной мощности судов ледового плавания. В качестве основного критерия для назначения пропульсивной мощности принимается ледопроходимость в функции от ледовой категории судна.

Основные подходы к разработке требований к пропульсивной мощности судов ледового плавания в классе РС

В соответствии с требованиями части I «Классификация» Правил РС в тяжелых ледовых условиях плавание транспортного судна в «свежепроложенном» канале за ледоколом принимается в качестве основного режима эксплуатации. С учетом изложенного, а также на основании опыта эксплуатации, могут быть сформулированы следующие основные условия для назначения минимально допустимого уровня мощности (тяги движительного комплекса) транспортных судов в зависимости от ледового класса.

1. В качестве исходных принимаются ледовые условия в соответствии с международной классификацией судов полярного плавания и требованиями части I «Классификация» Правил РС (см. табл. 2). Такой подход позволяет в максимальной степени соотнести требования Правил РС с требованиями Руководства ИМО для судов, соверша-

ющих плавание в полярных водах Арктики [7] и Унифицированными требованиями МАКО к судам арктических категорий, классифицируемым в зависимости от ледовых условий в соответствии с Номенклатурой морских льдов Всемирной метеорологической организации [8]. Из табл. 2 видно, что международная классификация достаточно хорошо согласуется с российским опытом эксплуатации.

2. В тяжелых ледовых условиях для обеспечения прочности и безопасной эксплуатации плавание в «свежепроложенном» канале под проводкой ледокола принимается в качестве основного режима эксплуатации. Транспортное судно, оказавшись в тяжелых ледовых условиях, которые по показателям толщины льда превышают на одну категорию установленные для судна этого класса предельно допустимые значения, должно иметь достаточную мощность (тягу движительного комплекса), чтобы иметь возможность под проводкой ледокола выйти из района с запредельной для его класса ледовой обстановкой. Дополнительно необходимо принимать во внимание торосистость льда. Учет последнего фактора выполняется через эквивалентную толщину ровного льда [9] (см. табл. 2). С увеличением толщины и возраста ледового покрова принимается меньшая торосистость, поскольку у многолетних льдов она ежегодно в период таяния сглаживается.

3. Скорость движения судна в канале за ледоколом должна составлять не менее 4–5 уз., чтобы при ледовых сжатиях силой 1–2 балла обеспечивался минимальный устойчивый ход со скоростью около 2 уз. Подобный запас скорости требуется также для обеспечения управляемости судна, оснащенного традиционным винторулевым комплексом.

4. Ходкость судна в ледовом канале зависит от относительной ширины канала и достаточно хорошо коррелируется с ледопроеходимостью [10]. При ширине судна, меньшей чем ширина проводящего ледокола (ширина канала), ледопроежимость судна составляет (40 – 60 %) от толщины эквивалентного ровного льда, в котором проложен канал. Для указанного случая в табл. 2 представлены соответствующие расчетные значения минимально требуемой ледопроежимости для транспортных судов в зависимости от ледовой категории. Эти данные хорошо соответствуют предшествующему опыту эксплуатации традиционных ледокольных судов на трассах СМП. В настоящее время для вывоза нефти с арктических месторождений наиболее эффективными и экономически оправданными являются крупнотоннажные танкеры, ширина которых значительно превышает ширину

Таблица 2

Предлагаемое деление судов по ледовой ходкости в зависимости от ледового класса

Полярный класс ИМО (МАКО)	Ледовый класс Финско-Шведских Правил	Категория ледовых усилений РС, 2008 г. (1995 г.)	Ледовые условия по Номенклатуре морских льдов (ВМО), см	Исходная расчетная толщина ровного льда, см	Торосистость, баллы	Коэффициент увеличения толщины льда	Эквивалентная толщина льда в канале, см	Расчетная ледопроеходимость, м	Предлагаемое требование к минимальному уровню ледопроеходимости, м
PC1	-	-	Многолетний лед толщиной >400	>550	1	1,3	>700	>3,0	3,0
PC2	-	Arc 9	Многолетний лед 300-400	400-500	1-2	1,4	560-700	2,4-3,0	2,4
PC3	-	Arc 8	Двухлетний лед 200-300	300-400	1-2	1,4	420-560	1,8-2,4	1,8
PC4	-	Arc 7	Однолетний толстый 120-200	200-300	2	1,5	300-450	1,3-1,8	1,3
PC5	-	Arc 6	Однолетний средний 90-120	120-200	2-3	1,6	190-320	0,9-1,3	1,0
PC6	IA Super	Arc 5 (УЛ)	Однолетний средний 70-90	90-120	2-3	1,6	145-190	0,6-0,9	0,7
PC7	IA	Arc 4 (Л1)	Однолетний тонкий 50-70	70-90	2-3	1,6	110-145	0,4-0,6	0,5
-	IB	Ice 3	Белый 30-50	50-70	2-3	1,6	80-110	0,3-0,4	0,35
-	IC	Ice 2	Серо-белый 15-30	30-50	3	1,7	50-85	0,2-0,3	0,25
-	Category II	Ice 1	Серый 10-15	15-30	3	1,7	25-50	0,1-0,2	0,15

Примечание. Под ледопроеходимостью подразумевается предельная толщина ровного сплошного льда, преодолеваемого судном непрерывным ходом со скоростью около 2 уз. При этом прочность льда на изгиб составляет не менее 500 кПа, и он имеет снежный покров высотой 20-25 см.

действующих ледоколов. В этом случае движение сопровождается расширением и «доламыванием» кромок канала корпусом судна, что требует увеличения тяги движительного комплекса и пропульсивной мощности. Необходимая мощность может быть снижена при условии проводки судна двумя ледоколами, прокладывающими канал большей, чем судно, ширины, или одним ледоколом за несколько проходов. В указанных случаях судовладелец (оператор) должен согласовать способ проводки судна с морской администрацией и КО.

5. Для эксплуатации судов в Ботническом и Финском заливах с заходами в порты Финляндии и Швеции необходимо выполнение новых требований ФМА (Бюллетень № 13/1.10.2002) к пропульсивной мощности, которая назначается из условия проводки судна в старом, заполненном мелкобитым и тертым льдом канале (см. выше).

Таким образом, новые требования ФМА к мощности (тяге движительного комплекса) судов ледового плавания практически сводятся к нормированию их ледопроеходимости и ходкости в канале за ледоколом. В отечественной практике ледоколостроения под ледопроеходимостью понимается предельная толщина ровного сплошного льда, в котором судно в состоянии двигаться, используя полную мощность, устойчивым непрерывным ходом с минимальной скоростью около 2 уз. (1 м/с). Прочность льда на изгиб должна составлять не менее 500 кПа, на льду имеется естественный снежный покров высотой 20–25 см. Указанное определение ледопроеходимости будет использоваться ниже при нормировании мощности в проекте новых требований РС. В современной практике проектирования судов высоких ледовых категорий ледопроежимость принимается в качестве основного параметра, характеризующего ледовую ходкость судна. В настоящее время такой подход является общепризнанным и позволяет судовладельцам при заказе судов уверенно ориентироваться в эксплуатационных возможностях судов в зависимости от их ледового класса. В свою очередь, для судостроителей ледопроежимость является физически понятной и четко определенной исходной базой для определения необходимой мощности судна ледового плавания. Для этой характеристики разработаны современные методы прогнозирования с точностью, требуемой для современного судостроения.

На основании изложенного предлагается следующий принцип нормирования в Правилах РС пропульсивной мощности (тяги движительного комплекса) транспортных судов ледового плавания с учетом их ледовой категории.

Минимально требуемая мощность на гребных валах P_{min} судов ледового плавания определяется применительно к двум основным (базовым) режимам эксплуатации судна во льдах:

.1 самостоятельное плавание в ровном сплошном льду со скоростью движения 2 уз.;

.2 плавание под проводкой ледокола в свежепроложенном канале со скоростью движения 5 уз.

Из сопоставления мощности, необходимой для удовлетворения условиям каждого режима, выявляется наибольшее значение, которое и принимается в качестве минимально требуемого для судна данной ледовой категории. Мощность назначается в функции от расчетного ледового сопротивления. Расчетное ледовое сопротивление для базовых режимов должно определяться на основе хорошо зарекомендованных методов, которые апробированы опытом проектирования и эксплуатации. Рекомендуется проведение модельных испытаний в ледовом опытовом бассейне, программа и методика которых должна быть согласована с Регистром.

Выше указывалось, что предельная толщина льда, преодолеваемая судном в канале и ледопроходимость достаточно хорошо коррелируются. Поэтому определение ледового сопротивления в канале, проложенном в ровном льду, может быть сведено к назначению ледового сопротивления в ровном льду эквивалентной толщины. Для определения эквивалентной толщины ровного льда (ледопроходимости) могут быть рекомендованы формулы, предложенные в работах [10] и [11], которые приведены ниже в Приложении под номерами (2.1.2.2.1) и (2.1.2.2.2).

Для практического выполнения требований к пропульсивной мощности судов высоких ледовых категорий необходимо использование специальных ледокольных обводов корпуса, обеспечивающих снижение сопротивления льда движению и маневрированию судна. На рис. 1 приведены факторы, оказывающие наиболее сильное влияние на ледопроходимость судна. При заданных основных размерениях особое внимание уделяется параметрам формы обводов носовой оконечности (углы наклона форштевня, входа ватерлинии, развала бортов), что обуславливает целесообразность предъявления требований к ним, а также к состоянию наружной обшивки судов ледового плавания. В действующих Правилах РС такие требования имеют место (см. гл. 3.10 части II «Корпус» Правил РС) и при необходимости должны модернизироваться с учетом последних исследований и тенденций в области проектирования и эксплуатации судов ледового плавания.

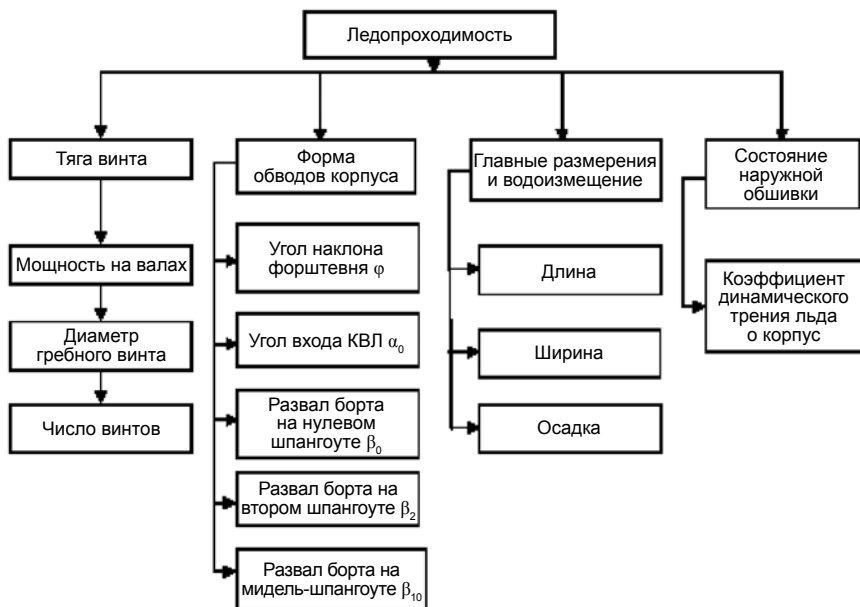


Рис. 1
Основные факторы, от которых зависит ледопроходимость судна

Ледопроходимость судна в процессе его проектирования может быть оценена либо с помощью общепризнанного и хорошо зарекомендовавшего себя на практике расчетного метода (формулы), либо путем модельных испытаний в ледовом опытовом бассейне.

Для оценки ледопроходимости ледокольно-транспортных судов высших арктических категорий (**Arc9** – **Arc6**) может быть рекомендовано выражение (1), предложенное ЦНИИМФ на основе анализа опыта эксплуатации и постройки отечественных морских ледоколов и ледокольно-транспортных судов, а также специально выполненных серийных модельных испытаний [12]:

$$h_{ice} = \frac{0,07 \cos^{3/2} \varphi \sqrt{\sin \left(\frac{\alpha_0 + \beta_0 + \beta_2}{3} \right)}}{\sqrt[2,6]{f_d} \sqrt[5]{L/B} \sin^{3/2} (90^\circ - \beta_{10})} \sqrt{\frac{P_e}{B}} \sqrt[6]{\Delta}, \text{ м}, \quad (1)$$

где φ – угол наклона форштевня к КВЛ, град;
 α_0 – угол заострения КВЛ, град;
 $\beta_0, \beta_2, \beta_{10}$ – углы развала шпангоутов на нулевом, втором теоретических шпангоутах и на мидель-шпангоуте, град;
 L, B – длина и ширина судна по КВЛ, м;
 Δ – водоизмещение по КВЛ, т;
 P_e – суммарная тяга гребных винтов на режиме, близком к швартовному, т;
 f_d – коэффициент динамического трения о лед.

Рекомендуемые значения параметра f_d :

для нержавеющей стали – 0,065,
 для покрытия типа *Инерта-160* – 0,072,
 для обычной судостроительной стали – 0,080.

Следует отметить, что надежность этой формулы была проверена зарубежными специалистами. Так, в ABS был обсчитан весь мировой ледокольный флот (36 типов) и была подтверждена хорошая сходимость результатов расчетов с натурными данными.

Для ледопроходимости судов относительно низких ледовых категорий (**Arc6** и ниже), характеризующихся развитой цилиндрической вставкой корпуса, может быть использована формула:

$$h_{ice} = \left(\frac{P_E}{B \cdot k_{hull}} \right)^{0,83} \left(\frac{\Delta}{20000} \right)^{0,17}, \quad (2)$$

где k_{hull} – коэффициент формы корпуса судна.

Для коэффициента формы корпуса рекомендуется выражение, предложенное ААНИИ [13].

$$k_{hull} = k_{klass} \cdot (\cos \beta_1)^{0,6} \cdot (\sin \varphi)^{0,7} \cdot [1 + 0,006 \cdot (\beta_0 - 18)] \cdot [1 + 0,4 \cdot (\Delta L/L)], \quad (3)$$

где k_{klass} – эмпирический коэффициент, зависящий от ледовой категории судна;
 β_1 – угол развала шпангоута на первом теоретическом шпангоуте, град.;
 β_0 – угол развала шпангоута на миделе, град;
 φ – угол наклона форштевня к КВЛ;
 $\Delta L/L$ – относительная длина цилиндрической вставки.

Эмпирический коэффициент k_{klass} рекомендуется определять по прототипу, категория и главные размерения которого наиболее близки к проектным.

Дополнительные требования к обеспечению тяги движительного комплекса (мощности главных двигателей) современных ледокольных судов

Установка направляющих насадок на суда ледового плавания является перспективным путем значительного увеличения тяги движительного комплекса на режимах, близких к швартовным. Установка насадки позволяет увеличить тягу движительного комплекса до 25 % – 30 %, тем самым значительно улучшить ледовые качества судна. Однако в тяжелых ледовых условиях входное отверстие насадки может экранироваться льдом, что приводит к резкой потере тяговых характеристик и ухудшению ледовой ходкости. Последнее также необходимо учитывать при обеспечении безопасности различных морских операций, включая погрузочные операции около ледостойких терминалов и платформ. Например, блокирование насадки гребного винта судна или проводящего ледокола может привести к быстрому сбросу их скорости и, как следствие, к их столкновению. Как показывает опыт эксплуатации арктических судов, установка насадки целесообразна при отработанной защите движительного комплекса от попадания льда для различных эксплуатационных режимов. Примером такого решения является компоновка винторулевого комплекса шведского ледокола «ОДЕН». Определенные рекомендации по этой проблеме рассмотрены в работе [14].

Выше были изложены основные требования к назначению пропульсивной мощности для обеспечения тяги движительного комплекса транспортных ледокольных судов и преодоления сопротивления льда движению. Однако для ледокольных судов уровень пропульсивной мощности главного двигателя должен назначаться не только для обеспечения необходимого уровня тяги пропульсивного комплекса. Дополнительно необходимо учитывать специальные требования по обеспечению работоспособности главных двигателей во льдах. Требуется запас мощности и момента главного двигателя для поддержания вращения гребного винта и предотвращения его заклинивания и поломки при взаимодействии со льдом. Особенно актуальна эта проблема для судов высоких арктических категорий и ледоколов, гребные винты которых в тяжелых ледовых условиях практически постоянно взаимодействуют со льдом. Эта проблема обостряется при внедрении на современных судах улучшенных обводов корпуса, позволяющих значительно снизить ледовое сопротивление корпуса и уровень пропульсивной мощности для заданных ледовых условий. В

настоящее время в действующие Правила РС введены соответствующие рамочные нормативы (см. гл. 7.6 части XVII «Дополнительные знаки символа класса и словесные характеристики, определяющие конструктивные или эксплуатационные особенности судна» Правил РС), однако практическая процедура оценки мощности и момента главного двигателя для обеспечения его работоспособности при взаимодействии со льдом является предметом специального рассмотрения Регистром.

В последнее время одной из наиболее актуальных проблем является обеспечение безопасности швартовных операций крупнотоннажных танкеров и вспомогательных судов при погрузке нефти с нефтяных терминалов и буровых платформ. Для выполнения указанных операций к ледокольным судам могут предъявляться дополнительные требования в части маневренности и пропульсивной мощности (ледовой ходкости). Требования должны разрабатываться с учетом индивидуальных особенностей ледовых и других эксплуатационных особенностей, ледокольного менеджмента, размеров буровой платформы. В настоящее время ведется интенсивное освоение нефтяных месторождений Печорского моря. Сильные сжатия ледового покрова и торосистость являются характерными особенностями ледовых условий в Печорском море, что необходимо учитывать при анализе возможных сценариев работы крупнотоннажных танкеров по загрузке нефти с терминала. Удержание танкера в канале за терминалом и ледоколом в условиях бокового сжатия является одним из возможных базовых сценариев для назначения необходимой тяги движительного комплекса и пропульсивной мощности. Сильная торосистость ледового покрова приводит к большому количеству набитого льда в канале. В зависимости от торосистости и толщины ровного льда (припая) толщина набитого льда в канале может достигать нескольких метров, что необходимо учитывать для назначения требуемой для удержания судна тяги движительного комплекса и мощности. Оценка ледового сопротивления в канале, набитом льдом, может быть выполнена по методике [15], разработанной на основе теории сыпучей среды. Дополнительно кромки канала могут оказывать силовое воздействие на корпус, обусловленное ледовым сжатием. Оценка влияния сжатия может быть выполнена по методике Асура [16]. Назначение пропульсивной мощности ледокольных судов в указанных условиях является предметом специального рассмотрения Регистром и должно выполняться в рамках разработки общей системы транспортных операций по вывозу нефти, включая ледокольный менеджмент.

На основании изложенных подходов разработан проект новых требований РС к пропульсивной мощности транспортных судов ледового плавания, который представлен ниже. Проект предназначен для обсуждения и опытного применения. Его использование применительно к судам под наблюдением РС является предметом специального рассмотрения РС.

ПРИЛОЖЕНИЕ

ПРОЕКТ НОВОЙ РЕДАКЦИИ ГЛАВЫ 2.1 «МОЩНОСТЬ ГЛАВНЫХ МЕХАНИЗМОВ» ПРАВИЛ КЛАССИФИКАЦИИ И ПОСТРОЙКИ МОРСКИХ СУДОВ [17].

2.1 МОЩНОСТЬ ГЛАВНЫХ МЕХАНИЗМОВ

2.1.1 Минимально требуемая мощность $P_{\min}$ на гребных валах ледоколов должна соответствовать их категории согласно 2.2.3 части I «Классификации».

2.1.2 Минимально требуемая мощность на гребных валах транспортных судов ледового плавания категорий Ice2, Ice3, Arc4 – Arc9.

2.1.2.1 Минимально требуемая мощность $P_{\min}$ на гребных валах транспортных судов ледового плавания **Ice2, Ice3, Arc4 – Arc9** должна обеспечивать тягу движителя, не меньшую, чем расчетное ледовое сопротивление судна R_{ice} .

Базовые эксплуатационные режимы и их характеристики для определения расчетного ледового сопротивления R_{ice} представлены в табл. 2.1.2.1.

Расчетное ледовое сопротивление определяется как наибольшее для эксплуатационных режимов 1– 2, представленных в табл. 2.1.2.1.

Расчетное ледовое сопротивление определяется для традиционных режимов движения судна носом вперед. Для ледокольных судов двойного действия и судов арктических категорий **Arc8** и **Arc9** определение расчетного ледового сопротивления R_{ice} и минимально требуемой мощности $P_{\min}$ на гребных валах является в каждом случае предметом специального рассмотрения Регистром.

Таблица 2.1.2.1

**Базовые эксплуатационные режимы и их характеристики
для расчета тяги движительного комплекса и пропульсивной мощности**

Ледовые категории	Эксплуатационные режимы судна	
	1	2
	Самостоятельное плавание со скоростью движения 2 уз.	Плавание под проводкой ледокола в свежем канале со скоростью движения 5 уз.
	Ровный лед. Толщина льда h_{ice} , м	Свежий канал. Толщина обломков льда в канале $h_{channel}$, м
Ice2	0,25	0,5
Ice3	0,35	0,7
Arc4	0,5	1
Arc5	0,7	1,5
Arc6	1,0	2
Arc7	1,3	2,8

Расчетное ледовое сопротивление для эксплуатационных режимов 1 – 2 должно определяться на основе хорошо зарекомендованных методов, которые апробированы модельными и натурными испытаниями. Для определения ледового сопротивления рекомендуется выполнение модельных испытаний в ледовом опытовом бассейне, программа и методика которых должна быть согласована с Регистром. Для судов, ширина которых превосходит ширину проводящего ледокола, завышение мощности, обусловленное доламыванием кромок канала бортами, может быть компенсировано за счет проводки судна двумя ледоколами, прокладывающими канал большей, чем судно, ширины. Способы проводки, учитывая тип ледокола (ледоколов), должны быть согласованы судовладельцем с морской администрацией и представлены в Регистр. Назначение ледового сопротивления в канале может быть сведено к определению ледового сопротивления в ровном льду в соответствии с требованием 2.1.2.2.

Для судов арктических категорий **Arc4 – Arc9** и ледоколов установка направляющей насадки для увеличения тяги движителя является предметом специального рассмотрения Регистром. Возможность установки направляющей насадки должна быть рассмотрена с учетом ее блокирования обломками льда и влияния этого эффекта на тягу движителя при эксплуатации в характерных ледовых условиях. Оцен-

ка частоты блокирования насадки льдом и степень снижения тяги движителя в ледовых условиях может быть выполнена по результатам модельных испытаний в ледовом опытовом бассейне по согласованной с Регистром программе и методике.

2.1.2.2 Расчетное сопротивление льда движению судна в свежем канале за ледоколом.

Расчетное сопротивление льда движению судна в свежем канале за ледоколом при скорости $V_s = 5$ уз. (см. режим 2 в табл. 2.1.2.1) определяется для эквивалентной толщины ровного льда h_{ice}^{eq} . Эквивалентная толщина ровного льда h_{ice}^{eq} определяется по формуле:

$$h_{ice}^{eq} = k_{channel} \cdot \left(\frac{V_0 - 2}{V_0 - 5} \right) \cdot h_{channel} \quad (2.1.2.2.1)$$

где $h_{channel}$ – толщина льда в канале, определяемая в соответствии с табл. 2.1.2.1;

V_0 – скорость судна на чистой воде при P_{min} , уз.;

$k_{channel}$ – коэффициент, зависящий от соотношения ширины судна и ширины ледокола, прокладывающего канал (ширины канала).

Коэффициент $k_{channel}$ определяется по формуле:

$$k_{channel} = \begin{cases} 0,12 + 0,28 \cdot b^{2,29} & b < 1,0 \\ 0,39 + 0,52 \cdot (b - 1) & 1 \leq b < 1,4, \\ 1 - 0,56 / b & b \geq 1,4 \end{cases} \quad (2.1.2.2.2)$$

где $b = B_{ship} / B_{icebr}$ – относительная ширина канала (отношение ширины судна B_{ship} к ширине проводящего ледокола B_{icebr}).

2.1.2.3 При эксплуатации в ледовых условиях Балтийского моря минимально требуемая мощность судов категорий **Ice2**, **Ice3**, **Arc4**, **Arc5** должна соответствовать требованиям ФМА (Бюллетени 13/1.10.2002 и 18/30.12.2005).

Для назначения ледовой мощности следует использовать эквивалентность категорий судов ледового плавания, представленную в табл. 2.1.2.3

2.1.3 Для буксиров назначение минимально требуемой мощности P_{min} на гребных валах для обеспечения тяги движителя является предметом специального рассмотрения Регистром и осуществляется с учетом эксплуатации в ледовых условиях.

2.1.4 – 2.1.13 – см. действующие требования РС, гл. 2.1 части VII «Механические установки».

Таблица 2.1.2.3

**Эквивалентность ледовых категорий для назначения мощности
в соответствии с требованиями Финской морской администрации
и Российского морского регистра судоходства**

Финская морская администрация	Российский морской регистр судоходства
IC	Ice2 (ЛУ2, ЛЗ)
IB	Ice3 (ЛУ3, Л2)
IA	Arc4 (ЛУ4, Л1)
IA Super	Arc5 (ЛУ5, УЛ)

2.1.14 Для судов ледового плавания и ледоколов главный двигатель должен поддерживать минимально требуемую мощность $P_{\min}$ на гребных валах (см. 2.1.2.1, 2.1.1) для всех эксплуатационных режимов, от швартовного до полного хода.

2.1.15 Для судов арктических категорий **Arc4 – Arc9** и ледоколов при взаимодействии гребного винта со льдом мощность на гребных валах должна поддерживаться постоянной и соответствовать $P_{\min}$ (см. 2.1.2.1).

2.1.16 Для судов арктических категорий **Arc4 – Arc9** и ледоколов мощность и момент сопротивления льду главного двигателя должны быть достаточными для предотвращения остановки гребного винта и поломки его лопастей при снижении скорости вращения в процессе взаимодействия со льдом. Обоснование необходимого запаса мощности и момента сопротивления главного двигателя являются в каждом случае предметом специального рассмотрения Регистром.

2.1.17 Для судов арктических категорий **Arc 6 – Arc 9** и ледоколов тяга движителя на заднем ходу на швартовном режиме не должна быть менее чем 70 % от соответствующей на переднем ходу.

Список литературы

1. Finnish-Swedish Ice Class Rules, 1985.
2. Анализ требований к мощности главных механизмов (пропульсивной установки) судов ледового плавания категорий ЛУ4(Л1)–ЛУ5(УЛ) и их эквивалентов в соответствии с требованиями зарубежных классификационных обществ и морских администраций: технический отчет. – СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2001.
3. Андрушин А.В., Голубев В.С. Анализ требований классификационных обществ и морских администраций к мощности главных механизмов судов ледового плавания // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – Вып. 25. – СПб., 2002. – С. 101 – 120.

4. Finnish Maritime Administration Regulations on the Structural Design and Engine Output Required of Ships for Navigation in Ice. Bulletin № 13/1.10.2002. Finnish-Swedish Ice Class Rules. – Finnish Maritime Administration, adopted in Helsinki on 20 September 2002.
5. Guidelines for the Application of the Finnish-Swedish Ice Class Rules. – Finnish Maritime Administration, version 1, 20 December 2005.
6. Хельсинская Комиссия. Балтийская комиссия по защите окружающей среды. Рекомендация ХЕЛКОМ 25/7. Руководство по безопасности зимнего судоходства в районе Балтийского моря. Принята 2 марта 2004.
7. Guidelines for Ships Operating in Arctic Ice-Covered Waters – International Maritime Organization, MSC/Circ.1056, MEPS/Circ.399, 32 December 2002.
8. Номенклатура морских льдов Всемирной метеорологической организации.
9. Сергеев Г.Н., Хромов Ю.Н. Торосистость и сопротивляемость льда движущемуся судну // Метеорология и гидрология. – Л.: Гидрометеоиздат, 1980. – № 10.
10. Цой Л.Г. Диаграмма для определения скоростей движения судов в ледовых каналах // Труды ЦНИИМФ / Проектирование судов и их мореходные качества. – Л.: Транспорт, 1982. – Вып. 275.
11. Tsou L. Modeling of Vessels Movement in a Channel Broken up by Icebreaker – Conference POAC 83, Proceedings, vol. 2, Espoo, 1983.
12. Цой Л.Г. Формула для определения ледопроеходимости и рекомендации по выбору формы обводов корпуса ледоколов и транспортных судов ледового плавания // Перспективные типы морских транспортных судов, их мореходные и ледовые качества. – Л.: Транспорт, 1990.
13. Разработка требований к мощности на гребных валах судов ледового плавания категорий ЛУ2-ЛУ9 взамен действующих требований (Часть VII). Часть 2. Разработка концепции требований к мощности главных механизмов судов ледового плавания категорий ЛУ2-ЛУ9. – Отчет по 2 этапу договора № РС-35/2002, ГНЦ Российской Федерации Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт. – СПб., 2003.
14. Андрюшин А.В. Теория взаимодействия гребного винта со льдом. Обеспечение эксплуатационной прочности элементов пропульсивного комплекса судов ледового плавания и ледоколов: диссертация на соискание д.т.н. – СПб.: СБМГТУ, 2007.
15. K. Riska, M. Wilhemson, K. Englund, T. Levski Performance of Merchant Vessels in Ice in the Baltic, Winter Navigation Research Board, Research Report 52, 1997.
16. Assur A. Problems in Ice Engineering. Third-Int. Symp. on Ice Problems. Hangover, New Hamp Shire, USA, 1975.
17. Сборник нормативно-методических материалов. Вып. 19. – СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2009.

ОПТИМИЗАЦИОННЫЕ ПРОЦЕДУРЫ ПРИ ЦЕНТРОВКЕ СУДОВЫХ ВАЛОПРОВОДОВ

Термин «центровка валопровода» не имеет стандартной трактовки. Он употребляется в различных ситуациях и его физический смысл от этого варьируется в широком диапазоне мнений. Некоторые считают этот термин синонимом термина «монтаж валопровода». Другие полагают, что центровка представляет собой конструктивное мероприятие, которое выполняется на стадии проектирования судна и заключается в определении количества опор валопровода и в их размещении вдоль оси, а также в вертикальном направлении. Третьи уверены в том, что центровка есть не что иное, как технологическое мероприятие по совмещению осей валов, входящих в состав судового валопровода. В англоязычной литературе используется термин *«alignment of a shaft line»*, что означает «выравнивание линии вала», при этом могут полагать, что ось валопровода должна быть прямолинейной. Все по-своему правы и не правы одновременно.

В современном представлении [1, 2, 3 и др.] центровка валопровода есть сложный комплекс научных, конструктивных, технологических и производственных мероприятий, выполняемых разными предприятиями на разных стадиях проектирования, строительства, эксплуатации судна, в том числе и при ремонте. Все они должны быть объединены единым замыслом, общим сценарием, что на практике встречается крайне редко.

Центровка валопровода всегда начинается на стадии эскизного проектирования судна. В этот момент определяется расположение валопровода в пространстве судна (центральное, бортовое, кормовое, носовое), длина валопровода как расстояние от гребного винта до двигателя, состав валопровода по конструктивным, технологическим и экономическим соображениям (количество и назначение валов, система смазки и охлаждения подшипников).

Центровка валопровода продолжается на стадии технического проектирования судна. На этой стадии расчетным путем определя-

ются диаметры гребного и промежуточных валов, размещение и учет маховика, если это необходимо (в составе двигателя или в составе валопровода), а также условия соединения валопровода с двигателем (на стадии изготовления двигателя, при монтаже валопровода на судне или иначе).

Следующая стадия центровки валопровода заключается в выполнении набора действий научного характера. Сюда относятся расчеты длин пролетов между опорами валопровода и, соответственно, количества опор, а также их расположения вдоль оси валопровода и в вертикальном направлении (для дейдвудного подшипника возможно регулирование углового положения относительно теоретической горизонтальной оси валопровода). Устанавливается форма изогнутой оси валопровода (рис. 1).

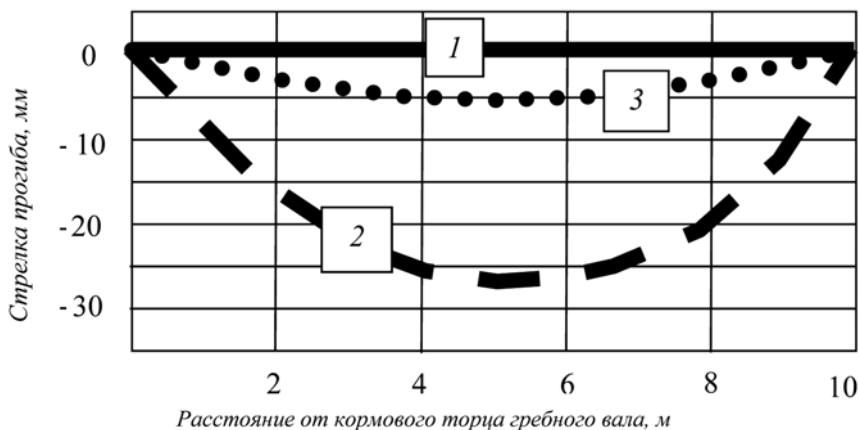


Рис. 1

Форма изогнутой оси валопровода:

- 1 — прямая линия;
- 2 — изгиб под действием собственного веса;
- 3 — оптимальная форма оси

При определении количества опор валопровода принимаются ответственные решения о количестве опор основного компонента — гребного вала (одна, две или более), т. к. они являются нерегулируемыми как в осевом направлении, так и по высоте.

Кроме того, расчетным путем определяются абсолютные нагрузки на каждую опору валопровода, распределение контактных давлений вдоль поверхности трения каждого подшипника гребного вала, изгибающие напряжения на поверхности каждого вала в различных сечениях, а также деформации валов.

Как правило, валопровод представляет собой сложную балку, размещаемую на более чем двух опорах, которая не имеет однозначного решения (статически неопределимая балка). Поэтому процедура расчета превращается в поиск компромиссов или, другими словами, в процедуру оптимизации параметров валопровода. Для выполнения расчетов и процедур оптимизации каждая компания привлекает специалистов высокой квалификации и применяет различные методики расчета, от примитивных до сложных, ориентированных на современные средства вычислительной техники. Известны упрощенные методики на базе классических схем теории сопротивления материалов, методики на базе метода конечных элементов и др.

Предпочтения специалистов, выполняющих расчеты и оптимизацию параметров, обычно не раскрываются. Поэтому корректность результатов, полученных на научной стадии центровки валопровода, иногда вызывает сомнения.

Сама научная часть общей технологии центровки валопровода нередко воспринимается как неоправданно излишний компонент по причине сложности, требований высокой квалификации персонала и высокой стоимости работ. В силу этих причин достаточно часто научную часть не выполняют, ограничиваясь применением типовых решений и технических стереотипов. С точки зрения надежности судна такое решение нельзя считать оправданным.

На научной стадии заканчивается выбор принципиальных технических решений, и центровка валопровода переходит в производственную фазу, которая состоит из двух крупных частей. Первая из них связана с производством валопровода в механическом цехе. На этой стадии выполняется так называемая операция «спаривания» валов, т. е. обеспечивается совпадение осей соседних валов. Операция «спаривания» выполняется машиностроительными методами в благоприятных условиях механического цеха с использованием точного технологического оборудования, режущего и измерительного инструмента, по проверенной технологии.

Вторая часть производственной фазы представляет собой монтаж валопровода на судне. На этой стадии реализуются технические решения, принятые на стадии проектирования судна, в том числе пара-

метры центровки, установленные на научной части проектирования валопровода.

Если сценарий центровки валопровода не разработан на стадии проектирования судна и когда не выполнялась научная часть, то возможны технические решения, которые нельзя назвать оптимальными. В таких случаях нередко переносят операцию «спаривания» валов из механического цеха на судно, а ось валопровода стараются сделать прямолинейной, для чего используют традиционные технологические приемы.

Контроль качества центровки валопровода выполняется на каждой стадии технологического процесса. Единой методики такого контроля не существует. Предполагается, что соблюдение всех технических решений, принятых на стадии проектирования судна и установленных в научной части, осуществляется при монтаже валопровода, и этого достаточно.

В настоящее время контроль качества центровки валопровода выполняется на различных стадиях жизненного цикла судна: при проектировании, строительстве, эксплуатации и ремонте. Процедура контроля качества регламентируется различными документами, в том числе правилами РС и отраслевыми стандартами. То обстоятельство, что проблема центровки валопровода, так или иначе, представлена в нескольких документах, свидетельствует о ее важности, с одной стороны, и неудовлетворенности участников процесса строительства, эксплуатации и ремонта судов, с другой стороны.

Неудовлетворенность эта вызвана тем, что в процессе эксплуатации валопровода достаточно часто наблюдаются нештатные ситуации. Они проявляются в повышенном нагреве подшипников валопровода, в их преждевременном износе, а также в повреждении элементов валопровода, таких как защитные покрытия и соединительные устройства. Часто нагрев того или иного подшипника валопровода совпадает с таким явлением, как его работа верхней половиной в сопряжении с соответствующим валом, что можно квалифицировать как заклинивание валопровода. Все эти нештатные ситуации справедливо связывают с недостаточно высоким качеством центровки валопровода. Типичным примером таких нештатных ситуаций можно считать работу носового дейдвудного подшипника верхней половиной, в частности, на атомных ледоколах типа «АРКТИКА».

Причинами недостаточно высокого качества центровки могут стать ошибки, допущенные при определении параметров валопровода, погрешности первичной центровки при строительстве судна на стадиях

изготовления или монтажа, ошибки центровки при очередном ремонте судна, связанном с демонтажем валопровода, а также остаточные деформации корпуса судна, вызванные его условиями эксплуатации и релаксацией сварочных напряжений в корпусе судна.

На основании вышесказанного представляется, что в отношении центровки валопровода на стадии проектирования судна в идеале должен быть разработан документ-сценарий выполнения всего комплекса работ. Такой сценарий должен быть представлен в проектной документации судна и должен служить руководством к действию для всех предприятий, участвующих в строительстве судна: конструкторского бюро, завода-строителя судна, специализированной научной организации, судовладельца, завода-изготовителя двигателя. Все участники работ по центровке валопровода должны быть знакомы с подобным сценарием и готовы участвовать в его выполнении, и Регистр по мере сил должен этому способствовать. На первых порах это могут быть отдельные фрагменты сценария. В перспективе это также должно найти свое отражение в унифицированных требованиях МАКО.

Список литературы

1. Лысенков П.М. Корректная центровка судовых валопроводов. – СПб.: СПбГПУ, 2008. – 82 с.
2. Лубенко В.Н., Вязовой Ю.А. Монтаж судовых валопроводов. – СПб.: Судостроение. – 2007. – 400 с.
3. Антонов В.М., Лейзерман В.Ю. Оптимизационный метод расчета технологических параметров центровки валопровода // Морской вестник. – 2009. – №4 (32). – С. 53 – 55.

В.Е. Михайлов, В.К. Шурняк

ИЗМЕНЕНИЯ В ТРЕБОВАНИЯХ РОССИЙСКОГО МОРСКОГО РЕГИСТРА СУДОХОДСТВА К ТОНКОСТЕННЫМ БАЛЛОНАМ ИЗ СТАЛЕЙ ВЫСОКОЙ ПРОЧНОСТИ

В производстве баллонов в настоящее время все чаще применяются стали с высокими показателями характеристик прочности, а также специальные технологии, исключающие сварочные операции. В результате баллоны получаются бесшовными, без сварочных швов и участков резкого изменения геометрической формы, следовательно, без значительных концентраторов напряжений. Фирмы-производители баллонов применяют расчетные формулы, отличающиеся от формул, представленных в правилах ИКО и Правилах классификации и постройки морских судов Российского морского регистра судоходства (Правилах РС).

Обратить внимание на это противоречие следует по той причине, что тонкостенные бесшовные баллоны из сталей высокой прочности успешно применяются в технике и надежно работают.

Рассмотрим сравнительные характеристики результатов расчетов тонкостенных баллонов из сталей высокой прочности, выполняемых по различным методикам.

В п. 6.4.4 «Баллоны» части X «Котлы, теплообменные аппараты и сосуды под давлением» Правил РС [1] осуществляется проверка максимально допустимого давления по формуле:

$$p_D \leq \frac{2 \sigma \varphi (S - c)}{D_a - (S - c)}, \quad (1)$$

где σ – допускаемое напряжение, МПа (при этом $n_t = 1,5$; $n_b = 2,6$);

n_b – коэффициент запаса прочности по временному сопротивлению;

n_t – коэффициент запаса прочности по пределу текучести;

φ – коэффициент прочности ($\varphi = 1$ – для бесшовных баллонов);

S – толщина стенки, мм;

D_a – наружный диаметр, мм;

c – прибавка на коррозию ($c = 1$ мм – для воздуха; $c = 0,3$ мм – для сжиженных газов; $c = 0$ – при отсутствии коррозионного воздействия).

Данная формула является формулой проверочного расчета по максимально допустимому давлению. Для сравнительного анализа различных методик необходимо произвести проектный расчет, определяя минимальную толщину стенки. В части X «Котлы, теплообменные аппараты и сосуды под давлением» Правил РС имеется формула, по которой можно определить толщину сосуда (баллона).

Толщина цилиндрических стенок должна быть не менее определяемой по формуле:

$$S = \frac{D_a p}{2 \sigma \varphi + p} + c.$$

Аналогичные формулы присутствуют в правилах ИКО: Регистра Ллойда (Великобритания) (LR) [2], Германского Ллойда (GL) [3], Норвежского Бюро Веритас (DNV) [4].

Не трудно заметить, что эта формула соответствует формуле проверочного расчета и получена путем алгебраического преобразования. Для определения толщины стенки бесшовного баллона из легированной стали высокой прочности следует принять значения коэффициентов $\varphi = 1$ и $c = 0$.

Для выбора коэффициентов запаса прочности и определения допускаемых напряжений необходимо оценить отношение верхнего предела текучести (R_{eH}) к временному сопротивлению (R_m). Если это отношение составляет менее 0,6, в качестве расчетных характеристик принимается нижний предел текучести ($R_{eL/t}$) или условный предел текучести и предел длительной прочности за 100000 ч при расчетных температурах. Для сталей с соотношением более 0,6 принимается временное сопротивление при расчетной температуре (R_m/t). Выбранным характеристикам прочности соответствуют указанные ранее коэффициенты запаса прочности. Для легированных сталей высокой прочности временное сопротивление обычно превышает 850 МПа, а предел текучести составляет более 680 МПа. Отношение предела текучести к временному сопротивлению всегда превышает величину 0,6. Следовательно, баллоны из сталей высокой прочности необходимо рассчитывать по временному сопротивлению с коэффициентом запаса прочности $n_b = 2,6$.

Допускаемые напряжения $\sigma = R_m / n_b$. Если принять диапазон значений временного сопротивления для сталей высокой прочности, применяемых при изготовлении бесшовных стальных баллонов (850 – 1100) МПа, то допускаемые напряжения составят (327 – 423) МПа.

Методика Американского Бюро Судостроительства (ABS) [5] отличается от рассмотренных предыдущих методик, так как в расчете минимальной толщины стенки участвует не рабочее давление в сосуде, а максимально допустимое давление, рассчитанное по специальной формуле. Кроме того, вместо величины допускаемого напряжения, определенной по механическим характеристикам материала (временное сопротивление), применяются значения максимально допустимых рабочих напряжений, которые заданы в специальной таблице по маркам сталей.

Рассмотрим примеры расчета тонкостенных баллонов из сталей высокой прочности для реально существующих и применяемых в технике изделий.

Пример 1. Фирмой F.B.T. «MILMET» S.A. (Хорватия) выпускаются тонкостенные бесшовные баллоны из стали высокой прочности, объемом 67,5 л для хранения углекислого газа под давлением. Испытательное давление $p = 250$ бар. Наружный диаметр $D = 267$ мм. Для его изготовления применяется сталь марки 34CrMo4.

Основные характеристики материала:

минимальный предел текучести $R_e = 850$ МПа;

временное сопротивление $R_m = 940 - 1099$ МПа.

Проект был проверен и утвержден Регистром Ллойда 25 июля 2001 г. под номером PPD/1837.

Минимальная толщина цилиндрической части баллона a рассчитывается по формуле, взятой из стандарта ISO 9809-1 (EN 1964-1:2000):

$$a = D/2 \left(1 - \sqrt{\frac{10 F R_e - \sqrt{3} p}{10 F R_e}} \right), \quad (2)$$

где $F = 0,65 / (R_e / R_m)$, необходимо, чтобы величина $F \leq 0,77$.

Соотношение R_e / R_m должно быть не более 0,9. Следовательно, принимается расчетное значение предела текучести $R_e = 846$ МПа.

Тогда

$$F = 0,65 / (R_e / R_m) = 0,65 / 0,9 = 0,72.$$

При вычислении получается значение $a = 4,83$ мм. Округляя в безопасную сторону, принимаем минимальную толщину цилиндрической стенки $a = 4,9$ мм.

Сферическая верхняя оконечность баллона в месте перехода от цилиндрической части имеет ту же толщину. Сферическая часть, утолщаясь, плавно переходит в горловину. Горловина, имеющая технологическое назначение для крепления запирающей и соединительной арматуры, должна иметь большую прочность. Утолщение сферической стенки в районе горловины производится по соотношению $b = 1,5a$. Толщина баллона в районе горловины $b = 7,4$ мм.

Нижняя сферическая часть баллона выполнена не выпуклой, а вогнутой. Очевидно, что это имеет определенное эксплуатационное назначение, например, удобство установки и крепления баллона. Толщина нижней сферической части баллона определяется по соотношению $a_1 = a_2 = 2a = 9,8$ мм и принимается равной 10 мм.

Пример 2. Аналогичные расчеты тонкостенного баллона из стали высокой прочности представлены для баллонов фирмы «VIT-KOVICE Lahvarna a.s.» (Чешская Республика). Применялась сталь марки 34CrMo4.

Расчетные параметры:

объем баллона – 4 и 15 л;

испытательное давление – 300 бар;

наружный диаметр – 140 мм;

минимальный предел текучести – 790 МПа;

временное сопротивление – 930 МПа.

Минимальная толщина цилиндрической части баллона рассчитывалась по формуле, примененной в предыдущем проекте, и составила 3,1 мм.

Для сравнения применим правила расчета международных классификационных обществ, если бы потребовалось рассчитать минимальные толщины цилиндрических стенок баллонов, приняв значения $\varphi = 1$ и $c = 0$, а так же учитывая, что рабочее давление в баллоне в 1,5 раза меньше испытательного.

Результаты расчетов представим в таблице.

Классификационное общество	Расчетная формула	Минимальная толщина цилиндрической стенки сосуда, мм	
		Пример 1	Пример 2
1	2	3	4
PC	$S = \frac{D_a p}{2 \sigma \varphi + p} + c$	6,0	3,8
LR	$S = \frac{p D / 2}{10 \sigma \varphi - 0,5 p} + c$	6,04	3,82

1	2	3	4
GL	$S = \frac{p D_a}{20 \sigma \varphi + p} + c$	6,0	3,8
DNV	$S = \frac{p D / 2}{10 \sigma \varphi - 0,5 p} + c$	6,04	3,82
ISO 9809-1	$a = D / 2 \left(1 - \sqrt{\frac{10 F R_e - \sqrt{3} p}{10 F R_e}} \right)$	4,83	3,1

Анализ представленных результатов расчетов показывает, что для цилиндрических частей баллонов толщина стенки, определенная в проекте фирмы-изготовителя, была бы недопустима согласно требованиям для сосудов под давлением правил классификационных обществ. Требовалось бы значительное увеличение толщины: в первом примере в 1,24 раза, во втором – в 1,227 раза.

Вид формул, которыми пользуются для расчета баллонов классификационные общества настолько отличается от формул, приведенных в стандарте ISO 9809-1 (EN 1964-1:2000), что их непосредственное сравнение без алгебраических преобразований невозможно. Для того, что бы провести такое сравнение приведем к единому виду формулу (1) из Правил РС и формулу (2) из ISO 9809-1.

В формуле (1) примем $\varphi = 1$ и $c = 0$;

учтем, что $(D_a - S)/2$ равно среднему радиусу R_{cp} ;

учтем, что допускаемые напряжения σ для сталей высокой прочности будут равны пределу прочности R_m , разделенному на 2,6, после чего она примет вид:

$$P^{RS} = (R_m / 2,6) \cdot (S / R_{cp}). \quad (3)$$

В формуле (2) для удобства обозначим толщину стенки так же, как в формуле (1) – S вместо a ;

подставим $F = 0,65 / (R_e / R_m)$;

учтем, что $D/2$ равно радиусу R ;

учтем, что в формуле используется испытательное давление, которое в 1,5 раза превышает допускаемое рабочее. После преобразований, которые здесь опускаем, формула (2) примет вид:

$$P^{RS} = (R_m / 4) \cdot (S / R) \cdot (2 - S / R). \quad (4)$$

Для сравнения разделим выражение (3) на выражение (4), учитывая, что $R_{\text{ср}}/R = 1 - S/D$. В результате получаем выражение:

$$P^{ISO}/P^{RS} = 1,3 \cdot (1 - S/D)^2, \quad (5)$$

где P^{ISO} – допускаемое давление по стандарту ISO 9809-1;

P^{RS} – допускаемое давление по Правилам РС [1].

Полученная формула (5), график которой приводится на рис. 1, представляет собой зависимость отношения допускаемых давлений по двум стандартам от соотношения геометрических размеров баллона (отношение толщины стенки к диаметру).

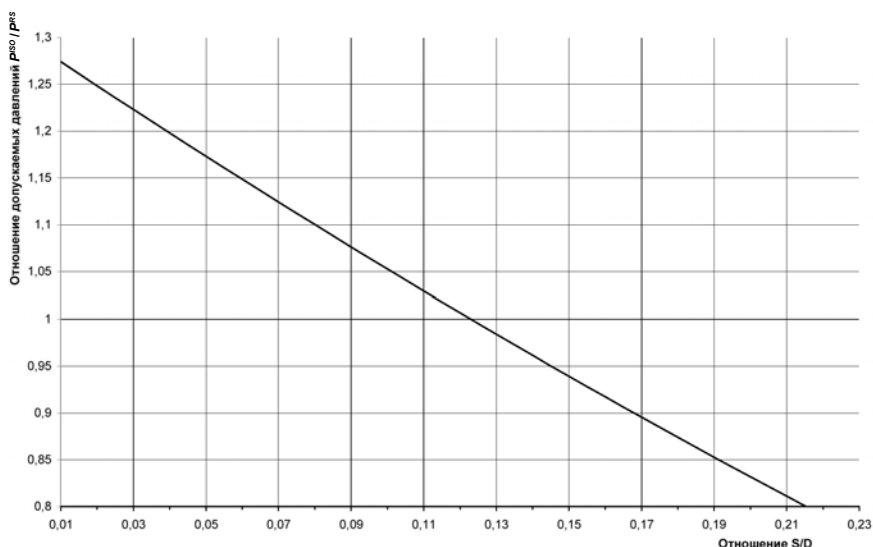


Рис. 1
Отношение допускаемого давления по стандарту ISO 9809-1
к допускаемому давлению по Правилам РС P^{ISO}/P^{RS}
в зависимости от отношения толщины стенки и диаметра баллона S/D

В результате анализа графика можно сделать вывод, что в диапазоне $S/D = 0,02 \div 0,1$, характерном для тонкостенных баллонов

допускаемое давление, рассчитанное по стандарту ISO 9809-1, будет в $1,05 \div 1,25$ раза выше, чем допускается Правилами РС.

Для того, что бы оценить, насколько это критично, проведем расчеты двух приводимых выше примеров баллонов как длинную цилиндрическую оболочку, нагруженную внутренним давлением, используя известные формулы [6], [7].

Для решения этой задачи возможны несколько путей.

Верхний и нижний края цилиндрической оболочки сопрягаются со сферическими оболочками (выпуклой и вогнутой). Для расчета всего баллона требуется составление уравнений совместности деформаций, решение системы уравнений, а затем можно рассчитать напряжения во всех элементах баллона. Задачу можно упростить, если сферические элементы заменить на плоские крышки, которые имеют другую форму, но выполняют ту же функцию, что и сферические части баллонов. Реальный краевой эффект на границе элементов занимает промежуточное положение между двумя предельными случаями закрепления краев цилиндрической оболочки.

Первый случай. Край цилиндрической оболочки жестко заземлен.

Для этой задачи известно точное решение, по которому можно рассчитать значения меридиональных (направленных вдоль образующей цилиндра) и тангенциальных (круговых или кольцевых) напряжений.

В расчетных формулах используется безразмерная величина:

$$\beta = \frac{\sqrt[4]{3(1-\nu^2)}}{\sqrt{Rh}} (L - x),$$

где R – радиус срединной поверхности оболочки;

h – толщина оболочки;

L – длина оболочки;

ν – коэффициент Пуассона;

x – расстояние от выбранного начала отсчета (края оболочки).

Составляющие меридиональных (σ_x) и тангенциальных (σ_t) напряжений определяются по формулам:

$$\sigma_{x(u)} = \left[-\frac{3(2-\nu)}{2\sqrt{3(1-\nu^2)}} (\cos \beta - \sin \beta) e^{-\beta} \right] \frac{pR}{h};$$

$$\sigma_{t(u)} = u \sigma_{x(u)};$$

$$\sigma_{t(p)} = \left[1 - \frac{2 - \nu}{2} (\cos \beta + \sin \beta) e^{-\beta} \right] \frac{pR}{h};$$

$$\sigma_{x(p)} = pR/2h.$$

Суммарные меридиональные напряжения на внешней поверхности цилиндрической оболочки находятся по формуле:

$$\sigma_{x(e)} = \sigma_{x(p)} + \sigma_{x(u)}.$$

Суммарные меридиональные напряжения на внутренней поверхности цилиндрической оболочки находятся по формуле:

$$\sigma_{x(i)} = \sigma_{x(p)} - \sigma_{x(u)}.$$

Суммарные тангенциальные напряжения на внешней поверхности цилиндрической оболочки находятся по формуле:

$$\sigma_{t(e)} = \sigma_{t(p)} + \sigma_{t(u)}.$$

Суммарные тангенциальные напряжения на внутренней поверхности цилиндрической оболочки находятся по формуле:

$$\sigma_{t(i)} = \sigma_{t(p)} - \sigma_{t(u)}.$$

Результаты расчета напряжений покажем на графиках (рис. 2, 3) относительно безразмерной величины β при следующих обозначениях:

$\sigma_{x(e)}$ – линия 1; $\sigma_{x(i)}$ – линия 2; $\sigma_{t(e)}$ – линия 3; $\sigma_{t(i)}$ – линия 4.

Этот вариант крепления крышки в части краевого эффекта является утрированно «жестким» и даже мало соответствующим реальным условиям плавного перехода цилиндрической части баллонов в сферическую, но для анализа напряженного состояния он представляет интерес.

Из графиков видно, что краевой эффект затухает и напряжения стабилизируются при значении $\beta \geq 3,0$. Расчеты показывают, что даже для сравнительно коротких баллонов ($L = 450$ мм) влияние краевого эффекта затухает на расстоянии (от места крепления крышки) около

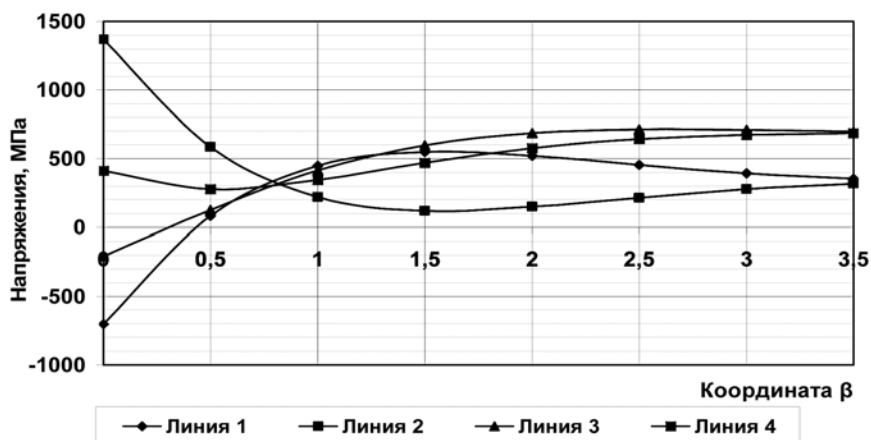


Рис. 2
Напряжения цилиндрической оболочки (пример 1, жесткое защемление)

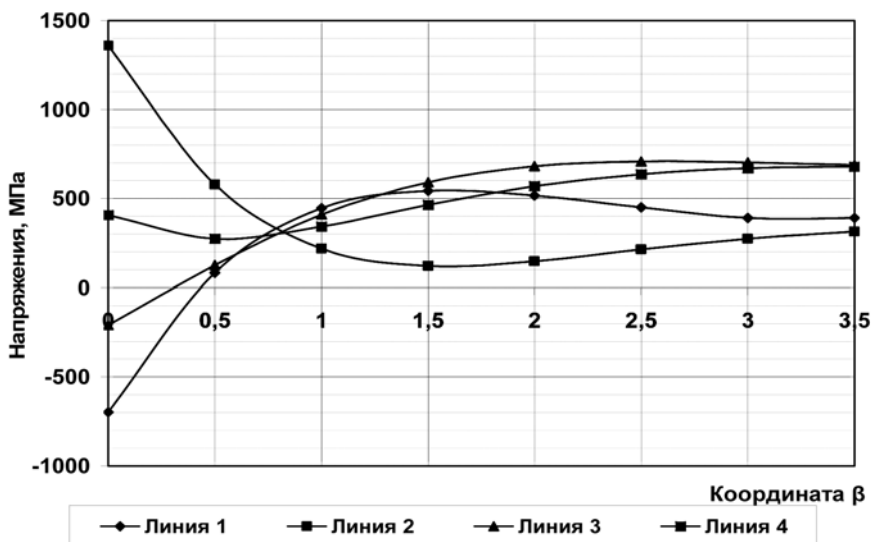


Рис. 3
Напряжения цилиндрической оболочки (пример 2, жесткое защемление)

10 % длины цилиндрической части баллона. Для длинных баллонов ($L = 1335$ мм) – не более 4 %.

Рассматривая зону стабилизации напряжений, отметим, что наибольшими напряжениями будут тангенциальные растягивающие, примерно в два раза превышающие меридиональные. Это соответствует опыту и здравому смыслу, так как наиболее вероятный способ разрушения цилиндрической оболочки под действием внутреннего давления – это образование трещины вдоль образующей цилиндра. Значения максимальных напряжений в зоне стабилизации достигают 713 МПа (пример 1) и 708 МПа (пример 2).

Второй случай. Край цилиндрической оболочки имеет шарнирное опирание.

Составляющие меридиональных (σ_x) и тангенциальных (σ_t) напряжений определяются по формулам:

$$\sigma_{x(u)} = \left[-\frac{3(2-\nu)}{2\sqrt{3}(1-\nu^2)} (\sin \beta) e^{-\beta} \right] \frac{pR}{h};$$

$$\sigma_{t(u)} = \nu \sigma_{x(u)};$$

$$\sigma_{t(p)} = \left[1 - \frac{2-\nu}{2} (\cos \beta) e^{-\beta} \right] \frac{pR}{h};$$

$$\sigma_{x(p)} = pR/2h.$$

Суммарные напряжения находятся по тем же формулам, что и в предыдущем случае.

Результаты расчета покажем на графиках для обозначений, аналогичных предыдущему случаю.

Этот вариант присоединения верхней части баллона (крышки) является сравнительно «мягким» с точки зрения краевого эффекта. Однако «мягкость» краевого эффекта приводит к небольшому увеличению напряжений в зоне стабилизации напряжений цилиндрической оболочки. Тангенциальные напряжения достигают 738 МПа (пример 1) и 733 МПа (пример 2).

Таким образом, независимо от реальных граничных условий в зоне перехода цилиндрической части баллона в сферическую, влияние краевого эффекта быстро затухает и напряжения стабилизируются. Более точное решение получается решением уравнений совмест-

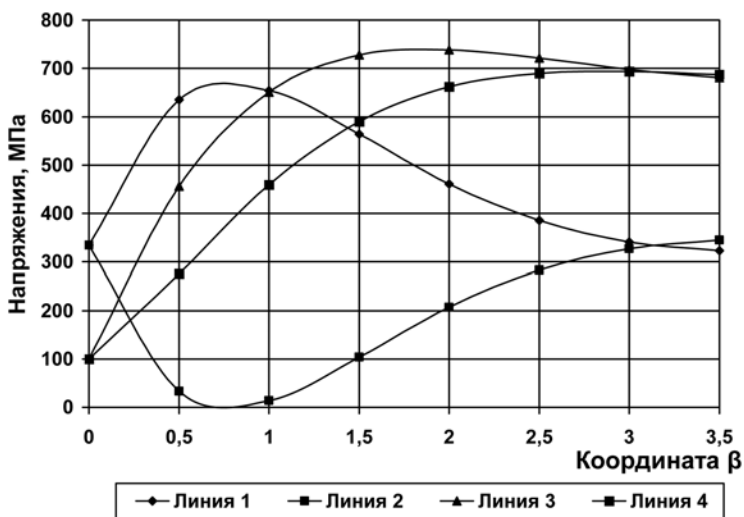


Рис. 4
Напряжения цилиндрической оболочки (пример 1, шарнирное опирание)

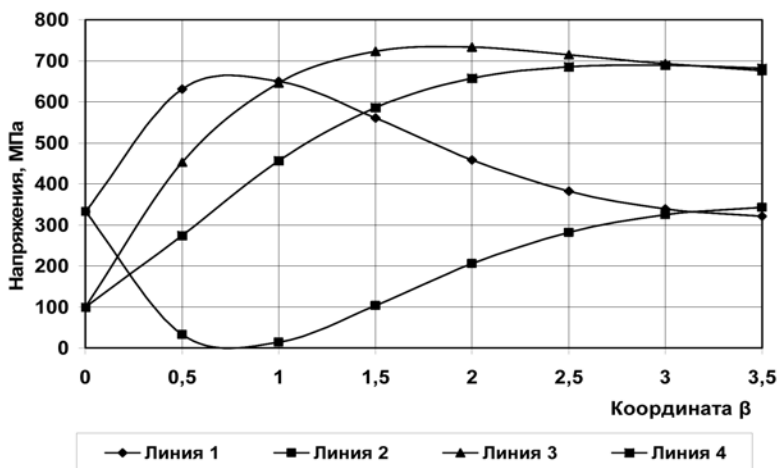


Рис. 5
Напряжения цилиндрической оболочки (пример 2, шарнирное опирание)

ности деформаций, но можно утверждать, что в зоне стабилизации эти напряжения будут близки к напряжениям, рассчитанным выше.

Внесение изменений в Правила РС возможно либо путем применения дополнительных расчетных формул, либо использования прежних формул с соответствующей корректировкой правил определения допускаемых напряжений и коэффициентов.

Расчет толщины стенок по методу оболочек позволяет оценить значение коэффициента запаса прочности для реально существующих баллонов (примеры 1 и 2). Максимальные расчетные напряжения в примере 1 составили 738 МПа. Учитывая некоторые неточности расчета, можно предположить, что эта величина имеет даже несколько завышенное значение. Все расчеты производились для испытательных давлений, которые в полтора раза превышают эксплуатационные.

Для сталей 34CrMo4 минимальное значение временного сопротивления по одним данным составляет 940 МПа, по другим – 930 МПа. Принимая меньшее значение временного сопротивления, по отношению к максимальным расчетным напряжениям, коэффициент запаса прочности для испытательных давлений составит 1,26. В теории оболочек между давлением и напряжениями существует прямая пропорциональная зависимость, поэтому коэффициент запаса прочности для рабочих эксплуатационных давлений принимает значение 1,89.

В Правилах РС для определения допускаемых напряжений по временному сопротивлению применялся коэффициент запаса прочности, равный 2,6.

Применяя формулу РС, можно рассчитать значение коэффициента запаса прочности, необходимого для достижения толщин реальных баллонов в рассмотренных примерах. Для испытательных давлений получено значение 1,40. При рабочих эксплуатационных давлениях коэффициент запаса прочности равен 2,1.

Выводы

1. На основании проведенных расчетных исследований предлагается внести некоторые изменения в п. 6.4.4 части X «Котлы, теплообменные аппараты и сосуды под давлением» Правил РС. В частности, предлагается допустить для тонкостенных баллонов из стали высокой прочности применение коэффициентов запаса прочности меньших, чем для обычных котлов и сосудов под давлением. При этом должны выполняться специальные требования к геометрии баллона во избежание излишних концентраторов напряжений, обусловленных

жестким закреплением доньшка баллона с его цилиндрической частью. Под сталью высокой прочности в данном случае подразумевается сталь с пределом текучести не менее 750 МПа и соотношением предела текучести к временному сопротивлению не менее 0,8.

2. Увеличение допускаемых напряжений в материале баллонов возможно только при учете особенности геометрии доньшек и краевого эффекта, создаваемого ими в цилиндрической части баллона. При этом можно рассматривать два основных вида доньшек, применяемых в баллонах (выпуклое сферическое и вогнутое), как два случая закрепления края цилиндрической оболочки, рассмотренные нами в расчетах.

2.1 При выпуклом сферическом доньшке края цилиндрической оболочки можно считать шарнирно опертыми, и в месте перехода от цилиндрической части баллона они должны иметь толщину, равную толщине стенки цилиндрической части, так как по результатам расчета увеличения напряжений от краевого эффекта практически не происходит (рис. 4, 5). Утолщение стенки требуется только для компенсации отверстия в горловине. В районе горловины бесшовного баллона должно быть предусмотрено утолщение сферической стенки доньшка по сравнению с цилиндрической не менее чем в 1,5 раза. При этом сферическая часть, утолщаясь, должна плавно переходить в горловину баллона.

2.2 Минимальная толщина вогнутого доньшка бесшовного баллона должна не менее чем в 2 раза превышать толщину цилиндрической части баллона. Это обусловлено тем, что при вогнутом доньшке края цилиндрической оболочки можно считать жестко закрепленными и по результатам расчета увеличение напряжений от краевого эффекта происходит приблизительно в 2 раза (рис. 2, 3). Толщина нижней части цилиндрической стенки баллона должна иметь плавное утолщение до величины 1,7 толщины стенки баллона в его цилиндрической части.

3. Выводы, сделанные на основе расчета, совпадают с требованиями стандарта ISO 9809-1 к геометрическим размерам доньшек баллонов.

Список литературы

1. Правила классификации и постройки морских судов. – СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2008. – Т. 2. – 505 с.
2. Bureau Veritas. Rules for Classification of Steel Ships. Part A, 2003, 228 p.
3. German Lloyd. Rules for Classification and Construction, I-PO, 2004, 82 p.

4. Det Norske Veritas. Rules for Classification of Ships. Ships in Operational. Periodical Survey Requirements. 2005, P. 7, Ch. 2, 58 p.
5. American Bureau of Shipping. Rules for Survey after Construction, Steel Vessels, 2005, 486 p.
6. Биргер И.А. Круглые пластинки и оболочки вращения. – М.: Оборонгиз, 1965.
7. Прочность, устойчивость, колебания // Справочник в трех томах / Под ред. И.А.Биргера и Я.Г.Пановко. – 1968. – Т. I. – 831 с.

В.А. Шишкин, А.А. Русецкий, М.Ю. Иванов

АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ И ПЕРСПЕКТИВ РАЗВИТИЯ СРЕДСТВ АКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ СУДАМИ С ПОЗИЦИЙ КОРРЕКТИРОВКИ ТРЕБОВАНИЙ РОССИЙСКОГО МОРСКОГО РЕГИСТРА СУДОХОДСТВА

Введение

В связи с расширением границ применения средств активного управления судами и перспективами их дальнейшего совершенствования возникает необходимость отражения этих тенденций в соответствующих разделах Правил классификации и постройки морских судов (Правила РС). В статье на основе сравнительного анализа конструктивных решений САУС различного назначения, опыта их проектирования и эксплуатации, а также требований к ним ведущих классификационных обществ (КО) предлагаются направления и конкретные решения по совершенствованию разд. 7 «Средства активного управления судами» части VII «Механические установки» Правил классификации и постройки морских судов (разд. 7 части VII Правил РС). В данной статье не рассматриваются специфические вопросы, связанные с системами динамического позиционирования, поскольку материал посвящен в основном применению САУС в составе пропульсивных комплексов. Эти вопросы в дальнейшем могут быть рассмотрены особо при работе над развитием требований к САУС.

Современные суда транспортного флота и технические средства освоения морских ресурсов широко оснащаются новыми типами двигателей, которые, наряду с созданием тяги на прямолинейном переднем и заднем ходах, позволяют обеспечить движение по заданным криволинейным траекториям и поступательное движение в поперечном направлении. Отличительной особенностью этих средств управления является их высокая эффективность при малых скоростях движения судна, а также возможность его удержания в заданной точке при наличии течения, ветровых и волновых возмущений. Обеспечение так называемого позиционирования предъявляет жесткие требования не

только к величине упора и тяги, но и к управлению направлением их действия. Это обстоятельство обуславливает терминологические изменения, а именно замену термина «двигатель» на термин «средство активного управления судами» (САУС), составной частью которого является двигатель. За рубежом САУС часто называют азимутальными двигателями.

Конструктивные схемы САУС многообразны. Наиболее широкое распространение получили винторулевые колонки, которые могут быть как главными двигателями судна (ГВРК), так и вспомогательными средствами обеспечения движения при неработающих главных двигателях. В зависимости от функции колонки выполняются как стационарными, с поворотом только относительно вертикальной оси, так и убирающимися путем заваливания за счет поворота относительно горизонтальной оси, а также путем вертикального перемещения.

К САУС примыкают и активные рули (АР), создание управляющей силы которых обеспечивается не только за счет непосредственного использования упора собственного гребного винта, но и несущих свойств крыльевых систем.

Менее широкое распространение получили крыльчатые двигатели, вследствие их сложности и относительной дороговизны.

Особое место занимают так называемые подруливающие устройства (ПУ), которые не создают сил, направленных вдоль диаметральной плоскости судна, а только силы, поперечные по отношению к этой плоскости.

В последнее десятилетие, прежде всего на скоростных судах, широкое распространение получили водометные двигатели. Обязательное включение в состав таких двигателей реверсивно-рулевых устройств дает основание относить их также к категории САУС.

Установка на судах САУС позволяет при выполнении ряда операций, особенно в ограниченных фарватерах, отказаться от услуг буксиров и тем самым существенно улучшить технико-экономические показатели судов.

Возможность существенного повышения безопасности плавания за счет применения САУС, особенно в условиях напряженного судоходства, требует ужесточения требований к их надежности. Это может быть обеспечено не только путем улучшения конструкции отдельных элементов и дублирования наиболее ответственных узлов, но и в результате создания эффективных систем управления их работой и взаимодействием, а также применения аппаратных комплексов контроля.

В то же время прямой перенос требований и опыта эксплуатации традиционных пропульсивных и управляющих комплексов на САУС невозможен, несмотря на наличие ряда сходных элементов, входящих в эти системы.

Применение САУС в ледовых условиях и на специализированных судах ледового плавания выдвигает дополнительные требования, которые практически не отражены в действующих документах.

В настоящее время суда всех типов и назначений могут оснащаться САУС.

В качестве движительной установки ГВРК отличаются высокими пропульсивными качествами и пониженной виброактивностью, расширением возможностей компоновочных решений, связанных с размещением главной энергетической установки и отказом от длинного гребного вала, а также позволяющих обеспечить освобождение дополнительных помещений для размещения грузов и общесудовых нужд.

В качестве средства управления ГВРК обеспечивает повышение уровня безопасности судоходства за счет ускорения реверса и сокращения выбега, а также возможность применения неререверсивных двигателей.

В настоящее время нашли применение два основных типа ГВРК, а именно:

электроприводной движительно-рулевой комплекс с электродвигателем в качестве главного привода, расположенным в гондоле, установленной в нижней части поворотной винторулевой колонки (Azimuthing Electric Propulsion Drive) (типа «Azipod»);

движительно-рулевой комплекс с механической передачей, основу которой составляет система передачи мощности, сформированная из конических зубчатых колес, установленных в вертикальной поворотной стойке и гондоле (Z-образная передача) (Azimuth Thruster) (типа «Aquamaster»).

Если ГВРК типа «Azipod» всегда являются основным двигателем судна и относятся к главным средствам управления, колонки типа «Aquamaster» могут быть вспомогательным двигателем и средством управления. В качестве основного средства движения и управления колонки типа «Aquamaster» применяют на судах, к маневренным качествам которых предъявляются высокие требования при относительно небольшой скорости хода, например, на плавучих кранах, паромках, портовых буксирах и рыбопромысловых судах.

Еще одним САУС, сочетающим свойства основного движителя и средства управления, являются крыльчатые движители. Эти движители

ли представляют собой вращающийся вокруг вертикальной оси ротор, установленный заподлицо с днищем. По окружности ротора располагаются лопасти, выполненные в виде крыльев малого удлинения, которые, вращаясь вместе с ротором, могут изменять свое положение относительно собственных вертикальных осей. В расположенном над ротором барабане располагается механизм, дающий возможность управлять законом этого изменения. Этот закон позволяет регулировать упор движителя по величине при постоянных оборотах и поворачивать направление упора на 360° . Основным зарубежным поставщиком крыльчатых движителей является фирма «Voith». Установка крыльчатых движителей позволяет отказаться от рулевого устройства и применять на судне нереверсивные двигатели, а также практически не увеличивает осадку судна. Недостатком крыльчатых движителей является большой вес и ограниченная мощность, которая не превышает 2500 кВт.

К категории САУС могут быть отнесены также водометные движители в тех случаях, когда они снабжены реверсивно-рулевым устройством (РРУ), позволяющим изменять направление струи, выбрасываемой из сопла движителя. При изменении этого направления в диапазоне $\pm 90^\circ$ РРУ выполняют функции руля, а при повороте на $90^\circ - 180^\circ$ обеспечивают реверс. Как и другие САУС они позволяют применять нереверсивные движители, а также отказаться от традиционного рулевого устройства.

В отличие от других САУС при проектировании водометного движителя его элементы выбираются исключительно из условия обеспечения переднего хода, а все функции изменения направления тяги сосредоточены в РРУ. Основным требованием к нему, кроме выполнения управляющих функций, является отсутствие неблагоприятного влияния на величину тяги на переднем ходу.

Особое место занимают САУС, не выполняющие функции главного движителя и способные либо обеспечивать движение с малыми скоростями, либо создавать только поперечные силы и тем самым являющиеся исключительно органами управления.

В качестве таких САУС могут использоваться колонки, играющие вспомогательную роль для обеспечения прямолинейного движения и определяющие направление движения вне зависимости от работы главных движителей, а также являющиеся частью системы позиционирования.

Вспомогательным САУС являются и АР, конструкция которых имеет много общего с колонками. Среди вспомогательных САУС особое место занимают ПУ, которые могут иметь в своем составе колонку, но,

как правило, не поворачивающуюся относительно вертикальной оси и расположенную в поперечном канале.

Остановимся на особенностях перечисленных САУС подробнее.

1. Краткий анализ конструктивных решений САУС ГВРК с электродвигателем в гондole (система типа «Azipod»)

Проектировщиками подобных ГВРК являются крупнейшие зарубежные фирмы: «ABB Marine» (бывшая «ABB Strömberg Drives»); «Rolls-Royce OY Ab», в которую вошли «Aquamaster», «KAMEVA», «Sohn Lips», «Schottel Steer», «Prop». В рекламной документации подобные ГВРК носят название «Azipod».

Типовая конструкция ГВРК типа «Azipod» с одним гребным винтом представлена на рис. 1. Колонка, способная разворачиваться на 360°,

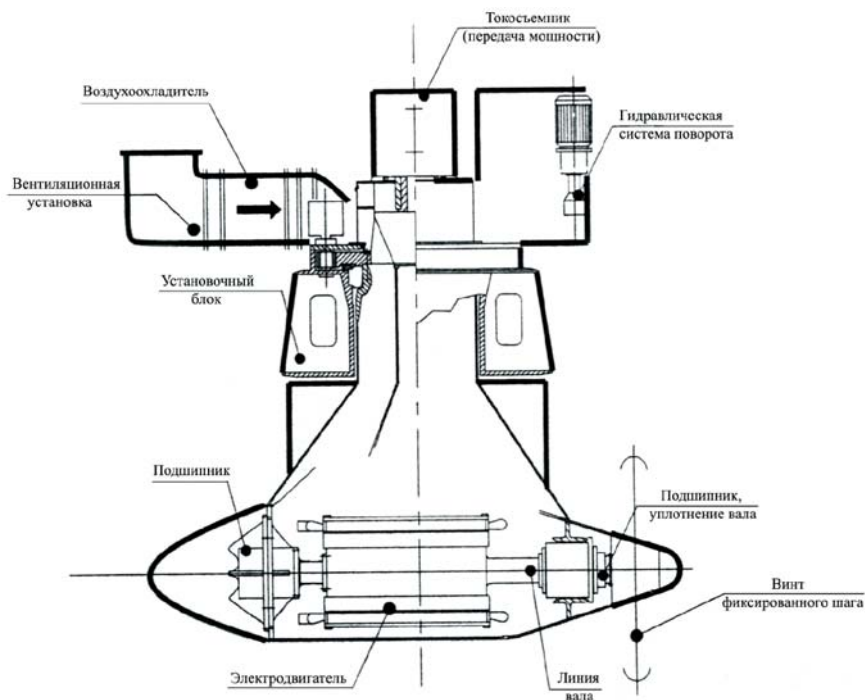


Рис. 1
Типовая конструкция ГВРК с гребным электродвигателем
в гондole фирмы «Rolls-Royce»

с электроприводом одного или двух гребных винтов, обеспечивает движение судна на всех ходовых режимах.

Колонка, верхняя часть которой имеет цилиндрическую форму, образует трубу, которая может поворачиваться в сварном установочном блоке, закрепленном на обшивке корпуса судна. Вращение трубы осуществляется на большиеразмерных двухрядных роликовых подшипниках. В нижней части трубы имеется четырехрядное уплотнение. Два верхних ряда уплотнения обеспечивают защиту от утечки масла из системы смазки подшипников, два нижних ряда предохраняют от проникновения воды в подшипники.

К верхнему торцу трубы крепится платформа, включающая румпельное зубчатое колесо, систему передачи электроэнергии к главному двигателю и систему охлаждения. Система передачи электроэнергии может представлять собой щеточный коллектор. В этом случае диапазон углов поворота колонки не ограничен. При использовании гибких кабелей поворот колонки ограничивается углами $0 \pm 180^\circ$.

В платформе монтируется система передачи смазочных масел с неподвижных частей на поворотные части колонки. Для этой цели на неподвижной части имеются кольцевые каналы со скользящими уплотнениями. Трубы из отсека ГВРК типа «Azipod» подходят к верхней части каналов неподвижной части. Из нижнего пространства подвижной части масло отводится шлангами.

Охлаждение обеспечивается замкнутой системой циркуляции воздуха через гондолу электродвигателя, включающей воздухоохладитель, оборудованный водяным теплообменником, в котором охлаждающая вода передает тепло в общую водяную систему охлаждения судна. Циркуляция воздуха в системе осуществляется одним или двумя вентиляторами. Нормально используется один вентилятор.

Поворот колонки осуществляется четырьмя зубчатыми колесами с гидроприводом. Одно из зубчатых колес снабжено гидравлическим тормозом. Цилиндрическая часть колонки плавно переходит в гондолу. В районе перехода к гондоле к колонке с двух сторон примыкают плоскости, выполняющие функции рулей. В гондоле располагается электродвигатель переменного тока с частотной регулировкой числа оборотов. Питание электродвигателя осуществляется от частотного преобразователя. Гребной вал опирается на опорно-упорные подшипники. На выходе вала из гондолы имеется масляное уплотнение из четырех уплотнительных колец. Для смазки подшипников предусмотрена гравитационная система подачи масла и дренажный насос для прокачивания масла через систему охлаждения и фильтрации.

При выключенной системе имеется доступ из корпуса судна в гондолу для осмотра.

В состав САУС могут входить установки, составляющие часть главных движителей и одновременно осуществляющие изменение направления упора (рис. 2).

Двухвинтовые ГВРК с электроприводом выпускаются, в частности, фирмой «Siemens». Схема такой установки дана на рис. 2. Недостатком этой установки является одинаковое направление вращения но-

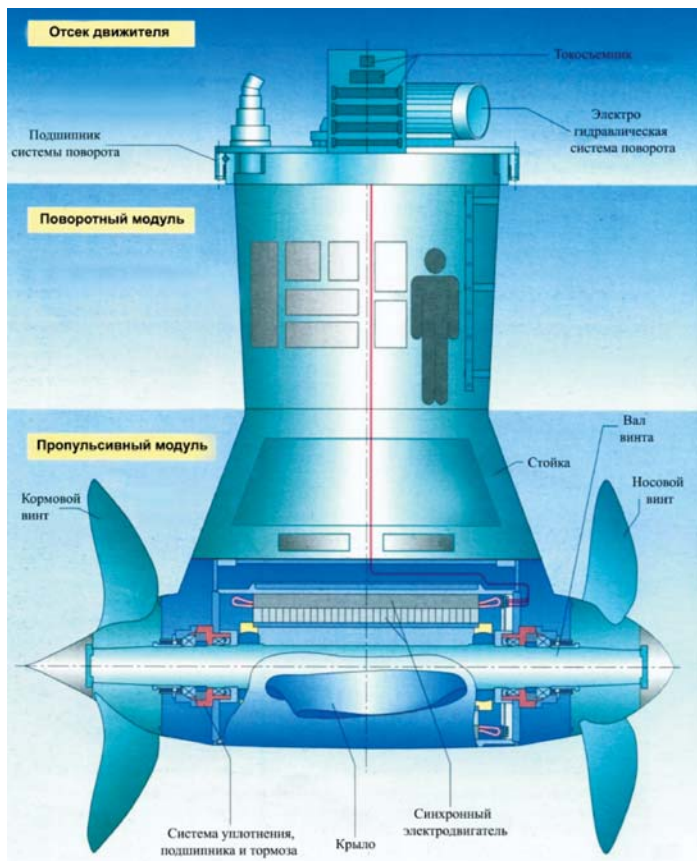


Рис. 2
Двухвинтовая ГВРК фирмы «Siemens»

сового и кормового гребных винтов, что неблагоприятно с точки зрения пропульсивных характеристик. Обеспечение противоположного направления вращения требует сложного редуктора. Проблема может быть решена за счет применения компоновки (рис. 3), при которой за обычным винтом располагается поворотная колонка с тянущим винтом противоположного вращения.

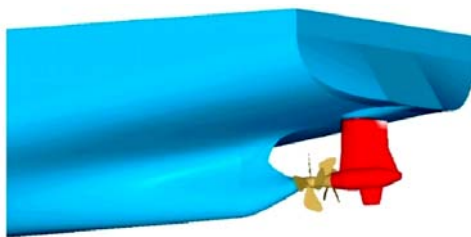


Рис. 3
Совместная компоновка обычного винта и ГВРК типа «Azipod»

Наряду со стандартной конструкцией ГВРК типа «Azipod» фирмой «АВВ» применяются компоновки типа «Компакт», предназначенные для относительно небольших судов с ограниченной осадкой и яхт (рис. 4).

Мощность серийных ГВРК типа «Azipod» колеблется в диапазоне 5 – 35 МВт, причем максимальная мощность зависит от частоты вращения.

Фирмы рекламируют возможность поставки по специальному заказу ГВРК еще большей мощности. ГВРК выпускается в одновинтовой и двухвинтовой компоновке. Фирма «АВВ» поставила около 200 комплектов ГВРК типа «Azipod», которые эксплуатируются под флагами разных стран, как на чистой воде, так и в ледовых условиях. По оценкам фирмы применение ГВРК обеспечивает снижение эксплуатационных затрат до 8 %, причем более высокие цифры относятся к судам большего водоизмещения.

В отличие от обычных рулей, ГВРК типа «Azipod» обеспечивают хорошую управляемость на заднем ходу. Это особенно важно на судах двойного действия (Double Action Ship – DAS), под которыми понимаются одновальные суда ледового плавания (танкеры, навалочные

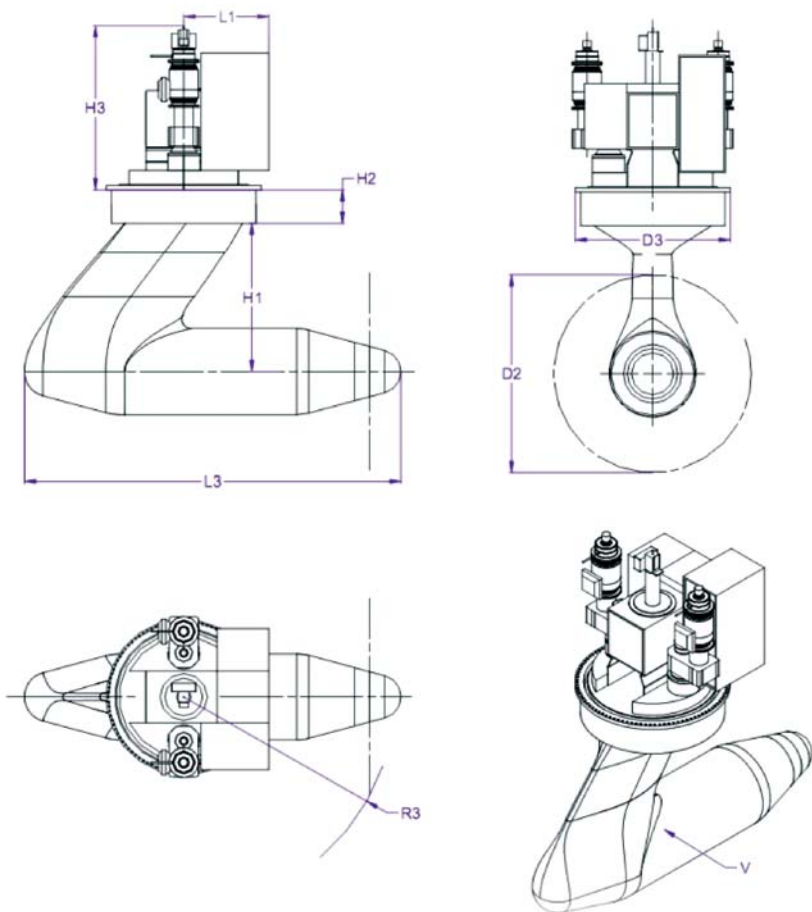


Рис. 4
Конструкция ГВРК типа «Azipod» схемы «Компакт»

суда), которые в ледовых условиях способны осуществлять движение задним ходом. При движении кормой вперед ГВРК, работая как носовой движитель, снижает ледовое сопротивление, повышает ледопроеходимость и эффективность судна в эксплуатации.

Отказ от длинных гребных валов на судах в пользу ГВРК позволил создать суда нового типа – ледоколы-снабженцы.

ГВРК с Z-образной передачей

Основным поставщиком подобных ГВРК является фирма «Rolls-Royce», в документации которой она носит название «Aquamaster».

Максимальная мощность ГВРК типа «Aquamaster» составляет 10 МВт. Фирма выпускает ряд типоразмеров ГВРК, включающий ГВРК с одиночными и соосными винтами противоположного вращения и гребными винтами в направляющих насадках. В отличие от установок типа «Azipod», двигатель ГВРК этого типа (дизель или электродвигатель) расположен внутри корпуса судна, и передача мощности на гребной винт осуществляется с помощью углового редуктора. САУС типа «Aquamaster» выпускаются как в стационарном исполнении, так и в исполнении, предусматривающем частичную уборку нижней части в корпус путем втягивания либо заваливания в специальный кожух.

Ряд типоразмеров, выпускаемых фирмой, предусматривает мощность до 3 МВт при диаметре винтов до 5 м в зависимости от номинальных оборотов.

На ГВРК типа «Aquamaster», в отличие от ГВРК типа «Azipod», двигатель непосредственно не связан с гребным винтом, а передача мощности осуществляется через две прямоугольные угловые передачи (или так называемую Z-образную передачу). Кроме этой передачи в состав такой ГВРК входят разобщительная муфта и механизм разворота колонки на 360°. Внешний вид и разрез ГВРК типа «Aquamaster» даны на рис. 5, 6.

Верхняя часть корпуса ГВРК фирмы «Rolls-Royce» выполнена сваркой из толстолистовой стали.

Поворотная часть соединяется с верхней частью с помощью обода большого диаметра, представляющего собой комбинированный подшипник и зубчатое колесо. Этот обод прикреплен к верхнему концу трубы.

Мощность размещенного в корпусе судна двигателя передается от ведущего вала с помощью одноступенчатого редуктора, сформированного из пары зубчатых колес, на промежуточный вертикальный вал. На нижнем конце этого вала смонтирован понижающий конический редуктор с передаточным отношением, находящимся в пределах $1:3,3 \div 1:6,1$. Редуктор соединяет промежуточный вал с гребным валом.

В верхней части ГВРК установлена разобщительная муфта, соединяющая ведущий и вертикальный вал. При включении этой муфты начинается вращение гребного вала. Вертикальный и гребной вал

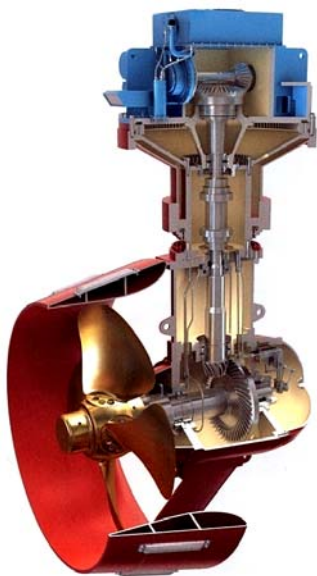


Рис. 5
Одновинтовая колонка типа «Aquamaster»
с механической Z-образной передачей
мощности на винт

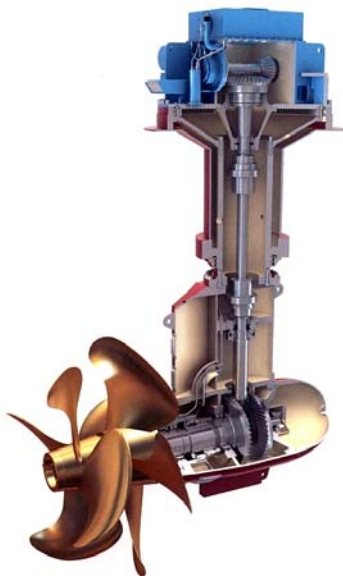


Рис. 6
ГРВК типа «Aquamaster»
с механической Z-образной передачей
мощности на винт и двоянными винтами

находятся внутри корпуса стойки и гондолы, заполненной смазочным маслом. Гондола служит охладителем масла.

Валы опираются на подшипники качения, причем все соединения валов имеют бесшпоночную конструкцию.

Выпускаются также ГРВК типа «Aquamaster» специальной конструкции, поворачивающиеся вокруг горизонтальной оси на 90° и убирающиеся в специальную нишу в корпусе. В горизонтальном положении они могут создавать поперечную силу, а в вертикальном положении, также как и обычные ГРВК, обеспечивают поворот силы на 360° . В небольших ГРВК может предусматриваться устройство для их откидывания при посадке на мель или возможность вертикального перемещения для поддержания постоянного заглубления в зависимости от осадки судна. Если ВРК служит вспомогательным двигателем и средством управления, то для снижения сопротивления судна при движении полным ходом в неограниченном фарватере колонки вы-

полняются убирающимися путем откидывания или втягивания. При этом управление судном осуществляется с помощью обычного руля.

Основные области применения ГВРК типа «Aquamaster» – буксиры, суда обслуживания технических средств освоения океана, а также паромы. Колонки типа «Aquamaster» могут также включаться в системы позиционирования. В настоящее время в классе РС эксплуатируется более 90 судов, оборудованных установками типа «Aquamaster», причем в их числе находятся суда ледового плавания.

Крыльчатые движители

Как отмечалось выше, еще одним типом САУС, сочетающим свойства главного движителя и средства управления, являются крыльчатые движители. Лопасты движителя, представляющие собой профилированные крылья с удлинением порядка 4 – 5, вращаясь вместе с установленным заподлицо с днищем ротором, одновременно колеблются вокруг собственных осей. При этом они в каждой точке окружности устанавливаются в положение, обеспечивающее создание заданной гидродинамической силы.

При вращении движителя каждая лопасть совершает два движения: вращательное (вместе с ротором) и поступательное (с судном). Результирующая траектория движения оси, очевидно, является циклоидальной кривой.

Когда в процессе движения все лопасти устанавливаются к потоку под нулевыми углами атаки, упор движителя (нагрузка) равен нулю. Для создания движителем гидродинамической силы каждая лопасть должна отклониться на некоторый угол от своего положения, соответствующего работе движителя без нагрузки. Этот угол называется углом атаки.

Следует иметь в виду, что у циклоиды, которой является поток, набегающий на лопасти, все внутренние нормали в течение оборота ротора пересекаются в одной точке. Таким образом, лопасти должны устанавливаться так, чтобы их хорды были перпендикулярны прямым, соединяющим точку, в которой расположена лопасть с этой точкой N , которая называется центром управления.

Для создания движителем гидродинамической силы каждая лопасть должна отклониться на угол атаки от своего положения, соответствующего работе движителя без нагрузки. Последнее достигается перемещением центра управления вдоль диаметра движителя. При различных положениях точки N могут создаваться силы различной величины.

Перемещение центра управления осуществляется двумя взаимно перпендикулярными сервомоторами. Перемещение вдоль диаметра, перпендикулярного диаметральной плоскости судна, обеспечивают передний и задний ход судна. Перемещение его в сторону от этого диаметра произвольно изменяет направление этих сил. При этом величину сил можно изменять при неизменном числе оборотов ротора только за счет перемещения центра управления. На рис. 7 показаны характерные для различных параметров движения положения центра управления.

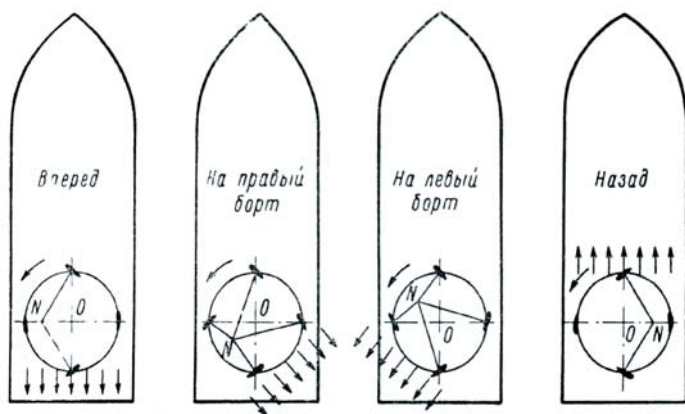


Рис. 7

Работа крыльчатого движителя при различных положениях центра управления N

Возможность изменять величину и направления создаваемой крыльчатым движителем тяги позволяет использовать их в качестве САУС.

Колебательное движение лопастей осуществляется с помощью механического привода. Крыльчатые движители выпускаются рядом фирм, наиболее известной из которых является фирма «Voith». Они отличаются как кинематикой, определяющей закон колебаний лопастей, так и конструктивным оформлением системы колебаний.

Основной геометрической характеристикой крыльчатого движителя является относительный эксцентриситет, равный отношению

наибольшего расстояния центра управления от оси движителя к его радиусу. Конструкция движителя позволяет изменять величину и направление эксцентриситета, благодаря чему крыльчатый движитель является движителем регулируемого шага и средством управления. Именно поэтому крыльчатые движители применяют на судах, режимы движения которых изменяются в широких пределах (буксиры, тральщики, траулеры) и к управляемости которых предъявляются жесткие требования (плавучие краны, бункеровщики). Недостатком крыльчатых движителей является ограниченная мощность и сложность конструкции.

Продольный разрез движителя приведен на рис. 8, мощность таких движителей не превышает 2500 кВт. К недостаткам таких движителей относится несколько более низкий, чем у ГВРК, КПД. Однако ограниченная осадка и возможность отказа от рулевого устройства сохраняют возможности их применения на описанных выше судах.

Среди иностранных КО только ABS ведет речь о крыльчатом движителе как об азимутальном движителе и дает рекомендации о размещении средств управления и оснащении сигнальными приборами.

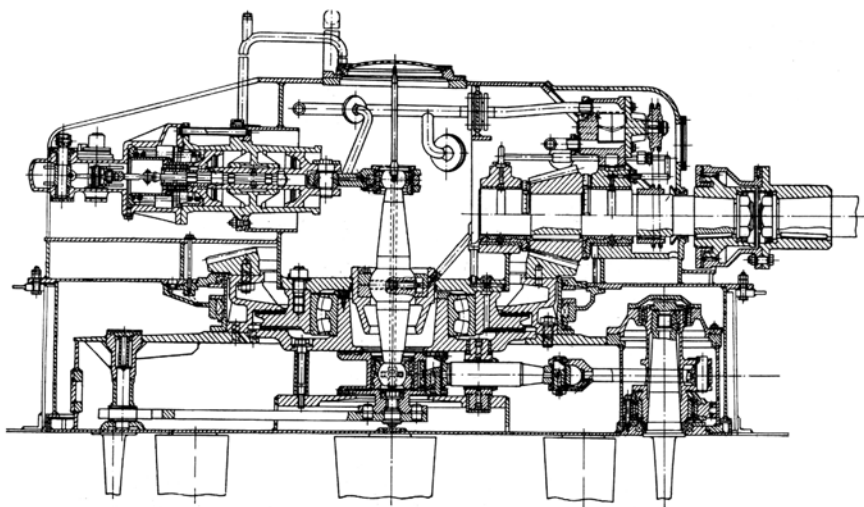


Рис. 8
Разрез крыльчатого движителя

Водометные движители

В полной мере может быть отнесен к категории САУС только водометный движитель, разработанный фирмой «Schottel», принципиальная схема которого приведена на рис. 9, вид с дна – на рис. 10.

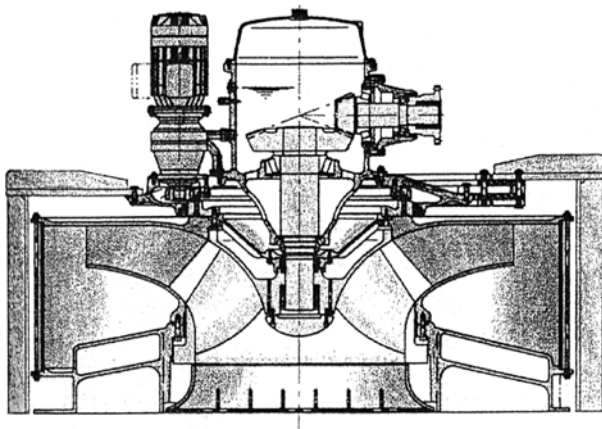


Рис. 9
Подруливающее устройство с водометным движителем типа «Pumps-jet»
фирмы «Schottel» в разрезе



Рис. 10
Вид ПУ с водометным движителем типа «Pumps-jet»
фирмы «Schottel» со стороны дна

В этом движителе водозабор осуществляется через центральное отверстие в поворотном роторе, нижняя поверхность которого выполнена заподлицо с днищем судна. Ротор может разворачиваться на 360° . Выброс воды происходит через три сопла, расположенных под прямыми углами друг от друга. Подобный движитель применяется на весьма тихоходных судах.

Принципиально сходная конструкция разработана в нашей стране. В ней забор воды осуществляется на периферии, а ее выброс происходит через установленное в центре движителя поворотное сопло (рис. 11). Благодаря большой площади заборного отверстия этот движитель предпочтительнее на мелководье, где имеется опасность подсоса посторонних предметов со дна водоема.

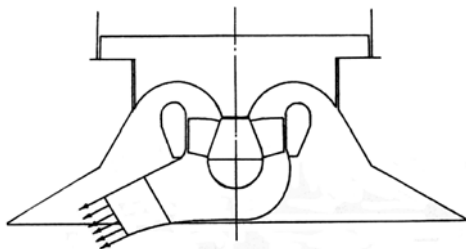


Рис. 11
Схема отечественного САУС водометного типа

В какой-то мере к категории САУС могут быть отнесены также обычные водометные движители: в тех случаях, когда они снабжены реверсивно-рулевым устройством (РРУ), позволяющим изменять направление струи, выбрасываемой из сопла движителя. При изменении этого направления в диапазоне $\pm 90^\circ$ РРУ выполняют функции руля, а при повороте на $90^\circ - 180^\circ$ обеспечивают реверс судна. Как и другие САУС они позволяют применять неревверсивные двигатели, а также отказаться от рулевого устройства. Исключение составляют так называемые бустерные водометные движители, создающие дополнительную тягу для достижения больших скоростей и не имеющих в своем составе РРУ.

В отличие от других САУС, при проектировании которых учитываются функции обеспечения маневрирования судна, все средства из-

менения направления тяги сосредоточены в самом водометном РПУ, основным требованием к которому, кроме выполнения управляющих функций, является отсутствие неблагоприятного влияния на величину тяги на переднем ходу.

Имея в виду, что функции управления выполняются реверсивно-рулевым устройством водометного движителя, эффективность этих движителей в качестве САУС определяется конструкцией РПУ. Устройство различных РПУ многообразно, но для серийно выпускаемых фирмой «Rolls-Royce» водометных движителей применяются типовые устройства. Для водометных движителей серии S поставляются устройства, внешний вид которых представлен на рис. 12. Недостатком этой схемы является возможность размыва дна на мелководе.



Рис. 12
Реверсивно-рулевое устройство водометного типа серии S

Для водометных движителей серии А поставляются РПУ несколько иной схемы.

Близкая по конструкции схема применяется фирмой «Hamilton».

Известны конструкции с поворотным соплом для маневрирования и опускающейся цилиндрической заслонкой для реверса.

В случае прямоугольного сопла могут быть использованы для маневрирования рули, установленные в сопле, реверс же осуществляется поворачивающейся вокруг горизонтальной оси цилиндрической заслонкой. Большой объем работ применительно к водометам с прямоугольным соплом и по исследованию РПУ проведен ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова.

Подруливающие устройства

Подруливающим устройством называется САУС, способное создавать тягу в двух противоположных направлениях, перпендикуляр-

ных диаметральной плоскости судна. Действие ПУ, представляющего собой движитель в поперечном канале, не связано с главным движителем. ПУ классифицируются по типу рабочего органа, форме канала и его расположению на судне.

ПУ выпускаются рядом фирм: «Rolls-Royce», «Voith», «Nicasima», «Lips Propeller Pleiger», «Side Power» и другими.

По типу рабочего органа ПУ подразделяют на ПУ с гребными винтами (одиночными или парными) и с крыльчатыми движителями. Именно типом рабочего органа и определяется форма канала.

ПУ с гребными винтами подразделяются на две большие группы, которые различаются размещением приводного двигателя вне канала ПУ и внутри него.

Остановимся на конструкции ПУ с двигателем, расположенным вне рабочего канала. Связь установленного в корпусе судна двигателя с гребным винтом возможна с помощью углового редуктора, расположенного в обтекаемой гондоле внутри канала, либо с помощью промежуточного вала двигателя. В этом случае требуется искривление канала.

Большое распространение получили ПУ с угловым редуктором. В этом случае приводной двигатель с вертикально расположенным валом располагается либо непосредственно на канале, образуя с угловым редуктором единый агрегат, либо, если этого требуют условия размещения, на некоторой высоте над каналом (рис. 13).

Иногда не удастся разместить по высоте двигатель с вертикальной осью, в этом случае требуется применение дополнительного углового редуктора вне канала. Соединение вала двигателя или вала наружно-

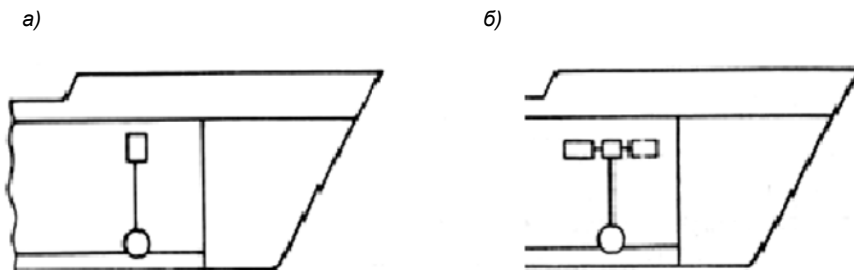


Рис. 13
Варианты компоновки приводов ПУ

го редуктора с ведущим валом редуктора, расположенного в канале в обтекаемой стойке, осуществляется с помощью упругой муфты. В некоторых случаях для облегчения монтажа используется дополнительный карданный вал. Верхний конец ведущего вала углового редуктора опирается на роликовый подшипник. Ввод вала в канал происходит через уплотнение с сальниковой набивкой. Гондола, в которой располагается редуктор, имеет диаметр 0,3 – 0,4 диаметра канала, при этом обеспечивается достаточный зазор для размещения лопастей гребного винта. Смазка зубчатой передачи осуществляется путем заполнения редуктора маслом. Для уплотнения гребного вала применяются резиновые манжеты. С целью повышения надежности уплотнения давление масла в редукторе должно быть на 0,3 – 0,4 кг/м² выше давления забортной воды.

Подпор в редукторе создается с помощью масляного бака, расположенного выше ватерлинии. Масло поступает в редуктор по трубке, проходящей через стойку, поддерживающую гондолу. Иногда предусматривается масляный насос, обеспечивающий прокачку масла через редуктор. Шестерни редуктора обычно изготавливаются из высокопрочных сталей и имеют круговые зубья. Гребной вал редуктора опирается на подшипники качения, причем для восприятия упора винта применяются радиально-упорные подшипники. В качестве привода применяются реверсивные электродвигатели постоянного тока.

Монтаж в канал ПУ с внешним электродвигателем производится, как правило, через люк, расположенный в верхней части канала. Для удобства монтажа гондола со стойкой иногда изготавливается совместно с участком канала, в котором она располагается. В этом случае секция соединяется с остальными участками канала фланцами, которые уплотняются специальными прокладками. Выше отмечалось, что гребной винт приводится во вращение реверсивным электродвигателем постоянного или переменного тока. Однако существуют конструкции, где в систему включен реверс-редуктор, а двигатель является неревверсивным. В этом случае электродвигатель устанавливается над каналом, а реверс-редуктор включает верхнюю угловую передачу (рис. 14).

Поскольку изменение направления силы, создаваемой ПУ, обеспечивается за счет реверса гребного винта, последний изготавливается с плоскими лопастями и симметричным профилем с тем, чтобы упор винта не зависел от направления вращения. Это приводит к тому, что КПД гребного винта относительно невысок.

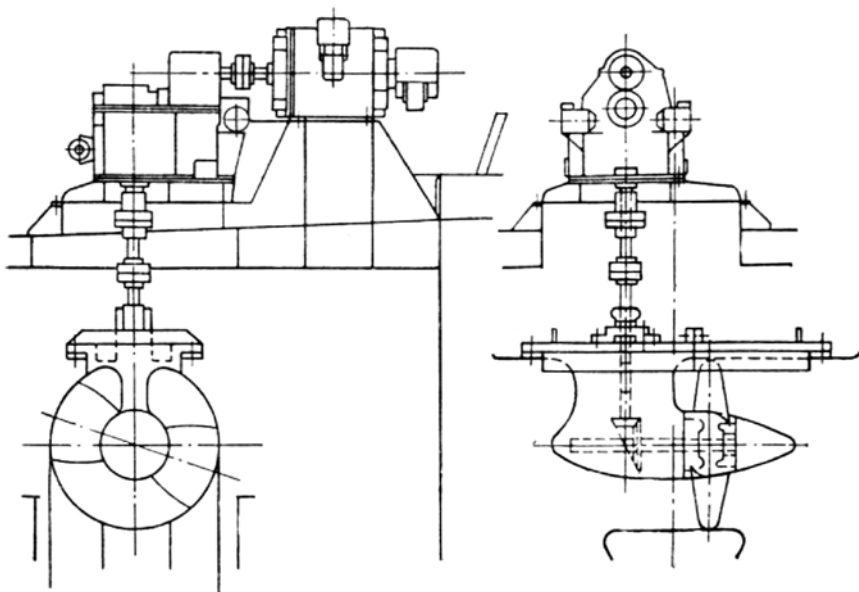


Рис. 14
Схема подруливающего устройства с реверс-редуктором

В случае использования винтов регулируемого шага в качестве приводного двигателя может быть применен асинхронный электро-двигатель переменного тока. Однако и в этом случае лопасти гребного винта имеют нулевой шаг, а профили лопастей симметричны относительно оси поворота.

При значительной мощности ПУ применяются конструкции с парными винтами противоположного вращения. В этом случае раздача мощности на два винта производится с помощью конической шестерни с вертикальной осью, находящейся в зацеплении с двумя коническими шестернями, расположенными на гребных валах. Применение противоположно вращающихся винтов позволяет увеличить удельную тягу или уменьшить диаметр канала.

Использование ПУ с криволинейным каналом позволяет применить прямую передачу мощности от двигателя к гребному винту. В этом случае винт приводится во вращение длинным валом, опирающимся на два подшипника, один из них расположен в кронштейне,

на который опирается винт, а второй – на выходе вала из канала. Подшипник в канале является подшипником скольжения с водяной смазкой, подшипник на выходе из канала выполняется в виде радиально-упорного подшипника качения, который воспринимает упор винта. На выходе из канала монтируется уплотнение с сальниковой набивкой.

Вследствие искривления трубы ее внутреннее сопротивление возрастает, что снижает эффективность ПУ. Кроме того, вследствие размещения отверстий в борту на различном расстоянии от миделя и несимметричного расположения винта, момент, создаваемый ПУ на правый и левый борт, различен.

Подруливающие движители с погружными электродвигателями

К этой группе ПУ относятся установки, приводной двигатель которых располагается непосредственно в канале устройства. В этих ПУ гребной винт устанавливается на валу двигателя. Для восприятия упора ротор двигателя вращается на радиально-упорных подшипниках. При компоновке подобного ПУ встречаются со значительными трудностями. В связи с высоким числом оборотов электродвигателей диаметр гребного винта, как правило, невелик. Как следствие этого диаметр двигателя составляет около 60 % от диаметра канала, а вследствие этого ухудшаются гидродинамические качества ПУ, а упор устройства на правый и левый борт оказывается различным. Закрепление двигателя требует применения двух рядов стоек на оконечностях движителя, что также снижает гидродинамические качества компоновки. В результате этого подобные ПУ имеют ограниченное распространение, как правило, отдается предпочтение внешнему расположению двигателя. В последние годы разрабатываются электродвигатели с неподвижным кольцевым ротором, внутри которого размещается гребной винт.

При подобном конструктивном решении удастся устранить многие недостатки, присущие традиционной компоновке.

Подруливающие устройства с крыльчатыми движителями

Высота канала ПУ с крыльчатыми движителями, как правило, близка к длине его лопастей и существенно меньше его ширины. Поэтому применение подобных ПУ рационально для мелкосидящих судов, поскольку при их проектировании удастся обеспечить значи-

тельное сечение канала, главным образом, за счет увеличения его ширины.

Следует отметить, что насосный КПД крыльчатого движителя ниже соответствующего КПД гребного винта, но его конструкция позволяет использовать для привода нереверсивные электродвигатели переменного тока. Требования к установке крыльчатого движителя ПУ не отличаются от аналогичных требований для крыльчатых движителей, установленных на корпусе вне канала.

Подруливающие устройства насосного типа

Для этих ПУ характерно отсутствие собственного двигателя и движителя. Струя, выбрасываемая через сопло этого ПУ и формирующая тягу, создается с помощью насосов общесудового назначения (водоотливных, грузовых, пожарных и т. д.). Такие ПУ применяются обычно на танкерах, пожарных судах, землесосах.

Активные рули

Активным рулем (АР) называется САУС, состоящее из пера руля с установленным на нем движителем. В качестве движителя применяется гребной винт, приводимый во вращение либо погружным электродвигателем, расположенным в наделке обтекателя, закрепленной, как правило, в середине высоты пера руля, либо механической передачей от двигателя в румпельном отделении судна. Особенностью погружного двигателя является наличие в его составе радиально-упорных подшипников для восприятия упора гребного винта АР. Схема компоновки подобного АР приведена на рис. 15.

АР с механической передачей имеет более сложную конструкцию (рис. 16). Приводной электродвигатель постоянного тока, как правило, устанавливается вертикально в специальном стакане, закрепленном на верхнем конце баллера руля над системой поворота баллера. Вал электродвигателя соединяется муфтой с вертикальным валом, расположенным в расточке баллера руля. В ряде случаев муфта выполняется разъемной для отключения электродвигателя от привода гребного винта САУС при его свободном вращении. На ведомой части муфты устанавливается ленточный тормоз, позволяющий в случае необходимости застопорить вертикальную передачу. Вертикальный вал в радиальном направлении опирается с помощью роликовых самоустанавливающихся подшипников на

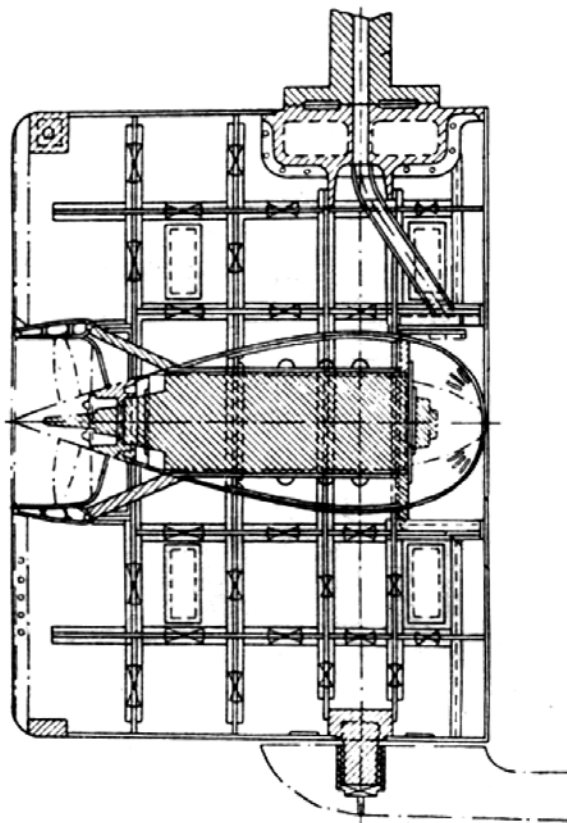


Рис. 15
Схема активного руля с погружным электродвигателем

стенки расточки баллера. В расточке наряду с валом располагается масловод для подачи масла к угловому редуктору, устанавливаемому в наделке на пере руля. Вертикальный вал соединяется с ведущим валом конического редуктора через посредство карданного вала, позволяющего компенсировать погрешности установки редуктора в пере руля.

Конический редуктор передает крутящий момент от вертикального вала на гребной вал и воспринимает упор гребного винта. Как правило, редуктор выполняется понижающим. Редуктор размещается в

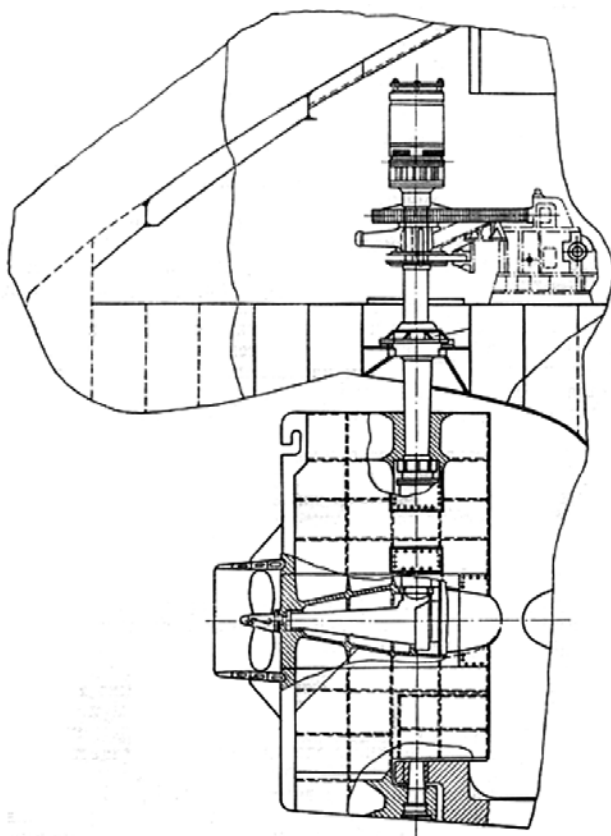


Рис. 16
АР с угловой передачей мощности

специальной наделке на перо руля. На кормовом конце гребного вала, установленного на подшипниках качения, располагается манжетное уплотнение. Для повышения надежности уплотнения в манжетной полости устанавливается повышенное, по сравнению с забортным, давление масла.

Смазка шестерен и подшипников нижнего редуктора осуществляется разбрызгиванием масла, залитого в редуктор. Постоянный уровень масла поддерживается гравитационной системой смазки. Масло подается из маслобака, расположенного в румпельном отделении.

Для обеспечения заднего хода и управляемости на заднем ходу приводной электродвигатель выполняется реверсивным. Гребной винт, как правило, размещается в направляющей насадке.

При ходе под главными двигателями гребной винт АР обычно свободно вращается. Возможна и совместная работа главного винта и движителя АР. Для работы в совместном режиме направления вращения движителя АР и главного движителя имеют противоположные знаки. В этом случае КПД комплекса несколько возрастает за счет снижения потерь на закручивание потока основного винта. Для снижения потерь при ходе только под главным винтом лопасти движителя АР выполняются поворотными и устанавливаются на этом режиме во флюгерное положение. В случае применения ВРШ приводной двигатель может быть неревверсивным.

При применении АР совместно с носовыми ПУ судно обладает повышенной маневренностью, в частности может быть обеспечено движение судна лагом.

АР получили наибольшее распространение на судах рыболовного флота, а также на океанографических судах и паромах.

Мощность двигателей АР не превышает 350 – 450 кВт.

Классификационными обществами требования к собственно АР не предъявляются. Регистром Ллойда формулируются лишь требования к рулевому приводу перекачки руля.

2. Анализ информационных материалов и требований к САУС

Недостатком требований к САУС в Правилах РС является рассмотрение только винторулевых колонок различных типов.

Действующим в настоящее время стандартом Р-ИСО-7255-2007 [6] их перечень значительно расширен и включает, наряду с главными и вспомогательными ВРК, такие САУС, как крыльчатые и водометные движители, а также ПУ и АР. Разнообразие вариантов принципов функционирования и применения различных видов САУС показывает структурная схема на рис. 17.

Что касается зарубежной практики, то, хотя в правилах ведущих иностранных КО упоминается по существу полная номенклатура САУС, в них практически отсутствуют конкретные требования к каждому их виду, а даются лишь рекомендации общего характера.

О сложившейся ситуации свидетельствуют данные табл. 1, которые указывают на своевременность выполненной корректировки разд. 7 части VII Правил РС.

Таблица 1

**Сопоставление наличия специальных требований МАКО и правил КО
к отдельным видам САУС**

Наименование САУС или их элементов	Наличие требований в УТ МАКО и правилах ведущих КО									
	МАКО [13]	PC [6]	ABS [8]	BV [10]	GL [12]	DNV [11]	KR [14]	LR [17]	NK [23]	RINA [25]
Поворотная колонка с электродвигателем в гондоле («Azipod»)	–	+	–	+	+	+	–	–	–	+
Поворотная колонка с угловым редуктором в гондоле («Aquamaster»)	–	–	–	+	+	+	–	–	–	+
Крыльчатые движители	–	–	+	–	–	–	–	–	–	–
Водометные движители	–	–	+	+	+		–	–	–	–
ПУ	–	–	+	+	–	–	–	–	–	–
АР	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–

Поскольку информация о требованиях к конструктивным особенностям ГВРК изложена выше достаточно полно, обратимся к особенностям таких требований для крыльчатых и водометных движителей, а также для ПУ.

Крыльчатые движители. В нашей стране к крыльчатым движителям требования предъявляются как к основному средству обеспечения полного хода судна. Исследования в обеспечение проектирования и гидродинамического расчета крыльчатых движителей выполнялись в ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова и НПО «Винт», и их результаты опубликованы в книгах [2], [3]. В материалах иностранных КО (ABS) крыльчатые движители отнесены к категории «Asimuth Truster» и, следовательно, к ним должны быть предъявлены требования по времени реверсирования, аналогичные требованиям, сформулированным для ГВРК. Это приводит к тому, что перегрузки на отдельных лопастях и других элементах таких движителей, неизбежные при подобном маневре, должны допускаться конструкцией движителя, либо необходимо сформулировать ограничения по порядку и времени выполнения маневра. В настоящее время эти вопросы надлежащим образом не исследованы. При этом следует учитывать приведенную в упомянутых правилах оговорку о том, что, если мощность движителя составляет

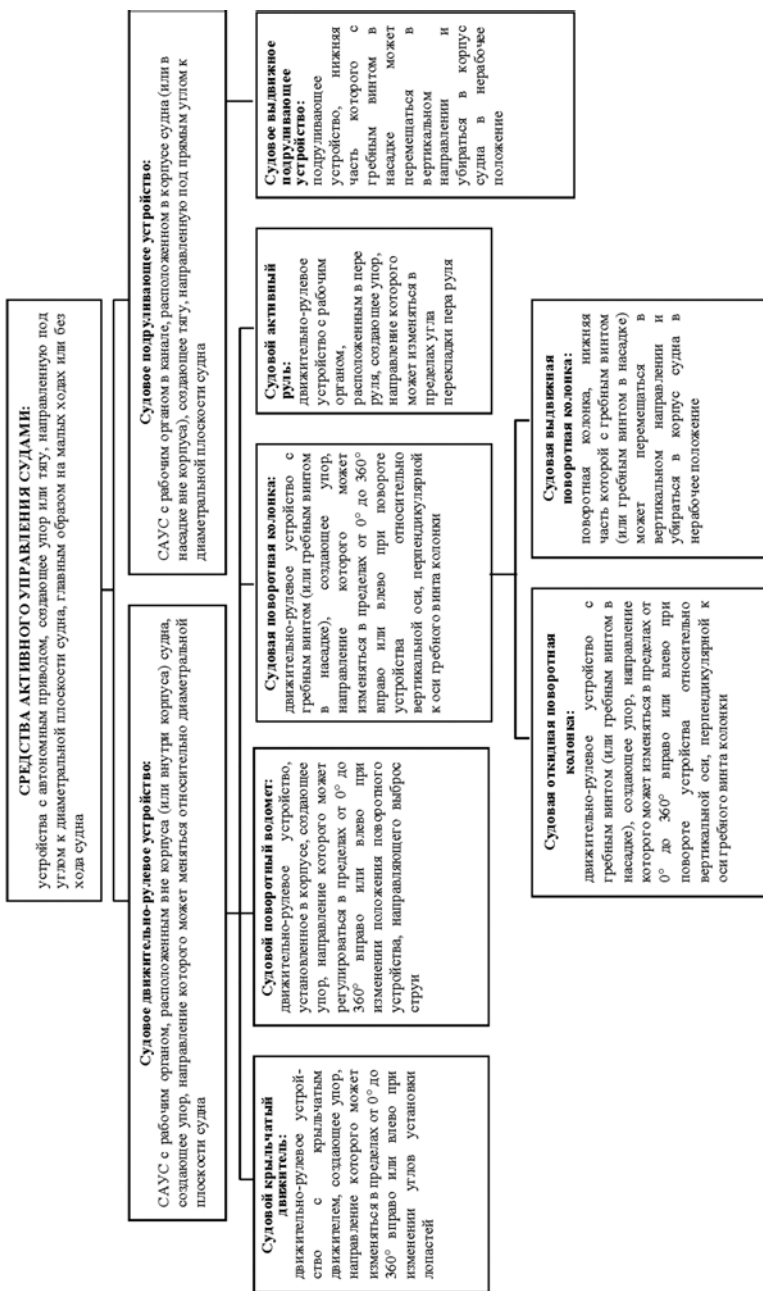


Рис. 17

Структурная схема взаимосвязей видов и способов применения САУС

менее 110 кВт, к ним предъявляется общее требование; что они должны изготавливаться в соответствии с хорошей морской практикой и испытываться согласно требованиям к удовлетворению инспектора.

Следует отметить, что крыльчатые движители («Cycloidal» по иностранной терминологии) упоминаются только в материалах ABS. Однако анализ требований к САУС, предъявляемых ABS, показывает, что они не содержат позиций, относящихся только к крыльчатым движителям. Очевидно, что позиция других КО сводится к тому, что такие движители либо не относятся к САУС, либо должны удовлетворять общим требованиям, предъявляемым к другим средствам управления.

Водометные движители. Отношение к водометным движителям у КО различное. Некоторые из них (ABS, DNV и LR) рассматривают их как «азимутальное» средство, обеспечивающее реверс, а некоторые (RINA) – лишь как средство управления.

Как отмечалось выше, основная проточная часть водометного движителя, как правило, проектируется как средство обеспечения движения на прямом курсе, а осуществление маневрирования не влияет на элементы этой части. Маневрирование и реверс обеспечиваются реверсивно-рулевым устройством, навешиваемым на сопло движителя. Поэтому комплекс требований, связанных с обеспечением реверса, например, время его реализации, изменения направления тяги, регламентируется только для РПУ. Представляется, что основные рекомендации и требования к конструкции собственно водометных движителей должны быть сформулированы в разд. 6 «Движители» части VII «Механические установки» Правил РС. Исключением является водометный движитель, разработанный фирмой «Schottel», который разворачивается полностью и по существу действительно является средством активного управления.

Подруливающие устройства. По принципу их действия они примыкают к водометным движителям, от которых отличаются прямолинейным или почти прямолинейным каналом: создаваемая ими тяга практически перпендикулярна диаметральной плоскости судна. Эти устройства в число САУС (хотя этот термин иностранные КО не применяют) включают и ABS, и BV, а также DNV, LR и RINA. Специальные требования к конструкции элементов ПУ формулируют только RINA и DNV, причем эти требования касаются только конструкции канала. Применительно к ПУ с внешним двигателем и угловым редуктором привода гребного винта должны использоваться рекомендации по проектированию гондолы и редуктора, которые сформулированы применительно к аналогичным устройствам ГВРК.

В случае применения в качестве насоса крыльчатого движителя следует руководствоваться рекомендациями, разработанными для подобных движителей.

При разработке привода винта для АР (о которых вообще нет упоминаний в правилах иностранных КО) надлежит руководствоваться рекомендациями по проектированию ГБПК. При этом, поскольку мощность, передаваемая на гребной винт АР, относительно невелика, необходимо учитывать оговорки относительно предельной мощности, начиная с которой действуют требования КО – 110 кВт для ABS и 300 кВт для DNV. Для АР необходимо руководствоваться требованиями по характеристикам рулевых приводов, сформулированными LR.

Оценивая результаты приведенного обзора информационных материалов о требованиях ведущих КО к существующим видам САУС, приходится сделать вывод об отсутствии системного подхода к их изложению. Это затрудняет как понимание, так и практическое применение пользователями правил КО, что должно быть учтено при переработке соответствующего раздела Правил РС.

При практическом осуществлении этого предложения необходимо сохранить методическое единство изложения новой редакции этого раздела с общим принципом построения Правил РС как единого документа, представляющего собой иерархическую систему классификации, в которой каждый структурный элемент представляет собой подсистему элементов следующего, более низкого иерархического уровня.

Само построение и описание таких подсистем с уникальным набором свойств, определяющих их функциональную надежность, и требований к этим свойствам принципиальных трудностей не содержит. Но они возникают при необходимости использовать в формулировках требований к элементам более низкого иерархического уровня, требований к аналогичным элементам, представляющим собой самостоятельные подсистемы элементов с собственной совокупностью требований к ним.

Например, необходимо определить требования Правил РС (часть VII «Механические установки») к угловым зубчатым редукторам и составляющим их элементам с учетом конкретных условий их функционирования для винторулевых колонок типа «Aquamaster» (разд. 7 части VII Правил РС). Но самостоятельного подраздела для ВРК в этом разделе нет. Зато в гл. 7.1 «Общие положения» есть п. 7.1.5 с указанием: «Расчеты зубчатых передач САУС должны выполняться по методике, изложенной в 4.2 части IX «Механизмы». ...». Отыскать

на практике нужную информацию, применимую к условиям функционирования данного механизма, по такой системе ссылок затруднительно. Аналогичная ситуация наблюдается и в правилах других КО.

Рассмотренные информационные материалы и требования ведущих КО к основным типам САУС в целом охватывают проблемы проектирования, конструкции, размещения, средств сигнализации, испытаний и др. Требования к различным элементам ГВРК, изложенные в разд. 7 части VII Правил РС, с достаточной полнотой отражают перечень основных элементов ГВРК, содержащихся в технической документации, подлежащей рассмотрению и одобрению, а также правила технического наблюдения за ними в процессе эксплуатации.

Анализ этих требований, показывает, что по смыслу и параметрам они во многом идентичны аналогичным требованиям иностранных КО, а в ряде случаев сформулированы более четко. В то же время ряд требований, непосредственно относящихся к ГВРК, к настоящему времени устарел и нуждается в корректировке. В первую очередь это касается необходимости учета ледовых нагрузок, а также использования методов оценки напряженного состояния и прочностных размеров, допустимых напряжений для обеспечения пирамидальной прочности лопастей гребных винтов с учетом усталостной и статической прочности. На основании выполненных исследований, охватывающих всю номенклатуру САУС, рассматриваемых иностранными КО, членами МАКО предложен новый вариант формулировки требований разд. 7 части VII Правил РС, свободный от этого недостатка.

Список литературы

1. Решетов Н. А. Обеспечение безопасности главных винторулевых колонок в нормативной и надзорной деятельности Регистра // Судостроение. – 2002. – № 1.
2. Лебедев Э. П. и др. Средства активного управления судами // Судостроение. – 1969.
3. Грузинов В. И., Гуляев В. И. Крыльчатые движители // Судостроение. – 1973.
4. Немзер А. И., Русецкий А. А. Особенности управляемости судов, оборудованных движительным комплексом «Азипод» // Морской вестник. – 2002. – № 4.
5. Мавлюдов М. А., Русецкий А. А. и др. Движители быстроходных судов // Судостроение. – 1982.
6. Судостроение. Средства активного управления судами. Словарь // ГОСТ Р ИСО 7255-2007.
7. Правила классификации и постройки морских судов. Том 2. – СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2008.

8. ABS Rules for Building and Classing Steel Vessels. 208 Part 4, Chapter 3, Section 5, 6.
9. Azipod Propulsion. Рекламный проспект фирмы «ABS», 2004.
10. BV Rules for the classification of steel ships. 2004 Pt. C.Ch. 1 Section 12.
11. DNV Rules for Classification of Steel Ship. 2004. Rules for Ships / High speed, Light Craft and Naval Surface Craft, Jan. 2007, Part 4, Chapter 5, Section 2, 3.
12. GL. Rules for Classification and Construction. 2008.
13. IACS. INTERNATIONAL ASSOCIATION OF CLASSIFICATION SOCIETIES. Requirements concerning MACHINERY INSTALLATIONS.
14. KR. Guidance Relating to the Rules for the Classification of Steel Ships. 2007.
15. KR. Rules for the Classification of Steel Ships. 2007.
16. Lips transverse Tunnel Thruster. Рекламный проспект фирмы «Lips».
17. LR Rules and Regulation of Ships. 2007. Part 5, Chapter 23, Section 1, 2, 3, 6; Chapter 19, Section 1, 2, 3, 4, 8; Part 4, Chapter 5, Section 2.3.
18. NKK. Guidance for Marine Pollution Prevention Systems. 2006.
19. NKK. Guidance for the Survey and Construction of Steel Ships. 2006.
20. NKK. Rules for Approval of Manufactures and Service Suppliers. 2006.
21. NKK. Rules for Marine Pollution Prevention Systems. 2006.
22. NKK. Rules for Preventive Machinery Maintenance Systems. 2006.
23. NKK. Rules for the Survey and Construction of steel Ships. 2006.
24. Propulsion. Рекламный проспект фирмы «Rolls-Royce».
25. RINA Rules for the Classification of Ships 2006 Section 12.
26. Risto Kurimo, A.V.Poustoshniy, E.Syrkin. Azipod Propulsion for Passenger Cruiser NAV and ASMV International Conference. Sorrento, 1997.
27. Schottel Innovatots in Propulsion Technology. Рекламный проспект фирмы «Schottel».
28. Schottel Pump jet. Application – Oriented Propulsion System. Рекламный проспект фирмы «Schottel».
29. Schottel Transverse Thruster. Рекламный проспект фирмы «Schottel».
30. Side thruster (controllable pitch) Model TC-N. Рекламный проспект фирмы «Techno Nacashima Ltd.».
31. The SSP Propulsor Au Ingenious Podded drive System. Рекламный проспект фирмы «Siemens & Schottel».

УДК 629.5.011:621.644.07

*О.А. Строгонова, О.Г. Рыбакина, О.Я. Тимофеев, Б.А. Ярцев,
А.С. Авдонкин, С.В. Балагура, В.Г. Чернов*

ТРЕБОВАНИЯ РОССИЙСКОГО МОРСКОГО РЕГИСТРА СУДОХОДСТВА К ПРОЕКТИРОВАНИЮ, СТРОИТЕЛЬСТВУ И ЭКСПЛУАТАЦИИ МОРСКИХ ПОДВОДНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

Развитие морского подводного трубопроводного транспорта обусловлено возрастающей добычей углеводородного сырья на шельфе морей и океанов. По некоторым оценкам объем добычи нефти и газа на шельфе приблизится в ближайшие годы к 40 % от общемировой добычи углеводородов.

С появлением планов по строительству морских подводных трубопроводов (МПТ) в начале 90-х годов на шельфе РФ Российский морской регистр судоходства (РС) начал разработку собственной нормативно-технической базы по МПТ. Первые результаты работы были реализованы в виде Правил классификации и постройки морских подводных трубопроводов, изданных в 2003 году. В настоящее время в действие введены два документа РС издания 2009 года: Правила классификации и постройки морских подводных трубопроводов (Правила МПТ) и Руководство по техническому наблюдению за постройкой и эксплуатацией морских подводных трубопроводов (Руководство МПТ). Эти документы формировались в последние годы на базе результатов нескольких НИР, выполненных по заказу РС различными научно-исследовательскими и промышленными предприятиями, имеющими опыт работ на объектах подводного трубопроводного транспорта.

В статье рассматривается общая структура указанных документов и более детально анализируются требования данных документов, ре-

гламентирующие прочность элементов МПТ на различных этапах их жизненного цикла.

Правила МПТ предназначены для обоснования инженерных решений на различных стадиях проектирования и постройки МПТ. Правила состоят из 10-ти разделов, содержащих требования к расчетным внешним нагрузкам, прочности МПТ, их баллаستировке, материалам, сварке, защите от коррозии, монтажу и испытаниям, техническому обслуживанию и ремонту, а также оценке безопасности. Общие положения Правил МПТ описывают применяемые в документе термины, состав рассматриваемой РС технической документации, введенную классификацию МПТ. В случае МПТ под классификацией понимается обобщенное описание основных технических особенностей трубопровода и степени технического наблюдения за МПТ, используемое в дальнейшем для нормирования параметров сооружения и выбора материала. Не останавливаясь подробно на описании символов класса МПТ, отметим, что для стальных трубопроводов в символ класса введены дополнительные знаки, соответствующие определенному уровню надежности (см. табл. 1).

Таблица 1

Дополнительные знаки к символу класса стальных МПТ

Степень эксплуатационной надежности (уровень надежности)	Вид транспортируемой среды	
	Жидкости и двухфазные потоки	Газ
Повышенная эксплуатационная надежность	L1	G1
Для транспортировки агрессивных сред	L2	G2
Для сейсмически опасных районов и недостоющих стояков	L3	G3

В дальнейших процедурах дополнительные знаки символа класса трубопровода используются для назначения расчетных нагрузок различного вида, коэффициентов безопасности, а также используются при выборе материалов и назначении требований к ним.

Правила МПТ рассматривают следующие виды внешнего воздействия на линейную часть трубопровода:

вес трубопровода с учетом балластного покрытия и архимедовой силы;

внутреннее давление в трубопроводе (как в состоянии нормальной эксплуатации, так и при возможном гидравлическом ударе);

обледенение трубопровода в случае транспортировки продуктов с отрицательной температурой;

сейсмические нагрузки;
воздействие волн и течения;
температурные воздействия;
наружное гидростатическое давление с учетом приливно-отливных явлений и волнения.

Перечисленные внешние воздействия и вызываемые ими внешние силы необходимо учитывать при назначении прочных размеров трубопровода. Правила реализуют нормативы по прочности двух типов МПТ:

стальные трубопроводы;
гибкие трубопроводы в виде полимерно-металлических труб.

Прочность стальных трубопроводов должна быть обеспечена по следующим критериям.

1. Статическая прочность при расчетном давлении обеспечивается назначением толщины стенки трубы по критерию непревышения определенного уровня допустимых кольцевых напряжений. Допустимые напряжения зависят от параметров стали, а именно, от предела текучести и временного сопротивления. Коэффициенты безопасности для допускаемого напряжения зависят от класса трубопровода.

2. Статическая прочность при комбинированной нагрузке (внутреннее давление и предельные нагрузки в трубопроводе) должна обеспечиваться по напряжениям Мизеса относительно предела текучести материала с коэффициентом запаса, зависящим от класса трубопровода и вида нагрузки (эксплуатационное и кратковременное единичное).

3. Локальная устойчивость стенки трубопровода (смятия) должна быть обеспечена при действии наружного гидростатического давления. Соответствующие зависимости для критического наружного давления и запасы относительно действующего (рабочего) давления на стенку приведены в Правилах МПТ. Локальная устойчивость при сложном нагружении под совместным действием изгибающего момента, осевой силы и давления на стенку трубы считается обеспеченной, если выполняется условие:

$$\left(\frac{p}{p_c}\right)^{n_1} + \left(\frac{M}{M_c}\right)^{n_2} + \left(\frac{T}{T_c}\right)^{n_3} \leq \frac{1}{n_c},$$

где p , M , T – действующее давление, изгибающий момент и осевая сила соответственно;

p_c , M_c , T_c – критическое давление, критический изгибающий момент и критическая осевая сила соответственно.

Каждый из перечисленных силовых факторов вызывает локальное смятие и может быть определен по известным зависимостям.

n_1, n_2, n_3 – показатели, определяемые экспериментальным путем по методике, согласованной с РС.

Если $n_1 = n_2 = n_3 = 1$, то дальнейшее уточнение показателей степени не требуется.

n_c – коэффициент безопасности, зависящий от класса трубопровода в диапазоне от 1,1 до 1,6.

4. Правила МПТ предусматривают проверку трубопровода на лавинное смятие и усталость. Усталость трубопровода проверяется по линейной теории суммирования усталостных напряжений с коэффициентом безопасности по количеству циклов нагружения, который находится в диапазоне от 3,0 до 8,0 и зависит от класса трубопровода.

Отдельная глава Правил МПТ посвящена нормам прочности гибких труб (см. гл. 3.7 разд. 3 «Прочность подводных трубопроводов»). Поскольку гибкие полимерно-металлические трубы имеют свою существенную специфику по сравнению с металлическими трубами, то раздел предваряется определениями используемых терминов, описывающих элементы конструкции связанных и несвязанных гибких труб. Критериями, определяющими прочность гибких труб, являются:

- деформационный критерий для полимерных слоев;
- допускаемые напряжения для металлических слоев;
- устойчивость металлических элементов каркаса.

Кроме перечисленных видов эксплуатационного нагружения Правила МПТ нормируют основные параметры процесса укладки подводного трубопровода, а именно, усилие на натяжителе и угол наклона стингера (при укладке S-способом). Критериями прочности трубопровода при его укладке J- или S-способом является упомянутый выше комплексный критерий при совместном действии на трубу внешнего давления, изгибающего момента и осевой силы. Более детально методика нормирования прочности при укладке описана в [1].

По сравнению с аналогичными документами зарубежных классификационных обществ, Правила МПТ содержат требования в отношении дополнительных мер по защите трубопровода в районах с интенсивной ледовой экзарацией (гл. 8.3 разд. 8 «Монтаж и испытания трубопроводов»). Процедура раздела позволяет назначить величину заглубления трубопровода в грунт при следующих известных характеристиках участка трассы:

- глубина моря с учетом отлива;

вероятностные показатели дрейфующих ледовых образований (среднее значение осадки киля тороса, среднеквадратическое отклонение осадки киля, среднее время существования периода торосообразования, средняя скорость дрейфа и среднее количество торосов на единицу площади).

Перечисленные данные определяются в результате многолетних изысканий. Глубина закладки определяется вероятностным методом [2] исходя из планируемого срока службы трубопровода и обеспечения отсутствия касания килем тороса трубы с обеспеченностью 0,99 1/год.

Руководство МПТ, кроме общих требований по осуществлению РС технического наблюдения за МПТ (в том числе в процессе постройки и периодических освидетельствований МПТ в эксплуатации), установления номенклатуры объектов технического наблюдения и требований к предприятиям, содержит требования к изготовлению материалов и трубной продукции. Один из пунктов посвящен требованиям по дефектации МПТ в процессе эксплуатации, в котором предусмотрены критериальные зависимости допустимости повреждений следующих типов:

- отклонение трубопровода от первоначальной трассы в результате воздействия внешних сил и миграции грунта;

- появление провисающих участков, которые не были предусмотрены проектом и появились в результате локального размыва грунта;

- вмятины трубы, появляющиеся в результате воздействия якорей, орудий лова и т. п.;

- питтинговая коррозия труб;

- задиры на внешней поверхности трубы;

- расслоение материала труб;

- трещиноподобные дефекты.

Параметры дефектов должны регистрироваться инструментально во время внешнего освидетельствования МПТ и по результатам диагностики внутритрубными снарядами. В качестве примера рассмотрим алгоритм *определения допустимости трещиноподобных дефектов*.

При эксплуатации трубопроводов может возникать ситуация, связанная с образованием или развитием трещин, которая не всегда приводит к необходимости прекращения эксплуатации объекта, но связана с повышенным риском возникновения отказа. В этом случае возникает необходимость проведения расчета трубопровода на прочность с учетом наличия дефекта.

Трещиноподобные дефекты, обнаруженные при дефектации, делятся на поверхностные (см. рис. 1) и подповерхностные (см. рис. 2); дефекты предполагаются плоскими. Указанные на рис. 1 и 2 геометрические параметры трещины a и b определяются при дефектации трубопровода (предполагается, что $a > b$).

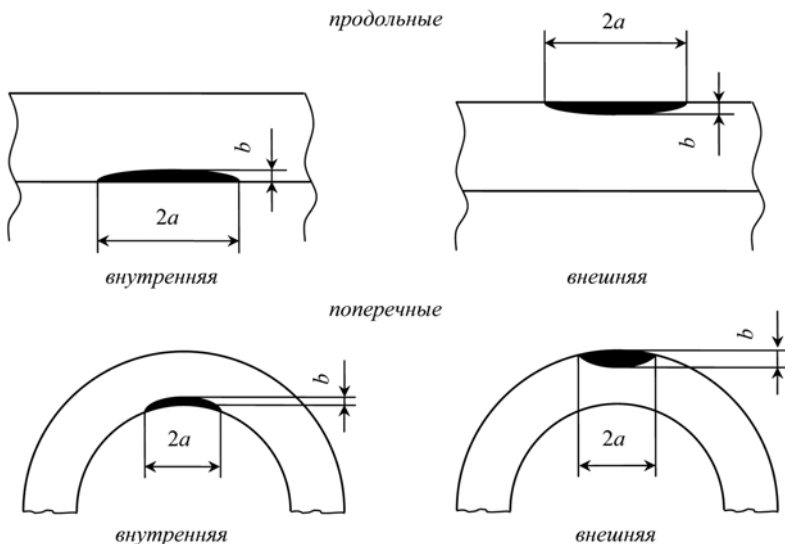


Рис. 1
Поверхностные трещиноподобные дефекты

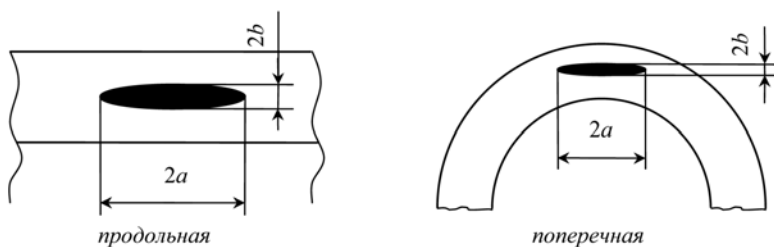


Рис. 2
Подповерхностные трещиноподобные дефекты

При оценке работоспособности конструкции в условиях однократного нагружения рассматривается поверхностный дефект заданного размера; необходимо оценить его поведение при заданной внешней нагрузке путем сравнения его максимального коэффициента интенсивности напряжений с критическим значением. Рассматриваются следующие возможности:

максимальный коэффициент интенсивности напряжений меньше критического – трещина не распространяется;

максимальный коэффициент интенсивности напряжений больше критического – трещина распространяется и становится сквозной (в случае поверхностной трещины) или поверхностной (в случае подповерхностной трещины).

При оценке работоспособности конструкции в условиях циклического нагружения рассматривается дефект заданного размера, оценивается его рост при заданной внешней нагрузке в течение заданного числа циклов и производится сравнение максимального коэффициента интенсивности напряжений с критическим значением. Далее, так же как при статическом нагружении, решается вопрос об устойчивости образовавшейся трещины.

Для оценки работоспособности конструкции с дефектом используется параметр:

$$\frac{K_I}{\sigma \sqrt{\pi b}},$$

где σ – напряжение, нормальное по отношению к плоскости, в которой расположена трещина;

K_I – максимальное значение коэффициента интенсивности напряжений на фронте трещины.

В данной статье представлены результаты расчета с использованием линейной механики разрушения на основании результатов [3–7], что позволяет оценивать критические размеры дефектов с некоторой ошибкой в безопасную сторону, т. е. недооценивается трещиностойкость материала.

Для расчета коэффициентов интенсивности напряжений рассматривается труба в виде кругового цилиндра с внутренним радиусом R и толщиной t ($10 \leq R/t \leq 40$) под действием внутреннего давления. Форма трещины варьируется от круговой до протяженной. Основные результаты представлены в виде таблиц коэффициентов интенсивности напряжений для заданных относительных размеров трещины и приведены в [8].

Продольная внутренняя трещина

Рассматривается поверхностный дефект, представляющий собой плоскую полуэллиптическую трещину, перпендикулярную внутренней поверхности трубопровода. Трубопровод нагружен внутренним давлением p , учитывается действие внутреннего давления на поверхность трещины. Определяется коэффициент интенсивности напряжений в самой глубокой точке трещины (в конце малой полуоси). Относительная глубина трещины b/t находится в диапазоне $0 \leq b/t \leq 0,8$. Полудлина трещины на поверхности a рассматривается в диапазоне от $b/a = 1$ (полукруговая трещина) до $b/a = 0$ (протяженная трещина).

Коэффициент интенсивности напряжений K_I записывается в виде:

$$K_I = \frac{pR}{t} \left(\frac{\pi b}{Q} \right)^{0,5} \cdot F, \quad (1)$$

где $Q = 1 + 1,464 (b/a)^{1,65}$;

$F = 0,97 [M_1 + M_2 (b/t)^2 + M_3 (b/t)^4] f_c$;

$M_1 = 1,13 - 0,09 b/a$; $M_2 = -0,54 + 0,89 (0,2 + b/a)^{-1}$;

$M_3 = 0,5 - (0,65 + b/a)^{-1} + 14 \cdot (1 - b/a)^{24}$;

$$f_c = \frac{2(1 + t/R)^2}{2 + t/R} - 0,5 \left(\frac{b}{t} \right)^{0,5} \frac{t}{R}.$$

Введение поправочной функции f_c позволяет учесть различие между цилиндрической поверхностью и плоской пластиной при вычислении коэффициента интенсивности напряжений (при $t/R \rightarrow 0$ эта функция равна единице). Решение справедливо при $0,2 \leq b/t \leq 0,8$; $0,2 \leq b/a \leq 1$; $R/t \geq 4$. Для неглубоких трещин ($b/t < 0,2$) использовано решение для полуплоскости с краевой трещиной [4] и введен поправочный коэффициент, учитывающий влияние R/t . Для самых длинных трещин ($b/a < 0,2$) использовано решение для полосы с краевой трещиной [4] без учета влияния R/t , т. е. с незначительной ошибкой в безопасную сторону. Для значений $0 \leq b/t \leq 0,8$ с интервалом 0,1 значения $K_I / (\sigma \sqrt{\pi b})$ аппроксимированы как функции b/a .

Продольная внешняя трещина

Постановка задачи аналогична предыдущей. Используются результаты работы [4], в которой получены значения коэффициента ин-

тенсивности напряжений для полуэллиптической трещины, расположенной на внутренней и наружной поверхностях трубопровода при действии усилий, нормальных к поверхности трещины. В этой работе рассматривается плоская пластина с протяженной краевой трещиной. К пластине на бесконечности приложены усилия, нормальные к плоскости трещины. Коэффициент интенсивности напряжений K_0 в пластине определяется по формуле:

$$K_0 = \sigma \sqrt{\pi b} (1,1216 + 6,5200 \xi^2 - 12,3877 \xi^4 + 89,0554 \xi^6 - 188,6080 \xi^8 + 207,3870 \xi^{10} - 32,0524 \xi^{12}),$$

где $\xi = b/t$.

Далее в [5] получены значения K_I/K_0 , где K_I — значение коэффициента интенсивности напряжений в наиболее глубокой точке фронта полуэллиптической трещины. В данной работе на основании этих данных были проведены расчеты, причем учитывалась неравномерность распределения напряжений по толщине трубопровода при его работе в условиях внутреннего давления. Расчет показал, что для внутренней и внешней трещин можно использовать одну и ту же поправочную функцию в формуле (1), если напряжения определять с учетом неравномерности их распределения по толщине трубопровода. Так же как для внутренней трещины значения $K_I / (\sigma \sqrt{\pi b})$ аппроксимированы как функции b/a с интервалом 0,1 для $0 \leq b/t \leq 0,8$.

Принято предположение, что после того как глубина трещины достигла величины $0,8 t$, трещина выходит на поверхность и становится сквозной трещиной длиной $2a$. В этом случае, в зависимости от размеров трещины, уровня напряжения и величины K_{Ic} , может возникнуть ее неустойчивое распространение. Для анализа этого в данной работе проведен расчет коэффициента интенсивности напряжений в вершине сквозной трещины, по достижении которого трещина становится неустойчивой. Формулы для расчета коэффициента интенсивности напряжений в вершине сквозной трещины в цилиндрической оболочке с осевой трещиной длиной $2a$ под действием окружных напряжений σ приведены в [6]. Коэффициент интенсивности напряжений K_I определяется по формуле:

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi b} \cdot F. \quad (2)$$

Функция F нами была аппроксимирована в виде:

$$F = 1 + 0,07333 \lambda + 0,12829 \lambda^2 - 0,01092 \lambda^3,$$

$$\text{где } \lambda = \frac{[12(1 - \nu^2)]^{0,25} a}{\sqrt{Rt}};$$

ν – коэффициент Пуассона.

Поперечные внутренние и внешние трещины

Рассматривается поверхностный дефект, представляющий собой плоскую полуэллиптическую трещину, перпендикулярную поверхности трубопровода. Трубопровод нагружен внутренним давлением p , учитывается действие внутреннего давления на поверхность трещины. Определяется коэффициент интенсивности напряжений в самой глубокой точке трещины (в конце малой полуоси). Относительная глубина трещины b/t находится в диапазоне $0,2 \leq b/t \leq 0,8$.

Отношение полуосей полуэллипса b/a рассматривается в диапазоне от значения $b/a = 1 / \sqrt{[2(R/t + 1) / b/t] - 1}$ для наружной трещины и от значения $b/a = b/R$ для внутренней трещины до $b/a = 1$ (полукруговая трещина). Наиболее опасной при заданной глубине трещины b является кольцевая трещина, полностью охватывающая наружную или внутреннюю поверхность цилиндра. Для ее расчета использованы результаты [4] для полосы с краевой трещиной с незначительной ошибкой в безопасную сторону. Для определения значений коэффициента интенсивности напряжений для полуэллиптической поперечной трещины, расположенной на наружной или внутренней поверхностях трубопровода, при действии внутреннего давления аналогично приведенным выше результатам используем данные [3]. По-прежнему определяем коэффициент интенсивности напряжений K_0 для соответствующей протяженной краевой трещины в плоской пластине.

Аналогично предположению для продольной трещины, для поперечной трещины принято, что после того как ее глубина достигла величины $0,8t$, трещина выходит на поверхность и становится сквозной окружной трещиной длиной $2a$. Формулы для расчета коэффициента интенсивности напряжений в вершине сквозной трещины в цилиндрической оболочке с окружной трещиной под действием осевых напряжений σ приведены в [6]. Коэффициент интенсивности напряжений K_t определяется аналогично коэффициенту интенсивности напряжений для продольной трещины.

Функция F нами была аппроксимирована в виде:

$$F = 1 + 0,0261 \lambda + 0,02636 \lambda^2 - 0,00178 \lambda^3,$$

где λ, ν – определяются так же, как для продольной трещины.

Значения $K_I / (\sigma \sqrt{\pi b})$ аппроксимированы как функции b/a .

Подповерхностные продольная и поперечная трещины

На рис. 3 представлена схема расположения подповерхностного дефекта и даны обозначения параметров дефектов. Минимальное расстояние от ближайшей поверхности трубопровода до дефекта обозначено lig (от английского *ligament*). Относительный поперечный размер дефекта лежит в диапазоне $0,2 \leq 2b/t \leq 0,8$.

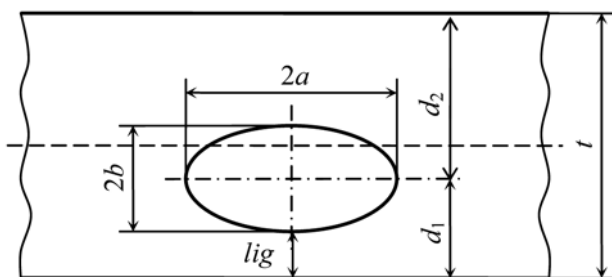


Рис. 3
Схема подповерхностного дефекта

Используются результаты, приведенные в [6] и в [7], полученные для полосы с подповерхностной трещиной. При расчете продольного дефекта была учтена неравномерность распределения окружных напряжений по толщине трубопровода. Определяется коэффициент интенсивности напряжений в точке, ближайшей к поверхности трубопровода (в конце малой полуоси). Рассматриваются трещины, поперечный размер которых удовлетворяет условию $b/d_1 \leq 0,8$. Поскольку $lig = b (d_1/b - 1)$, то величина минимального расстояния от ближайшей поверхности трубопровода до дефекта должна удовлетворять условию $lig \geq 0,25b$. Отношение полуосей трещины рассматривается в диапазоне $0,1 \leq b/a \leq 1$.

Коэффициент интенсивности напряжений в точке, ближайшей к поверхности, вычисляется по формуле:

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi b} M_1 M_2 / E(k)$$

где $E(k)$ – полный эллиптический интеграл второго рода, $k = \sqrt{1 - b^2/a^2}$;

$$M_1 = 0,9995 + 0,0005 \mu - 0,0001 \mu^2 - 0,0001 \mu^3 + \lambda_1 (0,2038 - 0,3856 \mu + 0,5519 \mu^2 - 0,2746 \mu^3) + \lambda_1^2 (-0,7489 - 0,6965 \mu + 0,9850 \mu^2 - 0,5678 \mu^3) + \lambda_1^3 (1,3763 - 1,0266 \mu + 0,4242 \mu^2 - 0,1049 \mu^3);$$

$$M_2 = 0,9999 + 0,0003 \mu - 0,0004 \mu^2 + 0,0002 \mu^3 + \lambda_2 (0,0282 - 0,2709 \mu + 0,5235 \mu^2 - 0,2845 \mu^3) + \lambda_2^2 (0,0978 + 0,2969 \mu - 1,0351 \mu^2 + 0,6648 \mu^3) + \lambda_2^3 (0,1206 - 0,4826 \mu + 0,8366 \mu^2 - 0,4603 \mu^3);$$

$$\mu = b/a; \lambda_1 = b/d_1; \lambda_2 = b/d_2; d_1 = b + lig; d_2 = t - d_1.$$

Значения $K_I / (\sigma \sqrt{\pi b})$ при $0 \leq b/t \leq 0,4$ аппроксимированы как функции b/a ; lig/t изменяется в промежутке $0,25b \leq lig \leq 0,5t - b$ с интервалом 0,025 или 0,05.

Если выполнено условие $lig \leq 0,25b$, то трещина рассчитывается как поверхностная (внутренняя или внешняя) глубиной $2b + lig$.

Оценка допустимости дефекта

Оценка допустимости обнаруженного дефекта проводится следующим образом:

1. определяются, мм, входящие геометрические параметры: радиус R и толщина стенки трубопровода t ; глубина трещины b (для поверхностных дефектов) или половина поперечного размера трещины b и расстояние от ближайшей поверхности трубопровода lig (для подповерхностных дефектов); половина длины трещины a ;
2. определяется напряжение, нормальное по отношению к плоскости, где расположена трещина. Если плоскость дефекта не совпадает ни с продольным, ни с поперечным направлением, то используется то направление, в котором имеют место максимально возможные значения напряжения (как правило, рассматриваются продольные дефекты), МПа;
3. определяется критическое значение коэффициента интенсивности напряжений материала трубопровода K_{Ic} , МПа $\sqrt{\text{мм}}$;
4. вычисляется параметр $A = (0,7 K_{Ic}) / (\sigma \sqrt{\pi b})$ (в данном случае коэффициент запаса был принят равным 0,7);
5. для геометрических параметров дефекта R/t , b/t и b/a по таблице (графику или с помощью аппроксимирующего полинома) [8] определяется параметр $A_T = K_I / (\sigma \sqrt{\pi b})$;

6. сравниваются значения A и A_T : если $A > A_T$, то трубопровод с дефектом работоспособен; если $A \leq A_T$, то трубопровод с дефектом неработоспособен. В последнем случае полученные данные позволяют получить критическое значение напряжения, при котором трубопровод становится неработоспособным, а именно, $\sigma_{кр} = (0,7 K_{Ic}) / (A_T \sqrt{\pi b})$. При $\sigma < \sigma_{кр}$ трубопровод с обнаруженным дефектом работоспособен.

Пример использования предложенной процедуры

В результате дефектации обнаружен продольный поверхностный дефект (трещина) с геометрическими параметрами: $R = 500$ мм; $t = 12,5$ мм; $b = 6,25$ мм; $a = 62,5$ мм.

Напряжение, нормальное к плоскости дефекта, равно $\sigma = 200$ МПа, тогда критическое значение коэффициента интенсивности напряжений $K_{Ic} = 5000$ МПа $\sqrt{\text{мм}}$.

Для $R/t = 40$; $b/t = 0,5$; $b/a = 0,1$ вычисляем параметр $A = 3,95$. Используем приведенную ниже таблицу: $A_T = 1,82$; $A > A_T$ – дефект допустим.

Критическое напряжение $\sigma_{кр} = 433$ МПа. При этом значении напряжения произойдет неустойчивое распространение трещины.

Если трещина протяженная, т. е. $b/a = 0$, то $A_T = 2,83$ и дефект также допустим, но критическое напряжение $\sigma_{кр} = 278$ МПа.

Продольная внутренняя трещина, значения $K_I / (\sigma \sqrt{\pi b})$ ($R/t = 40$)

$\frac{b/t}{b/a}$	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	сквозная
0	1,16	1,23	1,41	1,71	2,17	2,83	4,15	6,55	12,3	∞
0,1	1,11	1,15	1,23	1,36	1,56	1,82	2,23	2,70	3,77	6,43
0,2	1,07	1,08	1,12	1,20	1,30	1,42	1,56	1,70	1,84	3,05
0,3	1,01	1,02	1,05	1,10	1,17	1,26	1,35	1,44	1,52	2,16
0,4	0,96	0,96	0,98	1,02	1,07	1,13	1,19	1,25	1,31	1,76
0,5	0,90	0,90	0,92	0,95	0,98	1,03	1,07	1,11	1,15	1,52
0,6	0,85	0,85	0,86	0,88	0,91	0,94	0,97	1,00	1,03	1,36
0,7	0,80	0,80	0,81	0,82	0,84	0,86	0,89	0,91	0,93	1,24
0,8	0,75	0,75	0,76	0,77	0,78	0,80	0,81	0,83	0,85	1,15
0,9	0,71	0,71	0,71	0,72	0,73	0,74	0,75	0,76	0,77	1,08
1,0	0,67	0,67	0,67	0,67	0,68	0,69	0,70	0,71	0,71	1,02

Список литературы

1. Тимофеев О.Я., Чернов А.В., Осипенко А.В. и др. определение основных параметров рабочего проекта укладки морского подводного трубопровода. Тезисы конференции SubseaTech 2007. – СПб. – 25 – 28 июня 2007.
2. Степанов И.В., Тимофеев О.Я. и др. Экзарация дна дрейфующими ледовыми образованиями (данные натурных исследований и моделирование). Тезисы международной конференции RAO/CIS OFFSHORE 2001. – СПб., 11–12 сентября 2001.
3. J. C. Newman, Jr., I. S. Raju. Stress-Intensity Factors for Internal Surface Cracks in Cylindrical Pressure Vessels // Journal of Pressure Vessel Technology, 1980, Vol. 102, pp. 342–346.
4. H. Tada, P.C. Paris, G.R. Irwin. The Stress Analysis of Cracks Handbook, 3rd ed., 2000.
5. F. Delale, F. Erdogan. Application of the line-string model to a cylindrical shell containing a circumferential or axial part-through crack / Trans. ASME, Ser. E, Journal of Applied Mechanics, 1982, Vol. 49, pp. 97–102.
6. Мураками Ю. Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений. – М.: Мир, 1990.
7. M. Isida, H. Noguchi. Tension of a plate containing an embedded elliptic crack // Engineering Fracture Mechanics, 1984, Vol. 20, No. 3, pp. 387–408.
8. Руководство по техническому наблюдению за постройкой и эксплуатацией морских подводных трубопроводов. – СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2009.
9. Правила классификации и постройки морских подводных трубопроводов. – СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2009.

УДК 629.5.03

А.Ю. Бессонов, В.Б. Викулин, Н.Е. Жадобин, В.Б. Мачульский

ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ МЕХАНИЗМОВ ДВС

Введение

В настоящее время основное количество выпускаемых двигателей внутреннего сгорания (ДВС) базируется на применении центробежных регуляторов частоты вращения с различными конструкциями рычажных механизмов. Электронное управление судовыми энергетическими установками существенно расширяет возможность повышения уровня автоматизации управления судовым силовым оборудованием. Перевод ДВС судовых энергетических установок на электронное управление позволяет повысить эффективность их работы.

Электронный регулятор частоты вращения (ЭРЧВ) ДВС является главным средством, обеспечивающим автоматизированное управление режимами работы судовой энергетической установки. ЭРЧВ, в отличие от механических или гидромеханических регуляторов, обладает повышенной гибкостью управления дозирования топлива. Внедрение ЭРЧВ привело к применению электрических исполнительных механизмов.

Все электрические исполнительные механизмы можно разделить на две основные группы: электромагнитные и электродвигательные. К наиболее распространенным электродвигательным механизмам относятся электрические исполнительные механизмы с электродвигателями. В настоящее время в качестве электродвигателей электрических исполнительных механизмов применяются двигатели постоянного тока с якорным управлением, двухфазные асинхронные двигатели, шаговые двигатели, подробное описание которых приводится в [3].

Как показывает анализ ЭРЧВ ДВС судовых энергетических установок [4] наряду с вышеперечисленными электродвигателями электрических исполнительных механизмов нашли применение: бесконтактные двигатели постоянного тока, линейные шаговые двигатели (ЛШД) и двигатели постоянного тока, малоинерционные двигатели постоянного тока.

Бесконтактные двигатели постоянного тока

Коллекторные двигатели постоянного тока обладают хорошими регулировочными свойствами и экономичны, но наличие скользящего контакта коллектор-щеткой ограничивает область их применения.

В настоящее время в связи с развитием силовой полупроводниковой электроники появились и начали получать все более широкое распространение бесконтактные двигатели постоянного тока. При замене механического коммутатора (коллектора со щетками) полупроводниковым коммутатором двигатель постоянного тока становится более надежным и долговечным, создает меньше радиопомех, особенно при высоких частотах вращения, когда очень быстро изнашиваются щетки и значительно увеличивается искрение и радиопомехи [5].

В отличие от обычного коллекторного двигателя бесконтактный двигатель постоянного тока обладает рядом характерных особенностей.

1. Силовая обмотка якоря расположена на статоре и состоит из нескольких катушек, сдвинутых относительно друг друга в пространстве. Ротор выполняют в виде постоянного магнита.
2. Положение оси магнитного потока ротора по отношению к осям катушек силовой обмотки статора определяется бесконтактными датчиками (трансформаторными, индукционными, магнитоэлектрическими, фотоэлектрическими).
3. Бесконтактный полупроводниковый коммутатор осуществляет коммутацию катушек силовой обмотки статора по сигналам датчиков положения. При мощности двигателей до 0,5 – 1 кВт в качестве коммутирующих элементов обычно используются транзисторы, при большей мощности – тиристоры.

Эти факторы позволяют при устранении скользящего контакта коллектор-щеткой сохранить основную особенность двигателя постоянного тока, заключающуюся в том, что частота переключения катушек обмотки якоря определяется частотой вращения ротора. Благодаря этому бесконтактный двигатель постоянного тока в основном

сохраняет характеристики коллекторного двигателя с независимым возбуждением.

Характеристики бесконтактных двигателей тем ближе к характеристикам классического двигателя постоянного тока, чем больше число обмоток на статоре. Однако пропорционально числу обмоток увеличивается необходимое число чувствительных элементов датчиков положения и число транзисторов в коммутаторе. Поэтому практически число обмоток более трех-четырех нецелесообразно.

В трехобмоточных двигателях питание обмоток статора происходит одновременно напряжениями, модулированными по синусному закону и сдвинутыми по фазе на 120° . При этом обмотки статора создают постоянный магнитный поток, вращающийся с частотой вращения ротора.

Коммутатор представляет инвертор напряжения, управляемый от датчиков положения ротора.

Малоинерционные двигатели постоянного тока

Описание малоинерционных двигателей постоянного тока приводится в [1, 2].

Малоинерционные двигатели постоянного тока выпускают двух видов: с полым немагнитным якорем и дисковым. Эти конструкции характерны только для микродвигателей (до 750 Вт) и двигателей малой мощности (до 2 кВт).

Двигатель с *полым немагнитным якорем* и возбуждением от постоянных магнитов изображен на рис. 1. Для уменьшения момента инерции якорь 2 выполнен в виде полого пластмассового цилиндра, в который запрессована обмотка из медного провода или на поверхность которого нанесена обмотка якоря, изготовленная методом фотографии.

Полый якорь вращается в зазоре между внешним 1 и внутренним 3 статорами. Внутренний статор выполнен в виде цилиндрического постоянного магнита с радиальной намагниченностью и служит для создания магнитного потока возбуждения. Внешний статор, изготовленный из магнитомягкого материала, является магнитопроводом. Напряжение на якорь подается через щетки 5 и коллектор 4.

Якорь с коллектором насажен на вал 9, который вращается в подшипниках 8, установленных в подшипниковых щитах 7, закрепленных в корпусе двигателя 6.

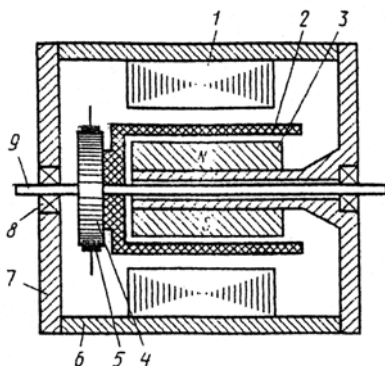


Рис. 1

Схема конструкции двигателя с полым немагнитным якорем

Момент инерции якоря такого двигателя значительно меньше, чем барабанного якоря. Возможно выполнение микродвигателя с расположением постоянного магнита на внешнем статоре.

Двигатели постоянного тока с *дисковым якорем* (рис. 2) выполняют не с цилиндрическим воздушным зазором, а с плоским. Возбуждение двигателя обеспечивается магнитами 1 с полюсными наконечниками 4 из магнитомягкой стали, имеющими форму кольцевых сегментов. Магнитный поток, создаваемый постоянными магнитами, проходит аксиально через два воздушных зазора, немагнитный дисковый якорь 5 с печатной обмоткой и замыкается по кольцам 2 и 3 из магнитомягкой стали, которые служат ярмом. Роль коллектора могут играть изолированные участки проводников, находящиеся на поверхности диска, по которым скользят щетки 6.

Якорь (рис. 1) представляет собой тонкий немагнитный диск 1 без пазов (из керамики, текстолита, алюминия) с печатной обмоткой. Проводники 2 печатной обмотки располагают радиально по обеим сторонам диска и соединяют через сквозные отверстия 3 в диске. Такое соединение выполняют автоматически одновременно с фотохимическим нанесением обмотки. При прохождении тока по обмотке якоря на валу двигателя создается вращающий момент в плоскости диска якоря. Момент инерции дискового якоря значительно меньше момента инерции барабанного якоря, что является одним из основных преимуществ рассматриваемых двигателей.

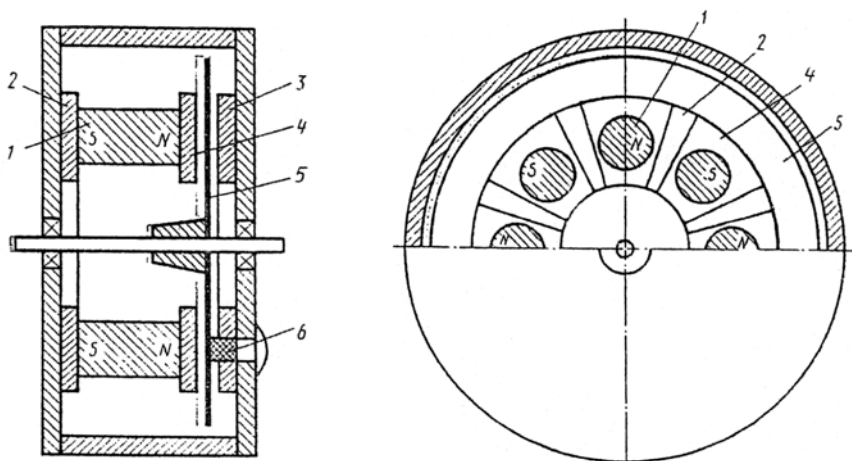


Рис. 2
Схема конструкции двигателя с дисковым якорем

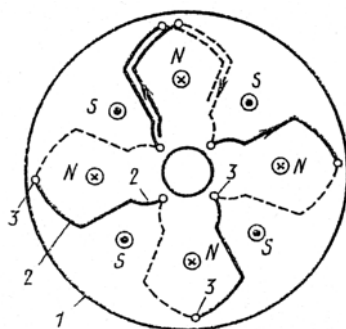


Рис. 3
Дисковый якорь с печатной обмоткой

У малоинерционных двигателей с полым и дисковым якорями вследствие уменьшения массы якоря и, соответственно, момента трения в подшипниках уменьшаются механические потери двигателя и напряжение трогания.

В малоинерционных микродвигателях немагнитный зазор, состоящий из двух воздушных зазоров и немагнитного слоя якоря, больше, чем в микродвигателях с барабанным якорем. Это приводит к необходимости применения для постоянных магнитов магнитотвердых материалов с большими значениями удельной магнитной энергии и коэрцитивной силы и, соответственно, более дорогих.

Двигатели с печатной обмоткой на дисковом якоре по сравнению с двигателями обычной конструкции имеют следующие преимущества:

- меньшую стоимость при массовом производстве ввиду устранения целого комплекса плохо поддающихся автоматизации работ, связанных с изготовлением обычной обмотки якоря;

- улучшенные динамические качества двигателя;

- незначительность электрической инерции печатной обмотки якоря;

- линейность механических характеристик при малой частоте вращения двигателя;

- безыскровую коммутацию ввиду малой индуктивности и взаимной индуктивности одновитковой коммутируемой секции;

- низкий уровень шумов и вибраций.

К числу недостатков можно отнести:

- меньшую долговечность, быстрый износ меди печатных проводников в месте установки коммутирующих щеток;

- повышенный размер немагнитного зазора при электромагнитной системе возбуждения, приводящий к снижению общего КПД двигателя и увеличению тепловой нагрузки;

- потери на вихревые токи в печатной обмотке, соизмеряемые с электромагнитной мощностью двигателя;

- повышенное сопротивление обмотки якоря вследствие высокой плотности тока в проводниках, что приводит к повышенным потерям в обмотке якоря и снижает жесткость механических характеристик двигателя.

Линейные двигатели постоянного тока

Описание линейного двигателя постоянного тока приводится в [1].

Линейный электрический двигатель представляет собой развернутый на плоскости двигатель вращательного типа, имеющий определенные конструктивные особенности, связанные со спецификой замыкания магнитного потока и механического движения.

На рис. 4 а показана схема электромагнитной системы *линейного бесконтактного двигателя*. Корпус индуктора 1 выполнен из фер-

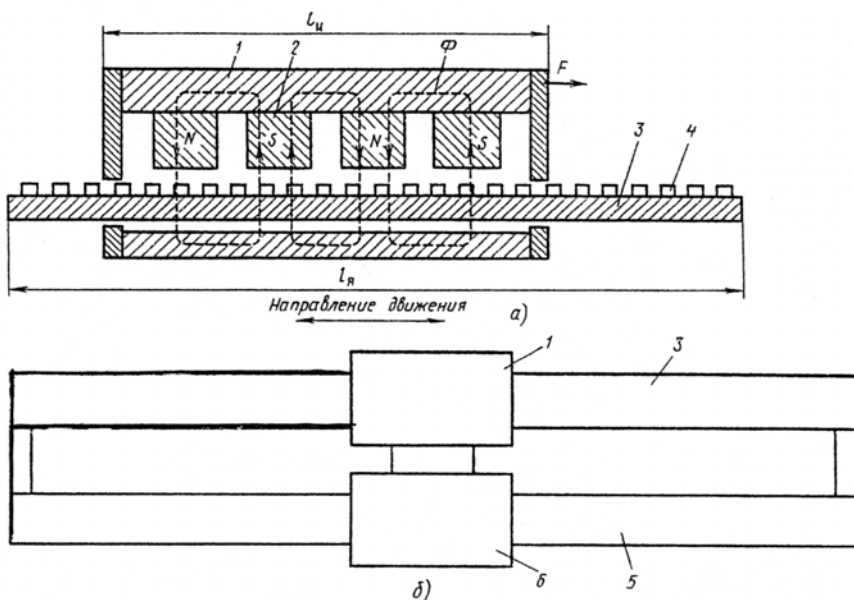


Рис. 4
Схема конструкции линейного бесконтактного двигателя постоянного тока (а)
и кинематического звена с линейным двигателем (б)

ромагнитного материала и служит внешним магнитопроводом. В корпусе расположены постоянные магниты 2, создающие поток возбуждения Φ , индуктор является подвижной частью линейного двигателя. Якорь 3 представляет собой диэлектрическую пластину, на поверхности которой методом фотографии выполнена печатная схема проводников 4. Якорь является неподвижной частью двигателя. Длина якоря $l_{\text{я}}$ больше длины индуктора $l_{\text{и}}$ на длину хода индуктора. Проводники якоря объединены в катушки, оси которых сдвинуты по длине якоря. Выводы катушек подсоединены к полупроводниковому коммутатору.

На рис. 4 б показана схема кинематического звена поступательного перемещения с линейным двигателем. Якорь 3 прикреплен к неподвижной направляющей 5, а индуктор 1 – к подвижной каретке 6. На направляющей по осям катушек якоря расположены сигнальные элементы, вызывающие срабатывание датчиков положения индуктора относительно якоря, расположенных на каретке.

Работа линейного бесконтактного двигателя почти не отличается от работы рассмотренного ранее вращательного бесконтактного двигателя. Отличие состоит в том, что силы электромагнитного взаимодействия тока якоря с полем возбуждения индуктора создают тяговое электромагнитное усилие F в плоскости якоря, которое приводит к поступательному перемещению индуктора.

Линейные шаговые двигатели

Шаговые двигатели (ШД) являются вращающимися двигателями с обеспечением вращения как по ходу, так и против хода часовой стрелки.

В случае линейного перемещения рабочих органов требуется преобразование вращательного движения в поступательное, осуществляемое с помощью различных кинематических механизмов. Последние являются источниками потерь мощности и, что особенно важно для прецизионных механизмов, вносят погрешность при отработке координатных перемещений. Применение ЛШД позволяет упростить кинематическую схему, устранив элементы, преобразующие вращательное движение в поступательное. ЛШД обеспечивают линейное перемещение рабочих органов. Видов линейных двигателей так же много, как и вращающихся; существуют линейные двигатели постоянного тока, асинхронные, синхронные и вентильные. ЛШД обладают известными преимуществами обычных вращающихся ШД и подобно им могут быть реактивными, с постоянными магнитами (индукторными, гибридными) – ЛШД-И. Не различаются они также по принципу действия [5].

ЛШД можно представить как развернутый на плоскости ШД вращающегося типа. В качестве примера на рис. 5 показан ЛШД-И. Подвижная часть ЛШД выполнена из электротехнической стали в виде двух П-образных магнитопроводов 2, на каждом из которых размещено по одной обмотке управления 1. Статор 4 представляет собой плиту из магнитомягкого материала; полюсы ротора и поверхность плиты, обращенная к нему, имеют зубчатую структуру. Подмагничивание магнитопроводов осуществляет постоянный магнит 3. Зубцовые деления τ_z статора и ротора равны. Зубцы полюсов ротора одного и того же магнитопровода сдвинуты относительно зубцов статора на $\tau_z / 2$ (для полюсов I и II) и на $\tau_z / 4$ (для полюсов III и IV). В результате такой конструкции зубцы всех полюсов ротора имеют различное расположение относительно зубцов статора, но магнитное сопротивление по-

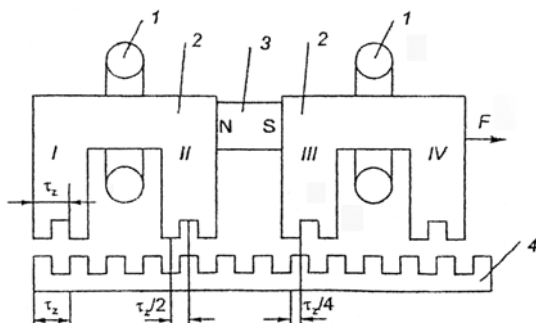


Рис. 5

Конструкция индикаторного ЛШД-И:

1 – обмотки; 2 – магнитопроводы ротора; 3 – постоянный магнит;
4 – статор; I–IV – полюсы ротора

току подмагничивания не зависит от перемещения ротора. Принцип работы ЛШД не отличается от ШД-И, с тем лишь исключением, что вместо вращающего момента создается сила F , направленная в плоскости статора. В зависимости от наличия возбуждения обмоток ось магнитного потока перемещается от полюса к полюсу, например по схеме I–III–II–IV, в результате чего ротор перемещается на величину зубцового деления τ_z . В каждом такте коммутации линейный шаг

$$\Delta x = \tau_z / k_r,$$

где k_r – число тактов коммутации.

На основании рассмотренного ЛШД можно построить модуль, обеспечивающий перемещение одновременно по нескольким координатам. При этом отдельный ЛШД предназначен для перемещения лишь по одной координате.

Список литературы

1. Арменский Е.В., Прокофьев П.А., Фалк Г.Б. Автоматизированный электропривод. – Л.: Высшая школа, 1987. – 143 с.
2. Волков Н.И., Миловзоров В.П. Электромашинные устройства автоматики. – М.: Высшая школа, 1986. – 335 с.

3. Жадобин В.П., Крылов А.П., Малышев В.А. Элементы и функциональные устройства судовой автоматики. – СПб.: Элмор, 1998. – 440 с.
4. Разработка требований РС к электронным регуляторам судовых дизелей // Отчет о научно-исследовательской работе РС-40/2006: руководитель темы Н.Е.Жадобин.
5. Фалк Г.Б. Технические средства автоматизации и управления: исполнительные устройства. – М.: Московский государственный институт электроники и управления. 2004. – 127 с.

А.Н. Казначеев, М.Ю. Семенов, Г.Н. Цицкиян

МОДЕРНИЗАЦИЯ НАГРУЗОЧНЫХ УСТРОЙСТВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СТАТИЧЕСКИХ РЕГУЛЯТОРОВ МОЩНОСТИ

Нагрузочные устройства в виде R , L -цепей со ступенчатой регулировкой являются основным средством тестирования судовых генераторов переменного тока до ввода их в эксплуатацию. Как правило, ступени нагрузки характеризуются коэффициентом мощности, отклонение которого допустимо в весьма узких пределах.

Недостатками существующих типовых нагрузочных устройств являются:

- высокая трудоемкость изготовления нагрузочных элементов, имеющих 18 отводов от 3-слойной обмотки соленоида;

- необходимость предварительной настройки нагрузочных устройств, путем переключения соответствующих отводов соленоидов к токоведущим шинам;

- невозможность оперативной подстройки в процессе испытаний; ступенчатость и ограниченный диапазон изменения нагрузки.

Положительными их качествами является то, что коэффициенты искажения синусоидальности кривых тока близки к нулю.

В статье рассматриваются перспективы модернизации типовых нагрузочных устройств с помощью статических регуляторов с целью устранения перечисленных недостатков.

Регулирование мощности с помощью статических регуляторов может осуществляться несколькими способами, к числу которых относятся:

- фазовое регулирование однофазными регуляторами при включении нагрузки в треугольник;

- фазовое регулирование 3-фазным полупроводящим регулятором при включении нагрузки в звезду;

- числоимпульсное регулирование соотношением числа полных периодов включенного состояния к числу периодов выключенного состояния.

Для активной мощности P , полной мощности S и квадрата коэффициента мощности λ^2 имеем:

$$P = I_{\text{ср.кв.}}^2 R; \quad S = I_{\text{ср.кв.}} U; \quad \lambda^2 = \left(\frac{P}{S} \right)^2 = \frac{PR}{U^2}.$$

При синусоидальном процессе с заданным действующим значением напряжения U , активном сопротивлении R и $\cos \varphi_n$ для активной мощности нагрузки можно записать следующим образом:

$$P_n = (U^2/R) \cos^2 \varphi_n.$$

Подставляя U^2/R из выражения для активной мощности нагрузки P_n , находим, что

$$\lambda^2 = P/P_n \cos^2 \varphi_n$$

с последующей записью выражения для коэффициента мощности в виде:

$$\lambda = \cos \varphi_n \sqrt{P/P_n}.$$

Полученное выражение показывает, что изменение коэффициента мощности в процессе регулирования зависит только от активной мощности, и тогда способ регулирования следует выбирать из условий, при которых искажения синусоидальности кривой тока минимальны.

Из кривой (рис. 1) видно, что регулирование активной мощности при сохранении коэффициента мощности в пределах $\pm 5\%$ возможно только в диапазоне от 100 % до 80 % активной мощности.

Для оценки коэффициента искажений синусоидальности кривых тока были проведены эксперименты по регулированию активной мощности перечисленными способами, определены коэффициенты искажений синусоидальности тока K_i для различных режимов, где $K_i = \sqrt{(\sum_2^N I_n^2 / I_1^2)} \cdot 100\%$, и I_n – действующее значение n -ой гармоники тока.

Установлено, что регулирование с помощью трехфазного полупроводящего регулятора приводит к значительным искажениям кривой тока во всем диапазоне нагрузок. Поэтому применение полупроводящего регулятора представляется нецелесообразным. На рис. 2 и 3 представлены осциллограммы и спектрограммы кривых тока при регулировании активной мощности трехфазным полупроводящим регулятором, подтверждающие этот вывод.

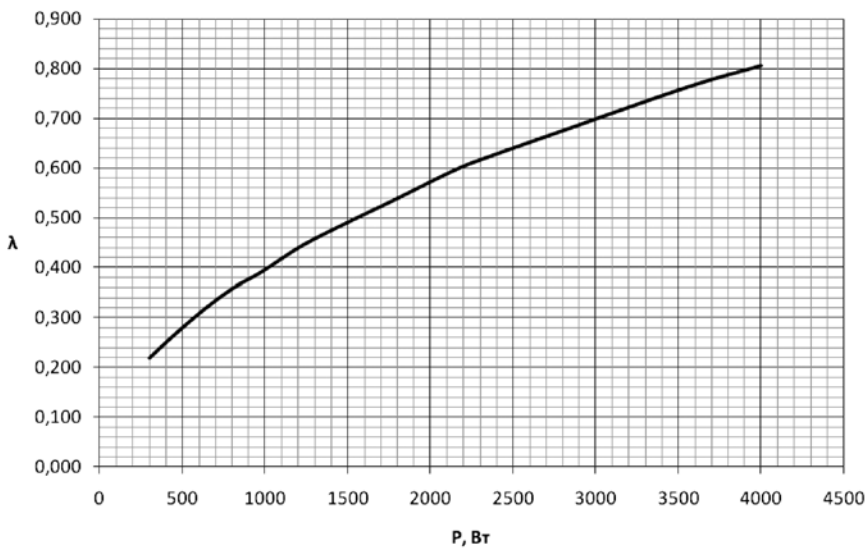


Рис. 1
Экспериментально полученная зависимость коэффициента λ
от активной мощности P

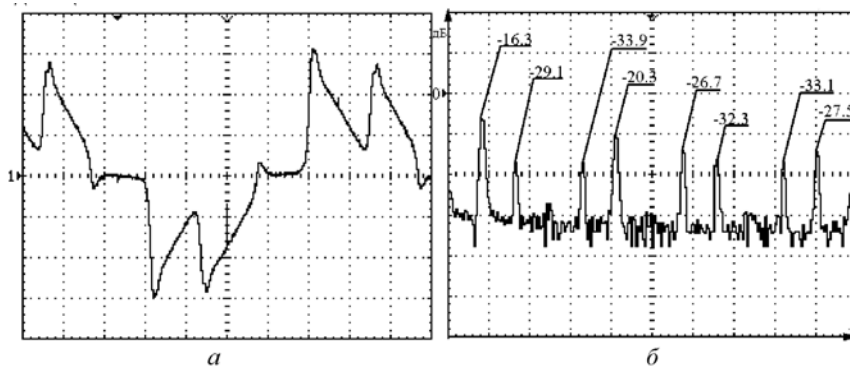


Рис. 2
Осциллограмма и спектрограмма тока при $P = 0,9 P_n$
 $K_f = 76 \%$

Примечание: Цена деления оси по оси абсцисс на спектрограммах рис. 2–6, 9–11 составляет 62,5 Гц.

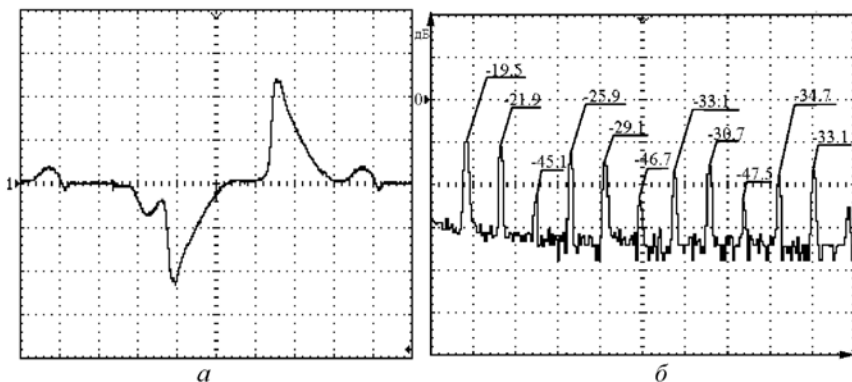


Рис. 3
Осциллограмма и спектрограмма тока при $P = 0,4 P_H$
 $K_f = 95 \%$

Способ числоимпульсного регулирования мощности нагрузочного устройства приводит к появлению выраженных низкочастотных составляющих тока (рис. 4 б) и представляется также нецелесообразным.

В спектрограмме тока (рис. 4 б) присутствуют гармоники с частотой 12,5 Гц, 25 Гц, 37,5 Гц, 50 Гц, 62,5 Гц, 75 Гц, 87,5 Гц.

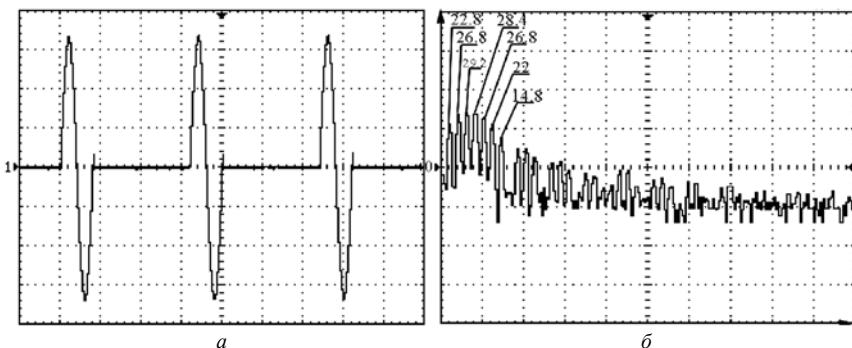


Рис. 4
Осциллограмма и спектрограмма тока при $P = 0,3 P_H$

Минимальные искажения тока получены при регулировании с помощью фазового регулирования однофазным регулятором (рис. 5, 6).

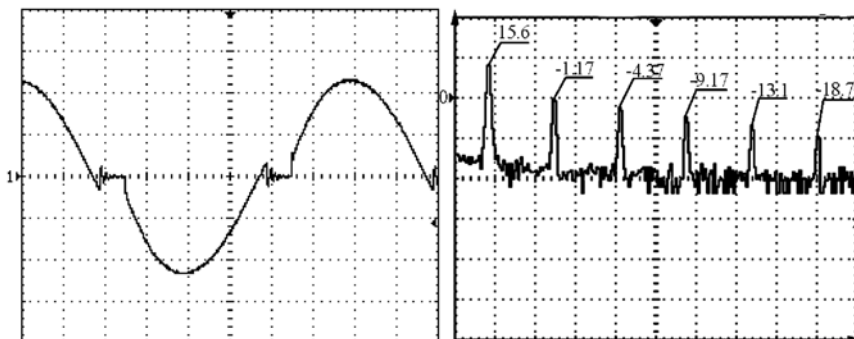


Рис. 5
Осциллограмма и спектрограмма тока при $P = 0,7 P_n$
 $K_\gamma = 19 \%$

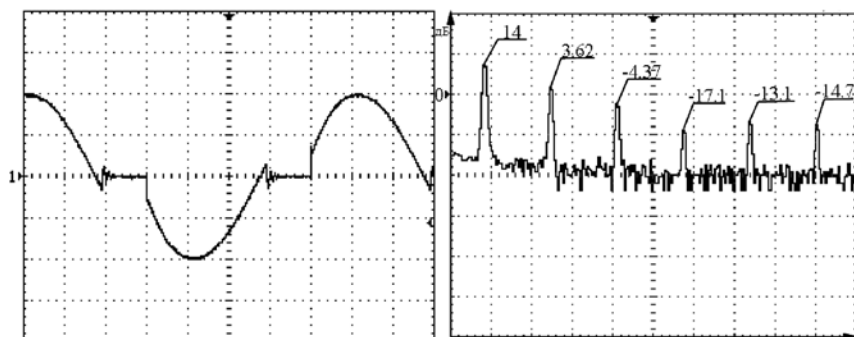


Рис. 6
Осциллограмма и спектрограмма тока при $P = 0,44 P_n$
 $K_\gamma = 33 \%$

Для расширения диапазона регулирования при сохранении в допустимых пределах коэффициента мощности и уменьшении искаже-

ний синусоидальности кривой тока могут быть использованы по два регулятора в каждой фазе по схеме рис. 7.

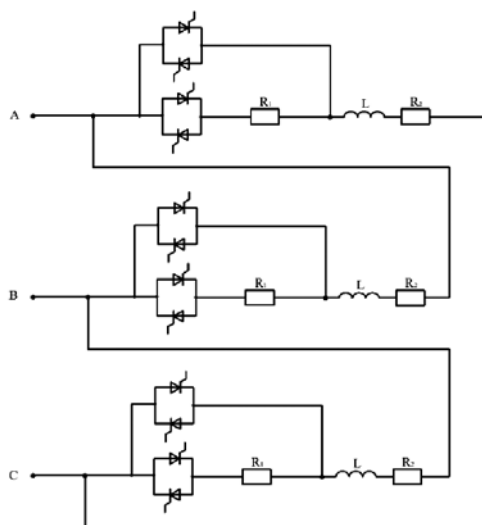


Рис. 7

Схема регулирования мощности в трехфазной сети двумя регуляторами в каждой фазе с шунтированием активной нагрузки

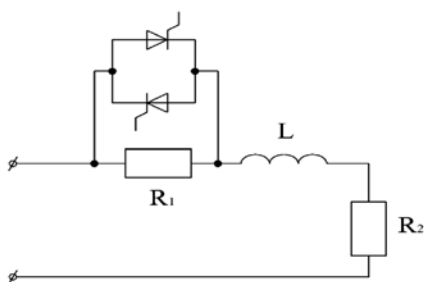


Рис. 8

Схема регулирования мощности с шунтированием активной нагрузки

Для проверки способа регулирования с шунтированием активной нагрузки и определения коэффициента искажений синусоидальности кривой тока был поставлен эксперимент по схеме рис. 8. Результаты эксперимента отражены на рис. 9 – 12.

Результаты эксперимента показывают, что регулирование способом шунтирования активной нагрузки позволяет сохранить коэффи-

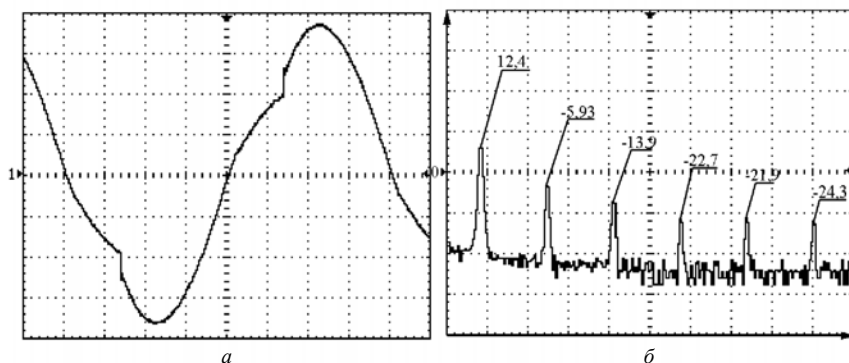


Рис. 9
Осциллограмма и спектрограмма тока при $P = 0,81 P_n$
 $K_\gamma = 13 \%$

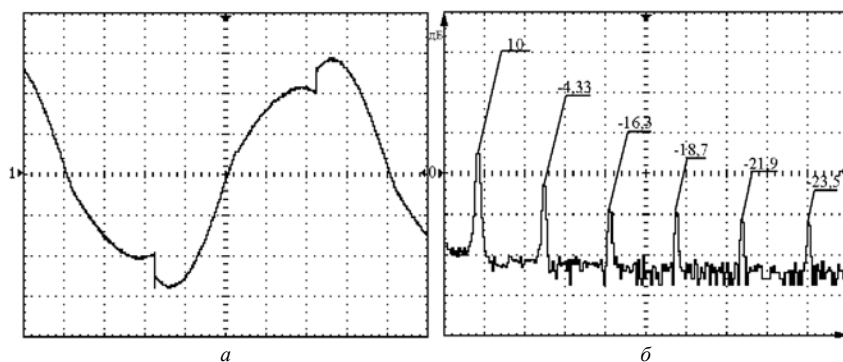


Рис. 10
Осциллограмма и спектрограмма тока при $P = 0,64 P_n$
 $K_\gamma = 20 \%$

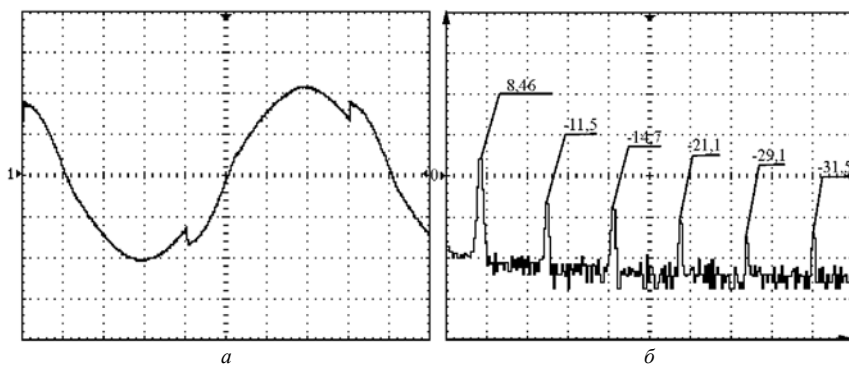


Рис. 11
Осциллограмма и спектрограмма тока при $P = 0,58 P_n$
 $K_f = 12 \%$

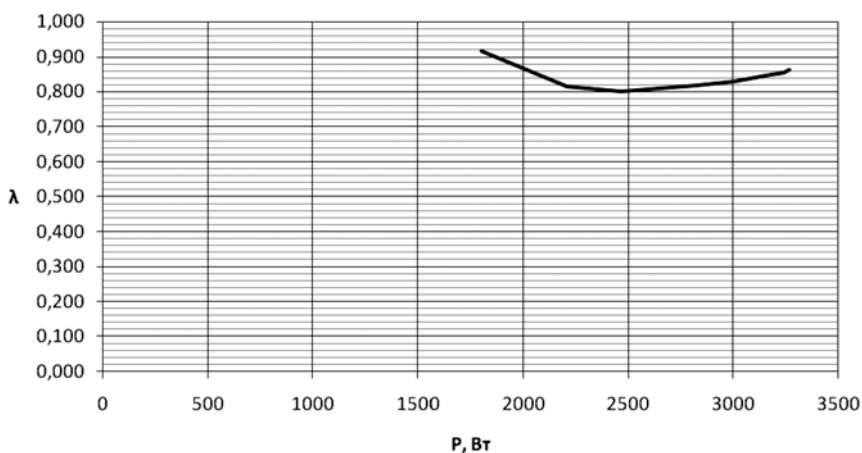


Рис. 12
Зависимость коэффициента мощности λ от изменения активной мощности P
при шунтировании активной нагрузки статическим регулятором

циент мощности λ в пределах $\pm 5 \%$, а коэффициент искажений синусоидальности кривой тока K_f , в пределах 20 %, в диапазоне регулирования активной мощности от 100 % до 40 % мощности ступени. При

подключении ступеней нагрузки регулирование мощности возможно от 0 до 100 %. Использование описанного способа в одной из ступеней нагрузочного устройства позволяет создать универсальное нагрузочное устройство с плавным регулированием мощности и расширенным диапазоном напряжений испытываемых генераторов. Таким образом, модернизация нагрузочного устройства может быть успешно реализована с использованием статических регуляторов мощности, на основе способа регулирования с шунтированием активной нагрузки.

Список литературы

1. Правила классификации и постройки морских судов. Т. 2. – СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2010.
2. ГОСТ 13109-97. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: ИПК Издательство стандартов, 1998.
3. У и л ь я м с Б. Силовая электроника: приборы, применение, управление // Справочное пособие / Пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1993.

УДК 629.5.72:543.444

В.В. Дерябин, А.Е. Сазонов

О ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ МОДЕЛИ СЧИСЛЕНИЯ ПУТИ СУДНА

В настоящее время основным средством определения координат местоположения судна стали спутниковые навигационные системы (СНС) и интегрированные системы навигации (ИСН). Это привело к уменьшению числа исследований по дальнейшему совершенствованию автономных навигационных систем (АНС). Основой определения координат местоположения судна и других его навигационных параметров движения (НПД) стали СНС, которые, по сравнению с АНС, позволяют обеспечить более высокую точность и непрерывность их определения [1].

Однако и СНС обладают рядом недостатков. Это, прежде всего:

отсутствие автономности;

невозможность использования в тех случаях, когда сигнал должен преодолеть непрозрачную для радиоволн среду;

существующая значительная зашумленность принимаемых сигналов; и

отсутствие достаточной целостности системы, т. е. отсутствие гарантии того, что заданная вероятность обнаружения ошибки в определенный промежуток времени с момента ее появления будет всегда обеспечена.

Последние два недостатка СНС, в какой-то мере, компенсируются в ИСН использованием АНС. Эта компенсация оказывается возможной благодаря следующим особенностям этих систем.

В АНС ошибки измерений стабильны в короткие промежутки времени. Ошибки же СНС стабильны в длительные промежутки времени. Различный характер этих ошибок позволяет выполнить совместную обра-

ботку измерений, выполненных АНС и ИСН, с целью определения НПД с минимальным значением средней квадратической ошибки. Эту операцию принято называть «комплексирование навигационных измерений». Используемые в ИСН оптимальные фильтры позволяют получать на их выходах текущую ошибку АНС. Интересно отметить, что появление ИСН привело к возможному упрощению и снижению стоимости АНС за счет некоторого допустимого ухудшения их точностных характеристик.

Однако существующие преимущества АНС, а именно, – меньшая зашумленность, независимость от внешних навигационных ориентиров и, следовательно, сравнительно большая их целостность по сравнению с СНС, заставляет искать пути устранения их основного недостатка – малой, по сравнению с СНС, точности определения НПД.

Причиной этого недостатка АНС является их зависимость не только от инструментальных ошибок измерителей скорости и курса судна, но и от неопределенного характера внешних факторов, воздействующих на судно.

Современные методы прогнозирования и измерения этих внешних факторов еще недостаточно совершенны. А для некоторых из них вообще не существует достаточно точных датчиков для измерения таких факторов (например, волнения моря). Кроме того, ИСН не исключили наличие структурных и параметрических неопределенностей в самих системах управления движением судна. Существующие пропорционально-интегрально-дифференциальные регуляторы (ПИД-регуляторы), реализующие принцип адаптации, не позволяют полностью исключить необходимость постоянной корректировки их параметров.

В то же время развитие в последние десятилетия теорий нечеткой логики и нейросетевых технологий для управления движением объектов в условиях неопределенности позволяет начать работы по их использованию для построения нейросетевой модели стабилизации судна на заданной траектории на основе АНС. Базовой задачей при этом является построение модели счисления пути судна. Конечной целью этих исследований должна явиться нейросетевая модель счисления пути судна, обеспечивающая точность определения НПД судна, соизмеримую с точностью, обеспечиваемой СНС. Эта нейросетевая модель явится основой построения системы автоматического управления (САУ), обеспечивающей стабилизацию движения судна на заданной траектории с заданной точностью.

Несмотря на многообразие задач, решаемых САУ на судах, их можно свести к трем основным типам [2]:

стабилизации;

программного управления;
слежения.

Блок-схемы структур САУ, позволяющих решать эти задачи, приведены на рис. 1. На блок-схеме приняты следующие обозначения:

РУ – регулирующее устройство (регулятор);

ИМ – исполнительные механизмы;

ОУ – объект управления;

$g(t)$ – задающее входное воздействие;

$f(t)$ – внешнее возмущающее воздействие.

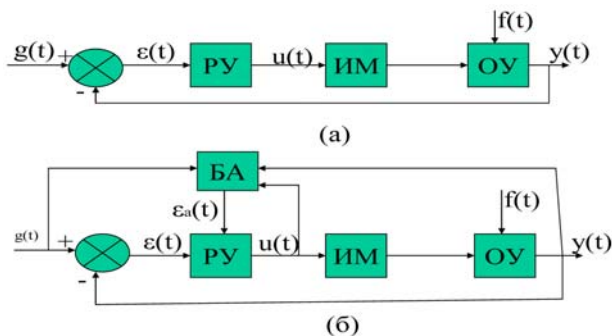


Рис. 1
Обобщенная структурная схема САУ

Необходимо отметить следующие характерные особенности приведенных типов САУ.

1. В САУ, решающих задачу стабилизации, всегда известны заданное значение регулируемой величины $g(t)$ и возможные диапазоны изменения возмущающих внешних воздействий $f(t)$. Примером такой САУ может быть система стабилизации судна на курсе.

2. При создании САУ с принципами программного управления всегда известен набор значений $g_i(t)$, ($i = 1, 2, \dots, n$) и известны основные сведения о характере внешних сил, действующих на ОУ ($f(t)$). Примером такой САУ может быть система дистанционного управления главным судовым двигателем.

3. В САУ, решающих задачу слежения, предполагается известным только диапазон изменения, как управляющих воздействий $g(t)$, так и

внешних возмущений $f(t)$. К таким САУ, вероятно, можно было бы отнести систему удержания судна на заданной траектории. Основой построения такой системы должна быть математическая модель счисления пути судна.

Из приведенных характеристик типов САУ можно сделать вывод, что по мере их усложнения влияние неопределенности нарастает при оценке как задающих, так и возмущающих воздействий.

Ради справедливости следует сказать, что существующая в настоящее время практика построения САУ позволяет уже и сейчас решать эти задачи, используя универсальные структуры ПИД-регуляторов. Однако по мере усложнения самого объекта управления и среды его существования возможности ПИД-регуляторов оказываются ограниченными и приходится переходить к созданию адаптивных САУ. Блок-схема такой системы представлена на рис. 1 б. На этой схеме, в отличие от предыдущей, имеется блок адаптации (БА). Задачей этого блока является анализ различных процессов, протекающих как в самой САУ, так и во внешней среде ее существования, и формирование сигнала $\varepsilon(t)$ для подстройки параметров ПИД-регулятора. В качестве регулятора может быть и обычный ПИД-регулятор.

Примером подобной судовой САУ может служить адаптивный авторулевой. Адаптивные ПИД-регуляторы позволяют в значительной мере исключить влияние неопределенности и повысить как их точность, так и надежность управления технологическими процессами. Однако все они имеют определенные ограничения и, как правило, в процессе эксплуатации требуют дополнительной коррекции своих основных характеристик (обычно коэффициентов). Это возникает при изменении параметров самого объекта управления, а также характера влияния внешних факторов. Примером может быть тот же адаптивный авторулевой. С точки зрения теории автоматического управления причиной ограничений является сложность синтеза алгоритмов и контроллеров для статистического и аналитического определения условий нахождения экстремума, заданного функционала качества САУ. Это, в свою очередь, приводит к усложнению САУ, снижению их быстродействия и, как следствие, к снижению степени устойчивости и надежности их функционирования. Применительно к САУ, решающим задачу стабилизации движения судна на заданной траектории, в этой связи можно назвать отсутствие полной априорной информации об особенностях характера внешних факторов, воздействующих на судно, и законах их изменения. Следствием этих причин является в настоящее время поиск учеными новых путей для учета и компенсации воздействия на

САУ существующих неопределенностей при оценке как внешних, так и внутренних факторов, влияющих на поведение САУ.

Основой решения этой задачи является правильный выбор путей, позволяющих в явном или неявном виде аккумулировать знания о поведении объекта управления и среде его движения. Нейросетевые технологии позволяют аккумулировать знания в неявных формах для их последующей обработки.

Интересно отметить, что нейронные сети уже и в настоящее время используются в САУ, но только при наличии заданной модели движения объекта управления, и применяются для подстройки коэффициентов регулятора, обеспечивая минимальное рассогласование между выходами объекта и эталонной модели [3].

Построение интеллектуальных систем управления на базе нейросетевых технологий предполагает, прежде всего, построение такой структуры нейронной сети, которая позволит в процессе ее обучения аккумулировать знания, достаточные для формирования законов управления САУ.

На современном этапе развития САУ нейронные сети используются для:

- построения нейросетевых регуляторов; и

- построения нейросетевых моделей.

Эти две задачи тесно взаимосвязаны, так как, не имея нейросетевой модели, невозможно определить законы формирования управляющих нейросетевым регулятором воздействий.

В статьях [4, 5] были уже частично изложены результаты исследований авторов по анализу существующих принципов нейроуправления и формирования нейронной сети для построения модели числения пути судна.

Настоящая статья продолжает знакомить специалистов классификационных обществ с новыми результатами исследований авторов в этой области.

Остановимся более подробно на постановке задачи.

В практике судовождения с давних времен существуют два принципиально различных метода определения координат места судна: числение и обсервация. Различие между ними заключается в том, что счисляемые координаты места судна определяются по результатам измерений его кинематических характеристик без использования информации от других навигационных ориентиров, находящихся вне судна, т. е. – автономно.

Обсервованные же координаты определяются по навигационным ориентирам, находящимся вне судна. Соотношение между числе-

нием и обсервацией обычно устанавливается следующим образом: значения числимых НПД корректируются с помощью значений НПД, полученных в результате обсервации. В промежутках между обсервациями использовались и используются числимые значения НПД.

Несмотря на появление ИСН, как уже отмечалось, разработка методов повышения точности счисления остается актуальной. Нужно еще раз отметить, что, во-первых, в особых обстоятельствах при нарушении целостности ИСН автономные системы остаются, вместе с астрономическими методами, единственными навигационными системами, позволяющими определить координаты местоположения судна. Во-вторых, в ИСН результат комплексирования данных обсервации и счисления будет тем точнее и надежнее, чем точнее будут известны числимые значения НПД. И, наконец, применение нейронной сети для создания модели счисления по сравнению с альтернативным вариантом использования для этой цели регрессионной модели имеет своим преимуществом тот факт, что исчезнет необходимость знать законы распределения исходных величин.

При построении модели счисления пути судна представляется целесообразным рассматривать этот процесс как некоторую *динамическую систему*, которая взаимодействует с внешней средой (ветер, волнение, течения). Реакцией судна на входные воздействия этих внешних факторов является изменение координат его центра тяжести.

Предположим, что модель, описывающая зависимость числимых координат от времени в условиях воздействия внешних факторов, является *линейной*. Это означает, что для любого момента времени t будет справедливо следующее соотношение:

$$Y(t) = W \cdot X(t),$$

где $Y(t) = \begin{pmatrix} y_1(t) \\ y_2(t) \end{pmatrix}$ – вектор числимых координат;

$W = \begin{pmatrix} \omega_{12} & \dots & \omega_{1,32} \\ \omega_{21} & \dots & \omega_{2,32} \end{pmatrix}$ – матрица постоянных во времени весовых коэффициентов;

$X(t) = \begin{pmatrix} x_1(t) \\ \vdots \\ x_{32}(t) \end{pmatrix}$ – вектор входных величин, зависящих от внешних факторов.

Эти величины как функции времени полагаются, в общем случае, *нелинейными*, поэтому числимые координаты местоположения судна также будут иметь нелинейный закон изменения во времени.

Коэффициенты матрицы W нам не известны. Возникает задача получить их оценки по многократным значениям векторов $\{Y(t), X(t)\}$, полученным в результате натуральных наблюдений. Эти векторы будут рассматриваться в процессе обучения как образцы.

Для решения поставленной задачи будем использовать однослойную нейронную сеть, состоящую из двух нейронов. Входом и выходом для сети будут являться соответственно векторы $X(t)$ и $Y(t)$.

В качестве матрицы весовых коэффициентов используем матрицу W . Комбинированный ввод – правило формирования входного сигнала на нейрон – определим как сумму произведений компонент входного сигнала на соответствующие значения веса. Функцию активации каждого нейрона выберем тождественной. Общий вид нейросети представлен на рис. 2.

Таким образом, обучив описанную выше нейронную сеть, мы получим оценку $\hat{W}$ искомой матрицы весовых коэффициентов W с учетом той точности счислимых координат, которая достигается при данном значении этой матрицы.

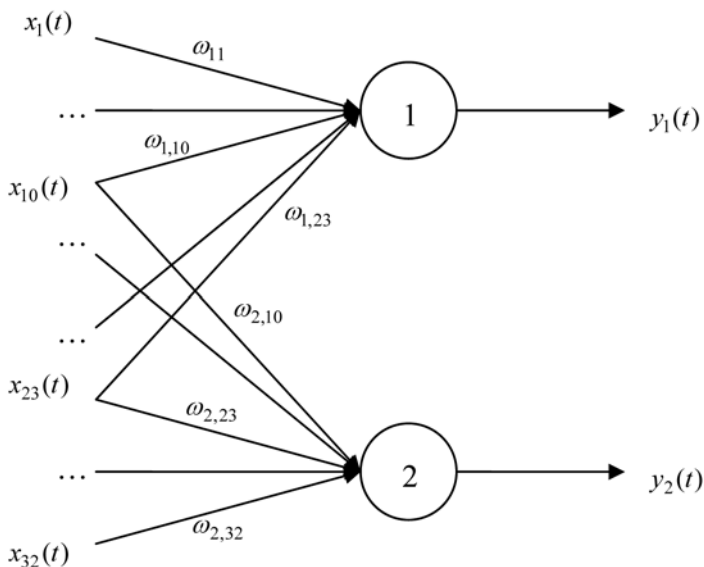


Рис. 2
Общий вид нейронной сети

Рассмотрим вопрос обучения нейронной сети более подробно. Пусть по результатам натурных наблюдений мы получили временную последовательность n образцов $\{Y(t_i), X(t_i)\}$, где $i = 0 \div n$ на некотором промежутке времени наблюдений $[0; t_n]$.

Для коррекции значений веса применим дельта-правило (правило Видроу-Хоффа). За ошибку будем принимать значение модуля невязки в момент i на промежутке t_n , т. е. разницу между текущим значением выхода нейрона и его образцом. Матрица коэффициентов изначально принимается нулевой. Параметр обучения может быть уменьшаемым от эпохи к эпохе. А именно: если от эпохи к эпохе ошибка не уменьшается, то значение параметра обучения уменьшается в 10 раз и обучение начинается вновь для данной эпохи. Начальное значение параметра обучения находится экспериментально. В качестве критерия окончания процесса обучения выбирается величина изменения максимального значения ошибки на интервале наблюдения от эпохи к эпохе.

Длительность времени t_n определяется исходя из того, чтобы после обучения можно было сказать: за время плавания t_n ошибка счисления (модуль невязки) будет не больше некоторого значения $c_{\max}$. Кроме того, очевидно, что чем больше t_n , тем точнее будет обучение, так как на больших промежутках времени мы имеем дело с большим числом образцов. Правда для обучения мы можем использовать несколько серий образцов из интервала $[0; t_n]$. Поэтому в качестве длительности t_n мы выберем четыре часа – время стандартной ходовой вахты.

Итак, представление погрешности счисления в виде (1) позволяет сформулировать задачу построения нейронной сети, коэффициенты которой постоянны во времени для данного судна. Результатом ее обучения является оценка $\tilde{W}$ матрицы неизвестных коэффициентов, обеспечивающая модуль невязки не более $c_{\max}$ в процессе обучения на имеющемся промежутке времени t_n . Покажем теперь, что уравнения модели счисления действительно можно представить в виде (1).

Прежде чем перейти к записи математической зависимости счисляемых координат от внешних факторов, необходимо определить ту систему координат, относительно которой мы будем рассматривать движение центра тяжести судна. Пусть в начальный момент времени $t = 0$ центр тяжести судна G находится в некоторой точке G_0 пространства. Проведем через эту точку плоскость меридианного эллипса и плоскость параллели. Будем считать, что плоскость равновесного положения поверхности моря перпендикулярна к этим двум плоскостям,

причем линии пересечения трех плоскостей сходятся в точке O . Ось Ox направим в сторону географического Севера, ось Oy – в сторону Востока. Третья ось Oz получается перпендикулярной первым двум и направленной вертикально вверх от плоскости поверхности моря. В дальнейшем мы будем рассматривать координаты (x_G, y_G) центра тяжести судна в неподвижной системе координат $Oxyz$.

Конечной целью любой модели счисления является получение координат центра тяжести судна $(x_G(t), y_G(t))$ в некоторый момент времени t . Важную роль играют при этом технические средства счисления. В качестве таковых могут выступать ИСН, комбинации различных типов лага и гирокомпаса.

Использование той или иной системы для определения счислимых координат обуславливает характер учета внешних факторов. В нашем случае будем предполагать, что на судне установлены индукционный лаг, измеряющий продольную составляющую относительной скорости судна (например, ИЭЛ-2М) и автономный гирокомпас (например, STANDARD-20).

Составляя уравнения динамики судна в условиях воздействия внешних факторов, можно показать, что значения счислимых координат центра тяжести судна $(x_G(t), y_G(t))$ в любой момент времени определяются соотношениями:

$$\begin{aligned}
 x_G(t) = & 1 \cdot \cos \psi_0 \cdot \int_0^t V_C \cos \bar{K}_C dt + \delta_{ГК} \cdot \cos \psi_0 \cdot \int_0^t V_C \sin \bar{K}_C dt + \tilde{k} \cdot \cos \psi_0 \cdot \\
 & \cdot \int_0^t G(t) V_C \sin \bar{K}_C dt + (-\delta_{ГЛ}) \cdot \cos \psi_0 \cdot \int_0^t \cos \bar{K}_C dt + (-\delta_{ГЛ} \cdot \delta_{ГК}) \cdot \cos \psi_0 \cdot \int_0^t \sin \bar{K}_C dt + \\
 & + (-\delta_{ГЛ} \cdot \tilde{k}) \cdot \cos \psi_0 \cdot \int_0^t G(t) \sin \bar{K}_C dt + \left(\frac{-k_1}{m(1+k_s)} \right) \cdot \cos \theta_0 \cdot \int_0^t \tilde{A}r_1(t) \sin \bar{K}_C dt + \\
 & + \left(\frac{-k_2}{2m(1+k_s)} \right) \cdot \cos \theta_0 \cdot \int_0^t \tilde{A}r_2(t) \sin \bar{K}_C dt + \left(\frac{-1}{m(1+k_s)} \right) \cdot \int_0^t \tilde{W}(t) \sin \bar{K}_C dt + \\
 & + \left(\frac{k_1 \cdot \delta_{ГК}}{m(1+k_s)} \right) \cdot \cos \theta_0 \cdot \int_0^t \tilde{A}r_1(t) \cos \bar{K}_C dt + \left(\frac{k_2 \cdot \delta_{ГК}}{2m(1+k_s)} \right) \cdot \cos \theta_0 \cdot \int_0^t \tilde{A}r_2(t) \cos \bar{K}_C dt + \\
 & + \left(\frac{\delta_{ГК}}{m(1+k_s)} \right) \cdot \int_0^t \tilde{W}(t) \cos \bar{K}_C dt + \left(\frac{k_1 \cdot \tilde{k}}{m(1+k_s)} \right) \cdot \cos \theta_0 \cdot \int_0^t G(t) \tilde{A}r_1(t) \cos \bar{K}_C dt + \\
 & + \left(\frac{k_2 \cdot \tilde{k}}{2m(1+k_s)} \right) \cdot \cos \theta_0 \cdot \int_0^t G(t) \tilde{A}r_2(t) \cos \bar{K}_C dt + \left(\frac{\tilde{k}}{m(1+k_s)} \right) \cdot
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \cdot \int_0^t G(t) \tilde{W}(t) \cos \bar{K}_C dt + \left(\frac{k_1}{k_3 + k_4 \cdot V_{OX1}(0)} \right) \cdot \cos \theta_0 \cdot Ar_1(0) \cdot [\cos \bar{K}_C(0) - \cos \bar{K}_C(t)] + \\
& + \left(\frac{k_1 \cdot \delta_{rK}}{k_3 + k_4 \cdot V_{OX1}(0)} \right) \cdot \cos \theta_0 \cdot Ar_1(0) \cdot [\sin \bar{K}_C(0) - \sin \bar{K}_C(t)] + \left(\frac{-k_1 \cdot \tilde{k}}{k_3 + k_4 \cdot V_{OX1}(0)} \right) \cdot \\
& \cdot \cos \theta_0 \cdot Ar_1(0) \cdot \int_0^t G(t) \cos \bar{K}_C dt + \left(\frac{k_2}{2k_3 + 2k_4 \cdot V_{OX1}(0)} \right) \cdot \cos \theta_0 \cdot Ar_2(0) \cdot [\cos \bar{K}_C(0) - \\
& - \cos \bar{K}_C(t)] + \left(\frac{k_2 \cdot \delta_{rK}}{2k_3 + 2k_4 \cdot V_{OX1}(0)} \right) \cdot \cos \theta_0 \cdot Ar_2(0) \cdot [\sin \bar{K}_C(0) - \sin \bar{K}_C(t)] + \\
& + \left(\frac{-k_2 \cdot \tilde{k}}{2k_3 + 2k_4 \cdot V_{OX1}(0)} \right) \cdot \cos \theta_0 \cdot Ar_2(0) \cdot \int_0^t G(t) \cos \bar{K}_C dt + \left(\frac{1}{k_3 + k_4 \cdot V_{OX1}(0)} \right) \cdot \\
& \cdot P_{\eta}(0) \cdot [\cos \bar{K}_C(0) - \cos \bar{K}_C(t)] + \left(\frac{\delta_{rK}}{k_3 + k_4 \cdot V_{OX1}(0)} \right) \cdot P_{\eta}(0) \cdot [\sin \bar{K}_C(0) - \sin \bar{K}_C(t)] + \\
& + \left(\frac{-\tilde{k}}{k_3 + k_4 \cdot V_{OX1}(0)} \right) \cdot P_{\eta}(0) \cdot \int_0^t G(t) \cos \bar{K}_C dt + 1 \cdot \int_0^t V_{TX}(t) dt, \quad (2)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
y_G(t) = & 1 \cdot \cos \psi_0 \cdot \int_0^t V_C \sin \bar{K}_C dt + (-\delta_{rK}) \cdot \cos \psi_0 \cdot \int_0^t V_C \cos \bar{K}_C dt + (-\tilde{k}) \cdot \cos \psi_0 \cdot \\
& \cdot \int_0^t G(t) V_C \cos \bar{K}_C dt + (-\delta_{\eta}) \cdot \cos \psi_0 \cdot \int_0^t \sin \bar{K}_C dt + \delta_{\eta} \cdot \delta_{rK} \cdot \cos \psi_0 \cdot \int_0^t \cos \bar{K}_C dt + \\
& + \delta_{\eta} \cdot \tilde{k} \cdot \cos \psi_0 \cdot \int_0^t G(t) \cos \bar{K}_C dt + \left(\frac{k_1}{m(1 + k_5)} \right) \cdot \cos \theta_0 \cdot \int_0^t \tilde{A}r_1(t) \cos \bar{K}_C dt + \\
& + \left(\frac{k_2}{2m(1 + k_5)} \right) \cdot \cos \theta_0 \cdot \int_0^t \tilde{A}r_2(t) \cos \bar{K}_C dt + \left(\frac{1}{m(1 + k_5)} \right) \cdot \int_0^t \tilde{W}(t) \cos \bar{K}_C dt + \\
& + \left(\frac{k_1 \cdot \delta_{rK}}{m(1 + k_5)} \right) \cdot \cos \theta_0 \cdot \int_0^t \tilde{A}r_1(t) \sin \bar{K}_C dt + \left(\frac{k_2 \cdot \delta_{rK}}{2m(1 + k_5)} \right) \cdot \cos \theta_0 \cdot \int_0^t \tilde{A}r_2(t) \sin \bar{K}_C dt + \\
& + \left(\frac{\delta_{rK}}{m(1 + k_5)} \right) \cdot \int_0^t \tilde{W}(t) \sin \bar{K}_C dt + \left(\frac{k_1 \cdot \tilde{k}}{m(1 + k_5)} \right) \cdot \cos \theta_0 \cdot \int_0^t G(t) \tilde{A}r_1(t) \sin \bar{K}_C dt + \\
& + \left(\frac{k_2 \cdot \tilde{k}}{2m(1 + k_5)} \right) \cdot \cos \theta_0 \cdot \int_0^t G(t) \tilde{A}r_2(t) \sin \bar{K}_C dt + \left(\frac{\tilde{k}}{m(1 + k_5)} \right) \cdot
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \cdot \int_0^t G(t) \tilde{W}(t) \sin \bar{K}_C dt + \left(\frac{k_1}{k_3 + k_4 \cdot V_{OX1}(0)} \right) \cdot \cos \theta_0 \cdot Ar_1(0) \cdot [\sin \bar{K}_C(0) - \sin \bar{K}_C(t)] + \\
& + \left(\frac{k_1 \cdot \delta_{rK}}{k_3 + k_4 \cdot V_{OX1}(0)} \right) \cdot \cos \theta_0 \cdot Ar_1(0) \cdot [\cos \bar{K}_C(0) - \cos \bar{K}_C(t)] + \left(\frac{k_1 \cdot \tilde{k}}{k_3 + k_4 \cdot V_{OX1}(0)} \right) \cdot \\
& \cdot \cos \theta_0 \cdot Ar_1(0) \cdot \int_0^t G(t) \sin \bar{K}_C dt + \left(\frac{-k_2}{2k_3 + 2k_4 \cdot V_{OX1}(0)} \right) \cdot \cos \theta_0 \cdot Ar_2(0) \cdot [\sin \bar{K}_C(0) - \\
& - \sin \bar{K}_C(t)] + \left(\frac{k_2 \cdot \delta_{rK}}{2k_3 + 2k_4 \cdot V_{OX1}(0)} \right) \cdot \cos \theta_0 \cdot Ar_2(0) \cdot [\cos \bar{K}_C(0) - \cos \bar{K}_C(t)] + \\
& + \left(\frac{k_2 \cdot \tilde{k}}{2k_3 + 2k_4 \cdot V_{OX1}(0)} \right) \cdot \cos \theta_0 \cdot Ar_2(0) \cdot \int_0^t G(t) \sin \bar{K}_C dt + \left(\frac{-1}{k_3 + k_4 \cdot V_{OX1}(0)} \right) \cdot \\
& \cdot P_\eta(0) \cdot [\sin \bar{K}_C(0) - \sin \bar{K}_C(t)] + \left(\frac{\delta_{rK}}{k_3 + k_4 \cdot V_{OX1}(0)} \right) \cdot P_\eta(0) \cdot [\cos \bar{K}_C(0) - \cos \bar{K}_C(t)] + \\
& + \left(\frac{\tilde{k}}{k_3 + k_4 \cdot V_{OX1}(0)} \right) \cdot P_\eta(0) \cdot \int_0^t G(t) \sin \bar{K}_C dt + 1 \cdot \int_0^t V_{TY}(t) dt, \tag{3}
\end{aligned}$$

где θ_0 ψ_0 – постоянное значение углов соответственно крена и дифферента;

V_c – скорость судна по относительному лагу;

$\bar{K}_C$ – значение среднего курса на некотором интервале осреднения;

$\delta_{кр}$ δ_n – постоянные инструментальные погрешности соответственно гирокомпаса и лага;

m – масса судна;

k_1 – коэффициент аэродинамического сопротивления надводной части корпуса судна;

k_3 – коэффициент гидродинамического сопротивления подводной части корпуса судна;

k_5 – коэффициент присоединенных масс воды по поперечному направлению;

$V_{OX1}(0)$ – значение проекции вектора относительной скорости судна по направлению диаметральной плоскости;

V_{TX} V_{TY} – компоненты вектора скорости постоянного течения в локальной неподвижной системе координат.

Остальные величины определяются соотношениями:

$$\tilde{k} = \frac{k' \cdot B_1 \cdot l^2 \cdot (v_0^2 - \omega_*^2)}{4 g^2 \cdot H_r \cdot \omega_E},$$

где ω_E – угловая скорость вращения Земли;
 H_r – кинетический момент гиросферы;
 g – ускорение свободного падения;
 ω – круговая частота М. Шулера;
 ν_0 – частота собственных колебаний гиросферы;
 l – расстояние между центром тяжести гиросферы и центром тяжести судна;
 B_1 – модуль маятникового момента гиросферы;
 k' – «поправочный» коэффициент, показывающий во сколько раз реальная девиация, вызванная качкой судна, больше расчетной;

$$G(t) = \frac{\theta_0^2 \cdot \omega_K^4 \cdot \sin 2\bar{K}_C(t)}{\cos \varphi \cdot (\omega_K^2 - \nu_0^2)},$$

где θ_0, ω_K – соответственно амплитуда и круговая частота бортовой качки;
 φ – значение широты места;

$$k_2 = \pi [1 + 0,77 \cdot (B/L)] \cdot L \cdot \rho_B \cdot H_{cp},$$

где B – наибольшая ширина надводной части корпуса судна;
 L – среднее по высоте надводной части корпуса значение длины судна;
 ρ_B – плотность атмосферного воздуха;
 H_{cp} – среднее по длине L значение высоты надводной части корпуса над водной поверхностью;

$$k_4 = \pi [1 + 0,77 \cdot (B'/L')] \cdot L' \cdot \rho_B \cdot T_{cp},$$

где B' – наибольшая ширина подводной части корпуса судна;
 L' – среднее по осадке значение длины судна;
 $\rho_{вод}$ – плотность воды;
 T_{cp} – средняя осадка судна;

$$\tilde{W}(t) = \int_0^t P_{\eta}(t) dt,$$

где $P_{\eta}(t) = \rho_{вод} \cdot g \cdot h \cdot [A \cdot \sin(2\pi t/\tau) - B \cdot \cos(2\pi t/\tau)]$,
 причем здесь h, τ – соответственно высота и кажущийся период волны, а коэффициенты при тригонометрических функциях определяются следующим образом:

$$A = \int_0^{\tau} \int_{-L}^L \sin\left(\frac{2\pi y \sin \gamma}{\lambda}\right) \cdot \cos\left(\frac{2\pi x \cos \gamma}{\lambda}\right) dx dz;$$

$$B = \int_0^{\tau} \int_{-L}^L \sin\left(\frac{2\pi y \sin \gamma}{\lambda}\right) \cdot \sin\left(\frac{2\pi x \cos \gamma}{\lambda}\right) dx dz;$$

γ – угол между направлением, противоположным бегу волн, и диаметральной плоскостью судна;

λ – длина волны;

T – осадка судна. Внутреннее интегрирование осуществляется в плоскости ватерлинии, внешнее – по осадке судна. При этом значения переменных интегрирования и ординаты y снимаются с теоретического чертежа.

$$Ar_1(t) = V_r(t) \cdot \sin \alpha(t), Ar_2(t) = V_r^2(t) \cdot \sin 2\alpha(t), \tilde{Ar}_1(t) = \int_0^t Ar_1(t) dt, \tilde{Ar}_2(t) = \int_0^t Ar_2(t) dt,$$

где $V_r(t)$ – модуль вектора относительного ветра;

$\alpha(t)$ – курсовой угол относительного ветра.

Таким образом, выражения (2), (3) позволяют заключить, что каждую из координат ($x_G(t)$, $y_G(t)$) можно представить в виде суммы произведений некоторых, не зависящих от времени коэффициентов и непрерывных функций времени, то есть в виде соотношения (1). При этом значения входных, выходных и весовых величин определяются следующим образом:

$$\begin{aligned} \omega_{11} &= \delta_{ГК}; \omega_{12} = \tilde{k}; \omega_{13} = -\delta_n \cdot \tilde{k}; \omega_{14} = \frac{k_1 \cdot \tilde{k}}{m(1+k_5)}; \omega_{15} = \frac{k_2 \cdot \tilde{k}}{2m(1+k_5)}; \\ \omega_{16} &= \frac{\tilde{k}}{m(1+k_5)}; \omega_{17} = \frac{-k_1 \cdot \tilde{k}}{k_3+k_4 \cdot V_{OX1}(0)}; \omega_{18} = \frac{-k_2 \cdot \tilde{k}}{2k_3+2k_4 \cdot V_{OX1}(0)}; \\ \omega_{19} &= \frac{-\tilde{k}}{k_3+k_4 \cdot V_{OX1}(0)}; \omega_{1,10} = -\delta_n; \omega_{1,11} = -\delta_n \cdot \delta_{ГК}; \omega_{1,12} = \frac{-k_1}{m(1+k_5)}; \\ \omega_{1,13} &= \frac{-k_2}{2m(1+k_5)}; \omega_{1,14} = \frac{k_1 \cdot \delta_{ГК}}{m(1+k_5)}; \omega_{1,15} = \frac{k_2 \cdot \delta_{ГК}}{2m(1+k_5)}; \\ \omega_{1,16} &= \frac{\delta_{ГК}}{m(1+k_5)}; \omega_{1,17} = \frac{-1}{m(1+k_5)}; \omega_{1,18} = \frac{k_1}{k_3+k_4 \cdot V_{OX1}(0)}; \\ \omega_{1,19} &= \frac{k_1 \cdot \delta_{ГК}}{k_3+k_4 \cdot V_{OX1}(0)}; \omega_{1,20} = \frac{k_2}{2k_3+2k_4 \cdot V_{OX1}(0)}; \omega_{1,21} = \frac{k_2 \cdot \delta_{ГК}}{2k_3+2k_4 \cdot V_{OX1}(0)}; \\ \omega_{1,22} &= \frac{1}{k_3+k_4 \cdot V_{OX1}(0)}; \omega_{1,23} = \frac{\delta_{ГК}}{k_3+k_4 \cdot V_{OX1}(0)}; \omega_{1,24} = \omega_{1,25} = \dots = \omega_{1,32} = 0; \\ \omega_{2,1} &= \omega_{2,2} = \dots = \omega_{2,9} = 0; \omega_{2,10} = -\omega_{1,11}; \omega_{2,11} = -\omega_{1,10}; \omega_{2,12} = \omega_{1,14}; \\ \omega_{2,13} &= \omega_{1,15}; \omega_{2,14} = -\omega_{1,12}; \omega_{2,15} = -\omega_{1,13}; \omega_{2,16} = -\omega_{1,17}; \omega_{2,17} = \omega_{1,16}; \\ \omega_{2,18} &= \omega_{1,19}; \omega_{2,19} = -\omega_{1,18}; \omega_{2,20} = \omega_{1,21}; \omega_{2,21} = -\omega_{1,20}; \omega_{2,22} = \omega_{1,23}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&\omega_{2,23} = -\omega_{1,22}; \omega_{2,24} = -\omega_{1,1}; \omega_{2,25} = -\omega_{1,2}; \omega_{2,26} = -\omega_{1,3}; \omega_{2,27} = \omega_{1,4}; \\
&\omega_{2,28} = \omega_{1,5}; \omega_{2,29} = \omega_{1,6}; \omega_{2,30} = -\omega_{1,7}; \omega_{2,31} = -\omega_{1,8}; \omega_{2,32} = \omega_{1,9}; \\
&x_1(t) = \cos \psi_0 \cdot \int_0^t V_c \sin \bar{K}_c dt; x_2(t) = \cos \psi_0 \cdot \int_0^t G V_c \sin \bar{K}_c dt; \\
&x_3(t) = \cos \psi_0 \cdot \int_0^t G \sin \bar{K}_c dt; x_4(t) = \cos \theta_0 \cdot \int_0^t G \tilde{A} r_1 \cos \bar{K}_c dt; \\
&x_5(t) = \cos \theta_0 \cdot \int_0^t G \tilde{A} r_2 \cos \bar{K}_c dt; x_6(t) = \int_0^t G \tilde{W} \cos \bar{K}_c dt; \\
&x_7(t) = \cos \theta_0 \cdot A r_1(0) \cdot \int_0^t G \cos \bar{K}_c dt; x_8(t) = \cos \theta_0 \cdot A r_2(0) \cdot \int_0^t G \cos \bar{K}_c dt; \\
&x_9(t) = P_\eta(0) \cdot \int_0^t G \cos \bar{K}_c dt; x_{10}(t) = \cos \psi_0 \cdot \int_0^t \cos \bar{K}_c dt; \\
&x_{11}(t) = \cos \psi_0 \cdot \int_0^t \sin \bar{K}_c dt; x_{12}(t) = \cos \theta_0 \cdot \int_0^t \tilde{A} r_1 \sin \bar{K}_c dt; \\
&x_{13}(t) = \cos \theta_0 \cdot \int_0^t \tilde{A} r_2 \sin \bar{K}_c dt; x_{14}(t) = \cos \theta_0 \cdot \int_0^t \tilde{A} r_1 \cos \bar{K}_c dt; \\
&x_{15}(t) = \cos \theta_0 \cdot \int_0^t \tilde{A} r_2 \cos \bar{K}_c dt; x_{16}(t) = \int_0^t \tilde{W} \cos \bar{K}_c dt; x_{17}(t) = \int_0^t \tilde{W} \sin \bar{K}_c dt; \\
&x_{18}(t) = \cos \theta_0 \cdot A r_1(0) \cdot [\cos \bar{K}_c(0) - \cos \bar{K}_c(t)]; \\
&x_{19}(t) = \cos \theta_0 \cdot A r_1(0) \cdot [\sin \bar{K}_c(0) - \sin \bar{K}_c(t)]; \\
&x_{20}(t) = \cos \theta_0 \cdot A r_2(0) \cdot [\cos \bar{K}_c(0) - \cos \bar{K}_c(t)]; \\
&x_{21}(t) = \cos \theta_0 \cdot A r_2(0) \cdot [\sin \bar{K}_c(0) - \sin \bar{K}_c(t)]; \\
&x_{22}(t) = P_\eta(0) \cdot [\cos \bar{K}_c(0) - \cos \bar{K}_c(t)]; \\
&x_{23}(t) = P_\eta(0) \cdot [\sin \bar{K}_c(0) - \sin \bar{K}_c(t)]; x_{24}(t) = \cos \psi_0 \cdot \int_0^t V_c \cos \bar{K}_c dt; \\
&x_{25}(t) = \cos \psi_0 \cdot \int_0^t G V_c \cos \bar{K}_c dt; x_{26}(t) = \cos \psi_0 \cdot \int_0^t G \cos \bar{K}_c dt; \\
&x_{27}(t) = \cos \theta_0 \cdot \int_0^t G \tilde{A} r_1 \sin \bar{K}_c dt; x_{28}(t) = \cos \theta_0 \cdot \int_0^t G \tilde{A} r_2 \sin \bar{K}_c dt; \\
&x_{29}(t) = \int_0^t \tilde{W} G \sin \bar{K}_c dt; x_{30}(t) = \cos \theta_0 \cdot A r_1(0) \cdot \int_0^t G \sin \bar{K}_c dt; \\
&x_{31}(t) = \cos \theta_0 \cdot A r_2(0) \cdot \int_0^t G \sin \bar{K}_c dt; x_{32}(t) = P_\eta(0) \cdot \int_0^t G \sin \bar{K}_c dt; \\
&y_1(t) = x_G - \cos \psi_0 \cdot \int_0^t V_c \cos \bar{K}_c dt - \int_0^t V_{TX} dt; \\
&y_2(t) = y_G - \cos \psi_0 \cdot \int_0^t V_c \sin \bar{K}_c dt - \int_0^t V_{TY} dt.
\end{aligned} \tag{4}$$

Необходимо отметить, что коэффициенты матрицы W по своему характеру зависят от гидродинамических и аэродинамических характеристик судна, района его плавания, постоянных инструментальных погрешностей, установленных на судне лага и гирокомпаса. Поэтому их постоянство, строго говоря, будет справедливо лишь для конкрет-

ного судна, плавающего в определенном районе и для определенного характера его загрузки. Для судов торгового флота мы сталкиваемся, как правило, с двумя предельными состояниями судна – это «судно в грузу» и «судно в балласте». Что касается района плавания, то здесь отличие коэффициентов обусловлено лишь плотностью воздуха и морской воды. Так, исходя из физического смысла коэффициентов, необходимо заключить, что модель счисления судна строится для конкретного варианта загрузки конкретного судна, совершающего плавание в данном районе океана.

Подобная модель счисления была получена для т/х «МЕХАНИК МАКАРЬИН» «в грузу» при плавании в Норвежском море. В течение четырех часов производилась запись характеристик внешних факторов (ветра, волнения и течения), характеристик бортовой качки, курса и скорости по лагу, а также координат места судна по показаниям приемоиндикатора спутниковой радионавигационной системы «NAVSTAR», которые принимались как истинные. Для каждого момента времени с дискретностью 2 с были сформированы входной и выходной векторы в соответствии с выражениями (4). Число образцов для обучения составило 7200. Максимальное число эпох было выбрано равным 1000. При этом если в течение последних 100 эпох уменьшение ошибки сети было менее 1 м, то процесс обучения останавливался. Начальное значение параметра обучения – 10^{-25} . Для реализации алгоритма обучения нейросети использовалась среда MATLAB 7.10.0.

В результате обучения на 245-ой эпохе процесс остановился. Максимальное значение модуля невязки (без учета течения) на четырехчасовом промежутке времени составило приблизительно 1,0 мили. График зависимости ошибки от времени представлен на рис. 3.

Из графика видно, что модуль невязки (без учета течения) представляет собой функцию, имеющую в данном эксперименте два экстремума. Второй минимум объясняется тем, что приблизительно за последние 40 мин наблюдения ветер изменил направление с левого галса на правый. Первый экстремум можно объяснить влиянием неучтенного приливо-отливного течения для данного района Норвежского моря, так как в данном случае учитывалось только постоянное течение. Данная зависимость модуля невязки (без течения) подтверждает, с одной стороны, теоретический вывод, состоящий в том, что погрешность счисления с учетом внешних факторов представляет собой не обязательно возрастающую функцию времени. С другой стороны, этот график говорит о том, что при той постановке задачи определения ошибки счисления, которая была сформулирована выше, можно

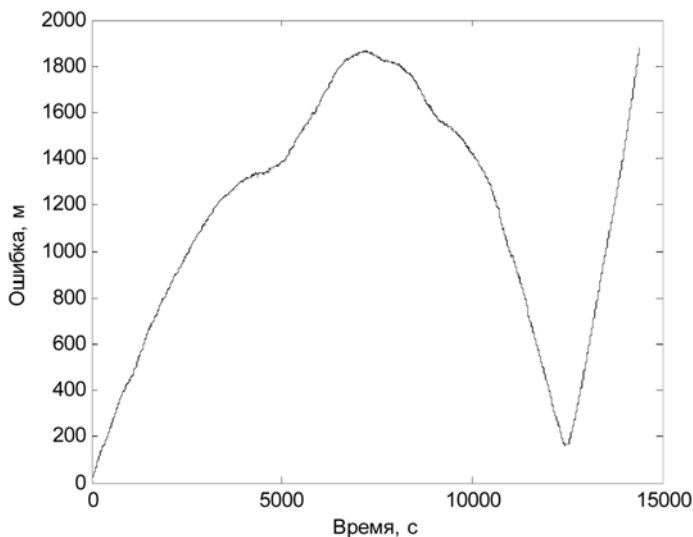


Рис. 3
График зависимости ошибки нейросети от времени

при помощи рассмотренной модели дать лишь решение в виде: «на данном промежутке времени погрешность счисления будет не более определенного значения».

Последнее затруднение может быть решено следующим образом. По истечении времени наблюдения t_n предлагается начать процесс оценки погрешности заново – уже для промежутка времени $[t_n; 2t_n]$, принимая во внимание тот факт, что мы имеем ошибку для предыдущего промежутка $c_{\max}$. Вообще для любого m -ого промежутка $[(m-1) \cdot t_n; m \cdot t_n]$ ошибка счисления будет не больше, чем $m \cdot c_{\max}$.

Положение о возможности обучения сети образцами, полученными в результате опытных данных, подтвердим моделированием ситуации движения судна в условиях воздействия внешних факторов. В первую очередь, мы должны проверить, как нейронная сеть способна к обучению при изменении значений внешних факторов. Для этого рассмотрим ситуации, при которых воздействие ветра, волнения и качки имеют различный характер действия. Иными словами, будем рассматривать различные схемы воздействия этих внешних факторов, как по модулю, так и по направлению.

Предельные значения указанных величин выбираются исходя из их физического смысла. А конкретное значение той или иной величины – как случайная величина, имеющая на множестве возможных значений равномерный закон распределения. При этом мы используем генераторы псевдослучайных чисел. В роли истинного значения матрицы коэффициентов выступает та матрица, которая была получена для вышеупомянутого примера для т/х «МЕХАНИК МАКАРЬИН». Постоянные параметры, принимающие участие в формировании входных величин, также взяты из этого примера. На рис. 4 представлен график, показывающий ошибку после обучения при различных, случайно выбранных значениях внешних факторов. Использовалось 50 вариантов схем действия этих факторов. Как следует из графика, в большинстве случаев ошибка после обучения нейронной сети является незначительной и в среднем составляет 150 – 200 м.

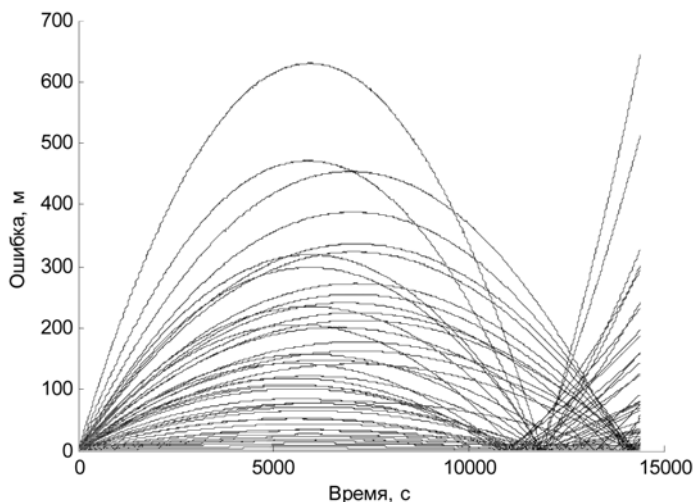


Рис. 4
Ошибка сети при различных схемах действия внешних факторов

В заключение назовем основные этапы построения нейросетевой модели счисления пути судна. Сначала мы представляем счисляемые координаты в виде (1). Затем утверждаем, что коэффициенты

весовой матрицы будут постоянны для данного судна, совершающего плавание в определенном районе океана. Для получения оценки матрицы этих коэффициентов предлагается использовать представление модели счисления в виде нейронной сети. Обучив нейронную сеть, мы получаем искомую оценку матрицы весовых коэффициентов и предельную ошибку счисления. После тестирования сети образцами, которые не участвовали в ее обучении, и получения позитивных результатов использование модели состоит в том, что дается оценка счислимых координат судна и максимально возможное значение модуля невязки.

Список литературы

1. Лукомский Ю.А., Пешехонов В.Г., Скороходов Д.А. Навигация и управление движением судов. – СПб.: Элмор, 2002. – 359 с.
2. Автоматизация синтеза и обучение интеллектуальных систем автоматического управления / Отв. редакторы Макаров И.М., Лохин В.М. – М.: Наука, 2009. – 227 с.
3. Дмитриев С.П., Пелевин А.Е. Задачи навигации и управления при стабилизации судна на траектории. – СПб.: ЦНИИ «Электроприбор», 2002. – 160 с.
4. Дерябин В.В. Построение модели счисления пути судна на основе нейронной сети // Эксплуатация морского транспорта / ГМА им. адм. С.О. Макарова. – 62. – 2010. – 10 с.
5. Сазонов А.Е. Нейротехнологии: настоящее и будущее // Научно технический сборник Российского морского регистра судоходства. – Вып. 32. – СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2009. – С. 220 – 234.
6. Хайкин Саймон. Нейронные сети: полный курс, 2-е изд.: Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2006. – 104 с.
7. Смирнов Е.Л. Технические средства судовождения. Том 1. Теория. – М.: Транспорт, 1988. – 376 с.
8. Крылов А.Н. Избранные труды. Общая теория качки корабля на волнении. – АН СССР: Классики науки, 1958. – С. 7 – 92.

*А.И. Кулинич, А.Н. Маринич, А.В. Припотнюк,
Ю.М. Устинов, А.Р. Шигабутдинов, А.В. Чернышов*

ПЕРСПЕКТИВА РАЗВИТИЯ СУДОВЫХ СПАСАТЕЛЬНЫХ СРЕДСТВ НАВИГАЦИИ И СВЯЗИ

1. Современные судовые спасательные средства навигации и связи

Судовые спасательные средства навигации и связи (СССНС) Глобальной морской системы связи при бедствии и для обеспечения безопасности (ГМССБ) предназначены для выполнения трех задач:

- связь на месте бедствия;
- определение координат места и времени аварии судна;
- передача на спасательные координационные центры (СКЦ) сообщения о бедствии.

В настоящее время в состав судовых спасательных средств навигации и связи входят:

- радиостанции спасательных средств, работающие в диапазоне очень высоких частот (ОВЧ) морской подвижной службы;
- радиолокационные ответчики (РЛО);
- УКВ-аварийные радиобуи;
- спутниковые аварийные радиобуи системы КОСПАС-САРСАТ АРБ-406.

ОВЧ-радиостанции спасательных средств работают в режиме телефонии с фазовой модуляцией несущей частоты в диапазоне частот 156...174 МГц на нескольких частотных каналах (не менее пяти).

Излучаемая мощность составляет 0,5...5 Вт, дальность действия между спасательными средствами – 8...10 км, между спасательными средствами и судами, участвующими в спасательных работах, – 15...25 км. Внешний вид радиостанции типа IC-F3063T производства фирмы ICOM приведен на рис. 1.

Радиолокационные ответчики работают в 3-сантиметровом диапазоне волн и позволяют обеспечивать определение своего места на расстоянии до 5 м.м. проходящими судами и до 30 м.м. – самолетами.

Мощность излучения передатчика РЛО – 0,4 Вт. Вид РЛО типа Tron-SART производства фирмы JOTRON приведен на рис. 2.

Аварийные радиобуи АРБ-406 предназначены для определения координат и подачи оповещения при бедствии через низкоорбитальные и геостационарные спутники Международной системы поиска и спасания судов и самолетов, терпящих бедствие, КОСПАС-САРСАТ. Излучаемая импульсная мощность АРБ-406 составляет не менее 0,4 Вт. Внешний вид АРБ-406 типа NAVTEC global-3 EPIRB производства фирмы NAVTEC LTD. COMPANY приведен на рис. 3.

Система КОСПАС-САРСАТ используется во всех странах на не дискриминационной основе, т. е. ее услуги являются бесплатными для всех, терпящих бедствие. В состав космического сегмента входят низкоорбитальные и геостационарные спутники.

В наземный сегмент входят аварийные радиобуи и станции приема и обработки информации (СПОИ), передаваемой спутниками.

Космический сегмент системы состоит, как минимум, из четырех низкоорбитальных спутников на круговых орбитах и нескольких гео-



Рис. 1



Рис. 2



Рис. 3

стационарных спутников, приемники которых принимают сигналы на частоте 406 МГц.

Четыре спутника типа КОСПАС составляют Российскую часть орбитальной группировки. Эти спутники выводятся на орбиты высотой около 1000 км с наклоном 83° . Спутники оснащены приемниками, осуществляющими прием на частоте 406 МГц. США обеспечивают функционирование, как минимум, двух спутников типа CAPSAT, размещенных на орбитах высотой около 850 км.

Спутники КОСПАС-CAPCAT совершают оборот вокруг Земли примерно за 100 мин, при этом с них обзореается участок поверхности Земли диаметром ~ 5000 км.

С любой точки Земного шара каждый спутник системы в течение суток виден четыре раза: первые два раза с интервалом 100 мин и еще два раза с тем же интервалом через 12 ч. Таким образом, если в системе работают N низкоорбитальных спутников, то в течение суток спутники будут видны $4N$ раз.

В настоящее время все потребители системы (суда, самолеты) оснащены аварийными радиобуями АРБ-406, работающими на частоте 406 МГц.

Ранее АРБ выпускались двух видов: АРБ-121,5 и АРБ-406. АРБ-121,5 передавали сигналы на частоте 121,5 МГц, однако с 1 февраля 2009 г. Международная система КОСПАС-CAPCAT прекратила обработку сигналов АРБ-121,5 и пользователи этих буюв должны заменить радиобуи 121,5 МГц на радиобуи 406 МГц.

Выпускаются персональные радиобуи, которые члены экипажа судна носят на себе, одев гидрокостюм. После активации буй передает сигнал бедствия через спутники КОСПАС-CAPCAT. Некоторые модификации персональных буюв имеют встроенный приемник GPS. На рис. 4 показан внешний вид АРБ-406 и персонального радиобуя. АРБ-406 после гибели судна свободно плавает на поверхности моря и излучает сигналы бедствия.

АРБ излучает сигналы бедствия в течение двух суток. В этом сигнале содержится информация о государственной принадлежности владельца АРБ, позывной судна и другие данные. Скорость передачи цифровой информации составляет 400 бит/с, излучаемая мощность АРБ – около 5 Вт. В состав АРБ-406 входит также передатчик, работающий на частоте 121,5 МГц с излучаемой мощностью $\sim 0,02$ Вт. Сигналы этого передатчика предназначены для ОВЧ-пеленгаторов, установленных на самолетах, для поиска терпящих бедствие. АРБ включается автоматически или вручную на терпящем бедствие судне.



Рис. 4

После включения АРБ излучает навигационные сигналы в виде синусоидальных посылок длительностью 0,44...0,52 с с паузами около 50 с. Цифровая информация передается путем сдвига фазы при передаче бита на $\pm 60^\circ$.

Большая скважность излучаемых сигналов обеспечивает раздельный прием сигналов нескольких АРБ на обозреваемом участке со спутника.

Время пролета спутника над АРБ составляет 10...15 мин. За время пролета на спутнике замеряются и заносятся в память не менее трех значений доплеровских частот в разнесенные моменты времени. Среднеквадратическая погрешность определения координат буя составляет 5 км (с вероятностью 0,9). Если радиобуй находится в плоскости орбиты спутника, то погрешность определения местоположения



Рис. 5

резко возрастает. Возможна неоднозначность определения координат: невозможно определить, слева или справа от орбитальной плоскости находятся истинные координаты радиобуя. Для полного исключения этой неопределенности требуется обработка результатов измерений за время двух пролетов спутника.

В состав судовых спасательных средств навигации и связи в 1999 году был включен УКВ-аварийный радиобуй (см. рис. 5) с устройством цифрового избирательного вызова (ЦИВ).

Этот радиобуй предназначен для излучения сигнала бедствия в ОВЧ-диапазоне в морском районе A1 ГМССБ. Сигнал излучается на 70-м канале (156,525 МГц), класс излучения – фазовая модуляция. Выходная импульсная мощность передатчика – 100 мВт. В оповещении о бедствии не передаются координаты бедствия и время бедствия. В связи с отсутствием важнейшей информации о координатах и времени бедствия УКВ-радиобуй является бесперспективным.

2. Перспектива развития судовых спасательных средств навигации и связи на основе использования АИС



Рис. 6

Принято решение (Резолюция ИМО MSC.246(83) о вводе в 2010 г. в состав судовых спасательных средств навигации и связи передатчика АИС для целей поиска и спасания (AIS-SART) (рис. 6).

Излучаемая мощность передатчика – 12,5 Вт, дальность действия – 18 м.м. AIS-SART будет попеременно передавать на международных частотах 161,975 и 162,025 МГц восемь раз в минуту сообщения №1 и №14 с признаком бедствия. Эти сообщения будут приниматься судами во всех морских районах ГМССБ, а также АИС-оборудованием, установленным на спутниках. Сообщение №1 содержит данные о терпящем бедствие судне: MMSI, координаты, время, истинный курс, путевой угол, скорость относительно грунта. В сообщении №14 передается информация, связанная с бедствием: характер бедствия, требуемая помощь и т. д.

В рамках пересмотра эксплуатационного стандарта на свободновсплывающие спутниковые АРБ системы КОСПАС-САРСАТ (Резолюция А.810(19)) подкомитетом Международной морской организации по радиосвязи, поиску и спасанию (COMSAR) рассматривается вопрос об использовании передатчика АИС в качестве альтернативы передатчика, работающего на частоте привода 121,5 МГц. Предусматривается в будущем добавление АИС-процессора в качестве дополнительной функциональной возможности стандартного АРБ системы КОСПАС-САРСАТ. Предполагаемая аббревиатура для нового устройства АИС-АРБ (AIS-EPIRB).

При этом в целях идентификации АИС передатчика АРБ предполагается использование того же протокола идентификации (MMSI), который рекомендован для передатчиков АИС для целей поиска и спасания (AIS-SART), что позволит обеспечить определение местоположение объекта по его изображению на навигационных дисплеях.

Рассматривается также вопрос в отношении функциональной возможности аппаратуры АИС передавать информацию, относящуюся к безопасности (safety-related message). Отмечается, что при передаче текстовых сообщений АИС, связанных с бедствием и безопасностью, из-за недостаточно развитой береговой инфраструктуры и отсутствия процедур и уровней приоритетности при обработке такой информации не могут быть гарантированы получение и соответствующая реакция со стороны поисково-спасательных служб: судов, находящихся в непосредственной близости от аварийного (терпящего бедствие) объекта. Вместе с тем передача аппаратурой АИС информации, относящейся к бедствию, потенциально может повысить безопасность человеческой жизни и сохранность грузов на море. Разработка процедур аварийной радиосвязи с использованием АИС-технологий в дальнейшем будет продолжена.

3. Дополнительное радиооборудование для спасательных средств навигации и связи

В настоящее время рассматривается вопрос о применении сотовых телефонов в поисково-спасательных операциях. Для обеспечения возможности использования сотовых телефонов в операциях по поиску и спасанию на море планируется разработать соответствующие инструкции и включить их в Международное авиационное и морское наставление по поиску и спасанию (IAMSAR) с дальнейшим включением в национальные планы по поиску и спасанию. Предлагается так-

же пересмотреть некоторые процедуры ГМССБ в связи с развитием и внедрением систем подачи сигналов бедствия и определения места, которые не являются частью оборудования ГМССБ.

Члены экипажа судна, терпящего бедствие, могут использовать также дополнительные мобильные средства связи, не входящие в состав СССНС.

Таковыми средствами связи являются:

терминалы двусторонней телефонной связи спутниковой системы ИРИДИУМ (рис. 7);

терминалы двусторонней телеграфной связи спутниковой системы ОРБКОММ (рис. 8);

терминалы двусторонней телефонной связи спутниковой системы ГЛОБАЛСТАР (рис. 9);

терминалы двусторонней телеграфной связи спутниковой станции ИНМАРСАТ-D+ (рис.10).

Все вышеуказанные терминалы дополнительных средств связи имеют малые габариты, вес, а также низкую потребляемую мощность.



Рис. 7



Рис. 8



Рис. 9



Рис. 10

Заключение

Появление образцов радиооборудования навигации и связи с лучшими технико-эксплуатационными характеристиками заставляет по-новому определять состав судовых спасательных средств.

Только комплекс новейших судовых спасательных средств навигации и связи совместно с дополнительными средствами способен решать задачу оперативной доставки аварийных сообщений на СКЦ.

Список литературы

1. Судовая радиосвязь: Справочник по организации и радиооборудованию ГМССБ / В.Ю.Резников, Ю.М.Устинов, А.А.Дуров и др. / Под общей ред. Ю.М.Устинова. – СПб.: Судостроение, 2002. – 480 с., ил.

2. Ильин А.А., Маринич А.Н., Припотнюк А.В., Устинов Ю.М. Цифровые терминалы спутниковых систем связи // Справочное издание / Под общей ред. Устинова Ю.М. – СПб.: Деан, 2005. – 192 с., с ил.

3. Судовая автоматическая идентификационная система / Маринич А.Н., Проценко И.Г., Резников В.Ю., Устинов Ю.М., Шигабутдинов А.Р. / Под общей ред. докт. техн. наук, проф. Ю.М.Устинова. – СПб.: Судостроение, 2004. – 189 с., ил.

4. Современное судовое оборудования средств электронной навигации, ГМССБ и береговая единая система контроля и управления судоходством: Монография / А.Н.Маринич, А.В.Припотнюк, Ю.М.Устинов и др. / Под ред. Ю.М.Устинова. – Петропавловск-Камчатский Камчат ГТУ, 2007. – 261 с.

5. Электронная навигация и ГМССБ для судоводителей: Монография / Ю.М.Устинов, А.А.Дуров, Д.А.Бакеев и др. / Под ред. Ю.М.Устинова. – Петропавловск-Камчатский КамчатГТУ, 2009. – 194 с.

6. Афанасьев В.В., Кулинич А.И., Маринич А.Н., Устинов Ю.М., Шигабутдинов А.Р. Глобальная система мониторинга судов на основе спутниковой станции АИС // Эксплуатация морского транспорта / ГМА им. адм. С.О. Макарова. – 3(57). – 2009.

7. Дуров А.А., Кан В.С., Маринич А.Н., Устинов Ю.М. Целесообразность деления радиооборудования судов по назначению на три вида: средства навигации, средства связи и средства при бедствии и для обеспечения безопасности мореплавания // Эксплуатация морского транспорта / ГМА им. адм. С.О.Макарова. – 2(56). – 2009.

МОДЕРНИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ СУДС «ВЫСОЦК»

Введение

Портовая служба управления движением судов (СУДС) «Высоцк» входит в состав Региональной СУДС «Раскат», которая обеспечивает безопасность мореплавания в восточной части Финского залива. Ввод в строй СУДС «Высоцк» позволил осуществлять постоянный контроль за судами в Выборгском заливе и обеспечить их навигационной и гидрометеорологической информацией.

Однако при существующем размещении метеорологического оборудования возникают искажения показаний датчиков ветра и температуры в связи с близким расположением к нему купола здания и башни СУДС. Данное обстоятельство не позволяет использовать оборудование метеостанции СУДС в полной мере.

Для устранения проектной недоработки по расположению датчиков ветра и температуры необходимо изменить их местоположение таким образом, чтобы обеспечить реальные показания приборов. При изменении местоположения датчиков возникает необходимость дистанционной передачи метеорологической информации к метеосерверу. Инженерами СУДС предложено модернизировать систему передачи метеорологической информации за счет изменения мест установки датчиков и внедрения беспроводного принципа работы системы передачи метеорологической информации.

Назначение гидрометеорологической системы СУДС «Высоцк»

Подсистема гидрометеостанции СУДС «Высоцк» предназначена для обеспечения операторов СУДС, а также клиентов информации СУДС следующей информацией:

- относительная влажность воздуха, %;
- температура воздуха, °С;

атмосферное давление, гПа;
скорость ветра, м/с;
направление ветра, град.;
температура воды, °С;
уровень воды, м.

Подсистема состоит из следующих основных частей:

программно-аппаратный комплекс (ПАК) на базе автоматической гидрометеорологической станции РМ-2000;

метеосервер-интерфейс гидрометеорологической информации лоцмана оператора СУДС (в составе ПО СУДС NaviTraffic).

Метеосервер предназначен для функционирования программного обеспечения (ПО) «Гидрометеопост», входящего в состав ПАК РМ-200. При помощи этого ПО ведется сбор данных с датчиков, отображение информации, архивирование полученных данных, а также передача метеорологических данных в систему СУДС NaviTraffic для отображения на операторских дисплейных модулях и синхронной регистрации совместно с другой информацией на сервере регистрации СУДС. Располагается метеосервер в телекоммуникационном шкафу аппаратной СУДС и представляет собой ПК промышленного исполнения с мультипортовой платой на 5 портов RS232. Паспорт на ПК, драйверы и стандартное программное обеспечение содержатся в составе переданной документации по ПК и локальная вычислительная сеть (ЛВС) СУДС «Высоцк».

ПАК на базе автоматической гидрометеорологической станции РМ-2000 (рис. 1) предназначен для автоматизированного измерения параметров окружающей среды, их обработки, отображения, хранения и передачи обработанных данных потребителям (СУДС и др.). Комплекс состоит из персонального компьютера (рабочей станции) с подключенными к ней контроллерами и датчиками.

Контроллер WT501 предназначен для приема измерительных сигналов от следующих датчиков:

скорости и направления ветра (WAV151 и WAA151) – установлены на траверсе ветра WAC151;

температуры и относительной влажности воздуха (HMP45D);

температуры воды (DTS12W).

Выходные данные о температуре и влажности передаются с контроллера на сервер в виде стандартного сообщения согласно стандарту NMEA 0183 V2.20 на рабочую станцию обработки гидрометеорологической информации.

Датчик давления РТВ200 предназначен для измерения атмосферного давления воздуха. Результат измерения передается по интер-

на кровле служебного здания СУДС. Датчики температуры и относительной влажности воздуха размещены на стойке (2 м) в непосредственной близости от стены этого же здания.

Подобная установка датчиков, как указано в Технической документации, не обеспечивает репрезентативность регистрируемых метеорологических параметров. Ветровые характеристики искажаются вследствие затенения конструкциями здания СУДС и башней РЛС метеомачты с установленными на ней датчиками. Характеристики температуры и влажности воздуха также нерепрезентативны вследствие близкого расположения стойки к стене здания, особенно в теплый период года.

Для выполнения всех требований нормативных документов, действующих в системе Росгидромета, и обеспечения качественных (репрезентативных) метеорологических наблюдений предлагается произвести переустановку «РМ-2000» (метеомодуля).

Переустановку метеомодуля предлагается произвести на осветительную опору № 1 (рис. 2), расположенную к северу от здания СУДС.



Рис. 2
Осветительная опора под установку метеомодуля

Местоположение опоры обеспечивает достаточную открытость для приземного поля ветра.

Размещение датчиков предлагается выполнить по аналогии с метеокомплексом терминала для перегрузки светлых нефтепродуктов порта Приморск. Датчики направления и скорости ветра устанавливаются на конструктивно предусмотренной площадке в верхней части осветительной опоры на соответствующем траверсе (штанге). Датчики температуры и влажности воздуха с коммуникационным боксом устанавливаются в нижней части опоры на высоте 2 м от поверхности земли и также на траверсе, чтобы до минимума уменьшить тепловое влияние конструкции опоры.

Передача информации от метеомодуля на сервер СУДС может быть осуществлена беспроводным способом посредством стандартного модема, обеспечивающего вход в локальную сеть СУДС с последующей передачей на Центр коммутации сообщений (ЦКС) ГУ «СПб ЦГМС-Р» для обеспечения оперативного контроля качества метеопараметров.

Беспроводная технология передачи метеорологической информации

На основании анализа различных передающих сред (табл. 1) было выявлено, что наиболее экономичным является построение беспроводной системы передачи метеорологической информации на базе протокола IEEE 802.11. В физической среде IEEE 802.11 данные распространяются с помощью маломощного шумоподобного сигнала, имея более десятка частотных каналов шириной 22 МГц с частотой 2,4 ГГц. Щадящие режимы эксплуатации позволяют использовать частотный ресурс весьма интенсивно. Характер сигнала позволяет устанавливать связь на дальности до 5 км при наличии не только прямой оптической видимости между конечными точками, но и в условиях разнорельефной застройки, снежно-дождливого климата.

Таблица 1

Характеристики различных сред передачи

Тип канала	Ориентировочная стоимость	Время на подготовку и проведение монтажа
1	2	3
Медный кабель	300 – 500 \$ при прокладке по существующей канализации, в ином случае – 2000 – 8 000 \$ за 1 км	Подготовка работ и прокладка: до 1 месяца (без канализации); установка HDSL-модемов: несколько часов

Продолжение табл. 1

1	2	3
Волоконно-оптический кабель	500 – 1000 \$ при прокладке по существующей канализации, в ином случае – 5000 – 10 000 \$ за 1 км	Подготовка работ и прокладка: 2 – 4 месяца (без канализации)
Оптический канал	2000 – 4 000 \$ за комплект	Подготовка монтажа: 2–3 дня; установка: 2–3 часа
Лазерный канал	12000 – 22 000 \$ за комплект	Подготовка работ: 1–2 недели; установка: несколько часов

Экономическая привлекательность выбранной технологии беспроводной связи заключается в том, что нет необходимости:

1. закупать провода;
2. выполнять земляные работы по прокладке траншей (поверхность, через которую проходили бы траншеи, является производственной площадкой, где происходит перемещение транспорта, грузов и наличие траншей затруднило бы производственный процесс на определенный срок);
3. нести затраты на асфальто-восстановительные работы (устанавливаемое оборудование находится на территории, где действует погранично-таможенный режим и допуск техники, оборудования, людей и ввоз материалов вызвал бы дополнительные проблемы при оформлении пропусков).

На основе рассчитанного энергетического потенциала линии для организации беспроводной связи рекомендуется использовать следующее оборудование:

антенну U.S. Robotics 9 dBi (USR5482);
беспроводную точку доступа D-Link AirPremierAG DWL-7700AP;
кабель CO 100.

Технические характеристики выбранного оборудования (коэффициенты усиления, чувствительность приемника, мощность передатчика, затухание в кабеле) обеспечивают передачу данных со скоростью 4 Мбит/с с энергетическим запасом 21 дБм. Выбранная скорость позволит в дальнейшем использовать радиолинию для передачи видеoinформации по протоколу MPEG.

Заключение

Таким образом, в статье рассмотрен вопрос модернизации метеостанции СУДС «Высоцк» как комплексной составляющей обеспече-

ния безопасности мореплавания в зоне ответственности Выборгско-Высоцкого филиала ФГУП «Росморпорт». Обосновано использование беспроводной линии связи как наиболее экономичной системы. Определены места установки датчиков метеорологической информации, информационные показатели (дальность, скорость передачи), которые позволяют использовать линию связи для передачи видеоинформации с применением протокола сжатия MPEG-4. Проведен энергетический расчет радиоперелинии, на основании которого выбрано оборудование передачи данных.

Список литературы

1. Федеральный закон Российской Федерации от 8 ноября 2007 г. № 261-ФЗ «О морских портах в Российской Федерации и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» // Рос. газ. – 2007. – 14 нояб.
2. Федеральная целевая программа «Модернизация транспортной системы России (2002 – 2010 годы)». – М., 2001.
3. Федеральная целевая программа «Развитие транспортной системы Российской Федерации (2010 – 2015 годы)». – М., 2008.
4. Готовчиц И. Региональная СУДС восточной части Финского залива // Морской флот. – 2006. – № 6.
5. Шилов И.В., Нефедов А.В., Которов Г.И. и др. Современная телеметрия. – СПб.: Наука и техника, 2007.
6. Галкин В.А., Григорьев Ю.А. Телекоммуникации и сети. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003.
7. Гаджигиев В.А., Геков В.В., Евгенов А.В. и др. Инфокоммуникации на транспорте / Под ред. Б.И. Кузьмина. – СПб.: ООО Агентство Вит-принт, 2005.

Н.Т. Ничипоренко, Э.М. Шацбергер, Б.Н. Сиваченко, В.Г. Яковлев

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ РЛС «НЕВА-ЛП» НА АТОМНОМ ЛЕДОКОЛЕ «ВАЙГАЧ»

Испытания РЛС «Нева-ЛП» (заводской № 028), работающей в диапазоне миллиметровых волн, проводились в соответствии с программой и методикой испытаний КУФВ.465124.007 ПМ1, утвержденными ГМА им. адм. С.О. Макарова и согласованными с ФГУП «Атомфлот». Испытания проходили в феврале 2010 года в ледовых условиях на а/л «ВАЙГАЧ» во время рейса на Варандей, а затем в порт Дудинка в процессе проводки танкера «ВАРЗУГА» через мыс Желания.

Помимо испытаний конструктивной надежности и технических характеристик РЛС, таких как точность, разрешающая способность и дальность обнаружения льдов, программа предусматривала проведение тактических изысканий с целью определения пригодности данной РЛС в качестве «ледового» радара. Данные исследования осуществлялись путем проведения сравнительного анализа РЛС, работающей в диапазоне миллиметровых волн (далее – РЛС ММВ), и РЛС, работающей в диапазоне сантиметровых волн (далее – СМВ).

Для равнозначной оценки результатов сравнения видеосигналы обеих РЛС подвергались преобразованию в цифровой вид посредством 8-битных радар-процессоров, применяемых в штатной комплектации РЛС «Нева-ЛП», и одновременными одинаковыми настройками радиолокационных изображений обеих РЛС. Трехбитный радар-процессор из базовой комплектации РЛС СМВ «Selesmag», используемый на ледоколе для выбора пути во льдах, обеспечивает формирование изображения на экране данной РЛС со значительно худшим разрешением. На рис. 1 отображены позиции размещения РЛС на а/л «ВАЙГАЧ».

На швартовных испытаниях в порту Мурманск РЛС «Нева-ЛП» обнаружила на поверхности воды залива полосы нефтепродуктов, которые с трудом можно было определить невооруженным глазом даже вблизи судна. На рис. 2 приведена фотография масляных пятен на воде.



Рис. 1

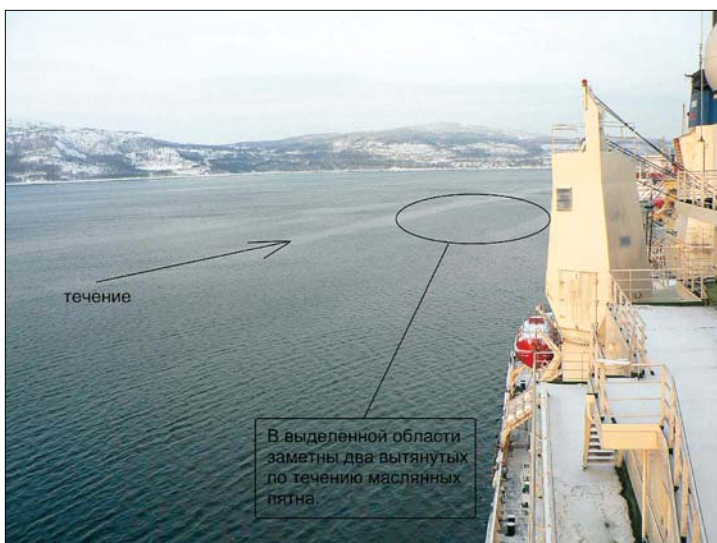


Рис. 2

На рис. 3 приведен скриншот с экрана РЛС «Нева-ЛП» на момент фотографирования пятен.

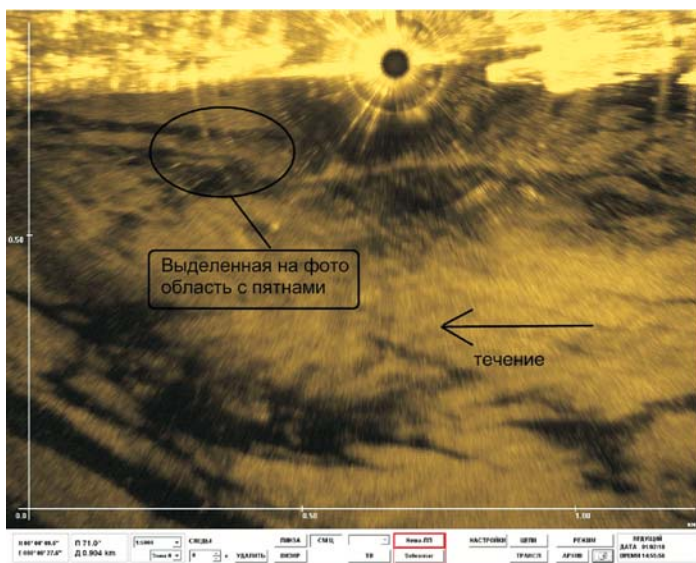


Рис. 3

На РЛС «Selesmar» ни в одном из вариантов режима настройки выявить эти пятна не удалось.

РЛС «Нева-ЛП» может работать на выбор в режиме короткого, среднего и длинного зондирующего импульса. Короткий импульс дает более четкое изображение на малых шкалах, а мощный длинный импульс увеличивает дальность обнаружения целей. Для испытания РЛС «Нева-ЛП» в качестве «ледового» радара в основном использовали средний импульс с максимальной шкалой дальности 9 миль. По мнению судоводителей ледокола этой дистанции вполне достаточно для решения задач ледового плавания в ближней зоне. После определения оптимальной дистанции были произведены настройки для качественного приема сигналов на этих шкалах.

При плавании в Баренцевом море на волнении 3 – 4 балла ледокол с периодичностью 15 – 20 мин испытывал воздействие интерферент-

ных волн не ветрового направления. На малых шкалах испытываемой РЛС ММВ были обнаружены невидимые визуально и при помощи РЛС СМВ волны зыби длиной приблизительно 250 м. Таким образом, было установлено, что при соответствующих регулировках РЛС ММВ позволяет определить и выделить из хаотичного волнения волны разных направлений и с достаточной точностью измерить их длину. Это имеет большое значение при решении задач штормования.

Плавание во льдах на Варандей в Баренцевом море началось с обнаружения полос и пятен серо-белого мелкобитого льда. Дистанция обнаружения РЛС ММВ и РЛС СМВ приблизительно одинакова, но в диапазоне ММВ кромка льда вырисовывается более четко и подробно.

На подходе к порту Варандей наблюдали лед сплоченностью 9–10 баллов (белый тонкий – 3, серо-белый – 5, нилас – 1–2), поля сморози, обломки полей, сжатие на стыках (1–2 балла), торосы (3 балла). Поля сморози состоят из блинчатого и дробленого льда, толщина которого достигала значения серо-белого. Этот лед не колется, а при ударе разрушается как торос на ледовые блины и кубики. При мощности энергетической установки 80 % были случаи застревания ледокола на участках поджатых стыков полей.

Сама акватория порта Варандей была покрыта льдом сплоченностью 10 баллов (тонкий – 7, серо-белый – 2, нилас – 1), торосистостью – 3 балла. Описанные выше сморози создают картину покрытия льдом чашуйчатого вида, структура которого хорошо видна на экране РЛС ММВ. На рис. 4 а представлен скриншот с экрана РЛС «Нева-ЛП», на рис. 4 б – скриншот с экрана РЛС «Selesmar», на рис. 5 – фотография поверхности льда.

Карское море пересекали по разрывам и трещинам в ледяном покрове. Между зонами тонких льдов в районе мыса Желания и на подходах к Енисейскому заливу форсировали перемычки льда сплоченностью 9–10 баллов (средний – 3, тонкий – 3, нилас – 3–4), поля, обломки полей, дробленые вставки, торосы (2 – 3 балла), сжатие на стыках (2 балла). На рис. 6 а представлен скриншот с экрана РЛС «Нева-ЛП», на рис. 6 б – скриншот с экрана РЛС «Selesmar».

В Енисейском заливе толщина припая составляла 110 – 120 см, снега – 10 см, в застругах – 20 см. В районе Воронцово толщина льда – 130 см, на Турушинском перекате – канал тугой, частично переметанный, толщиной 110 – 120 см, на подходах к Дудинке толщина льда составляла 100 – 110 см, снега – 10 – 20 см.

В практике дешифровки радиолокационных изображений льда в диапазоне СМВ существует правило, что темные участки радио-

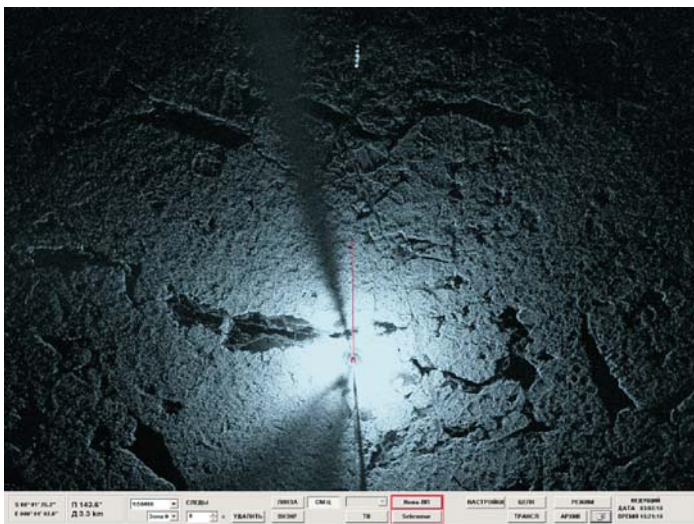


Рис. 4 а

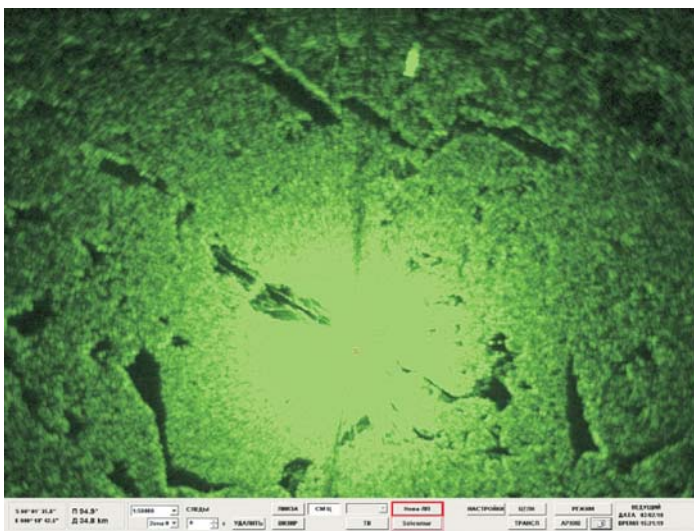
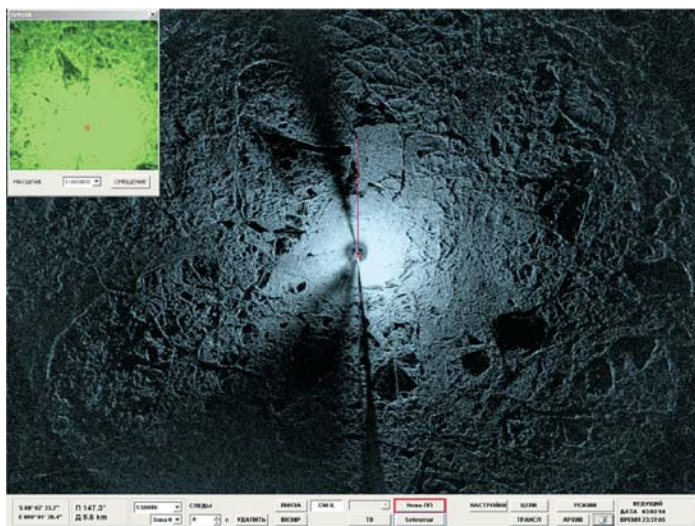


Рис. 4 б



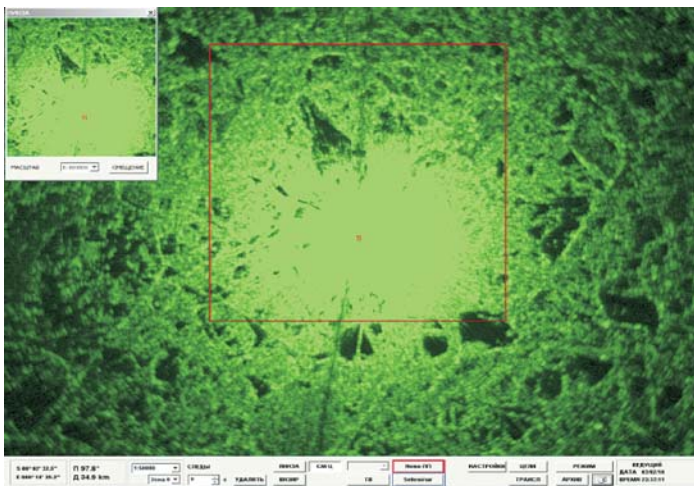


Рис. 6 б

локационной картинке не обязательно отображают чистую воду, а скорее всего это могут быть ровные поля льда. В диапазоне ММВ кромки полей вырисовываются более четко. Испытываемая РЛС позволяет подобрать цветовую гамму радиолокационного изображения. Оказалось, что правильный выбор цвета очень важен для процесса дешифровки. При отображении на экране РЛС поверхности льда в серо-голубом цвете участки с более тонким льдом и чистой водой на расстоянии от судна 1,5 – 2,0 мили начинают темнеть. Зимой на изображении участков чистой воды появляется рябь или отображаются начальные стадии ледообразований. Нилас также легко определяется по рисункам клавишных наслоений.

Толстые ровные поля нам не встречались, но свечение более толстого льда интенсивнее и имеет рисунок, отличающийся от трещин, кромок, стыков и торосистых гряд. Торосы от дробленого льда также отличаются более интенсивным свечением. Также было замечено, что у РЛС ММВ на шкалах до 9 миль отсутствует искажение на периферии экрана, тогда как это имеет место у РЛС СМВ. Изображение на периферии экрана в виде извилистых линий в процессе движения к центру не меняет формы основных контуров, а только детализируется. При приближении к 1,5 мильной зоне заканчивается формирование ансамбля линий, яркости, цвета и полутонов (рис. 6 а).

Рейсы атомоходов на Северный Полюс и плавание в зимнее время года в Карском море показали возможность осуществления плавания в сплошных льдах, используя ориентированные в направлении движения судна разрывы в ледяном покрове. Современные дистанционные средства исследования ледяного покрова позволяют определить пространственное положение благоприятных зон плавания по НСЛ (нарушения сплошности ледяного покрова). Качество рекомендаций по выбору оптимального пути в сплошных массивах льда в основном зависит от степени разрешения снимка, полученного от спутника, который позволяет определить статистические ансамбли мелких разрывов, а экономическая эффективность такого вида плавания будет зависеть от возможности качественного наблюдения за ледовой обстановкой в ближней зоне для корректировки этих рекомендаций. Иначе говоря, для определения пригодности

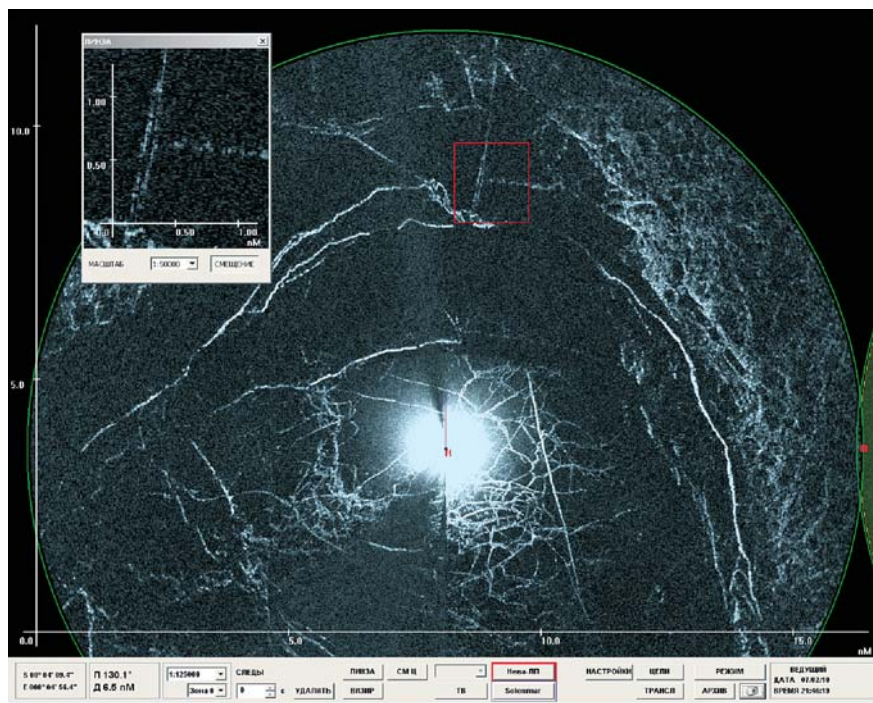


Рис. 7 а

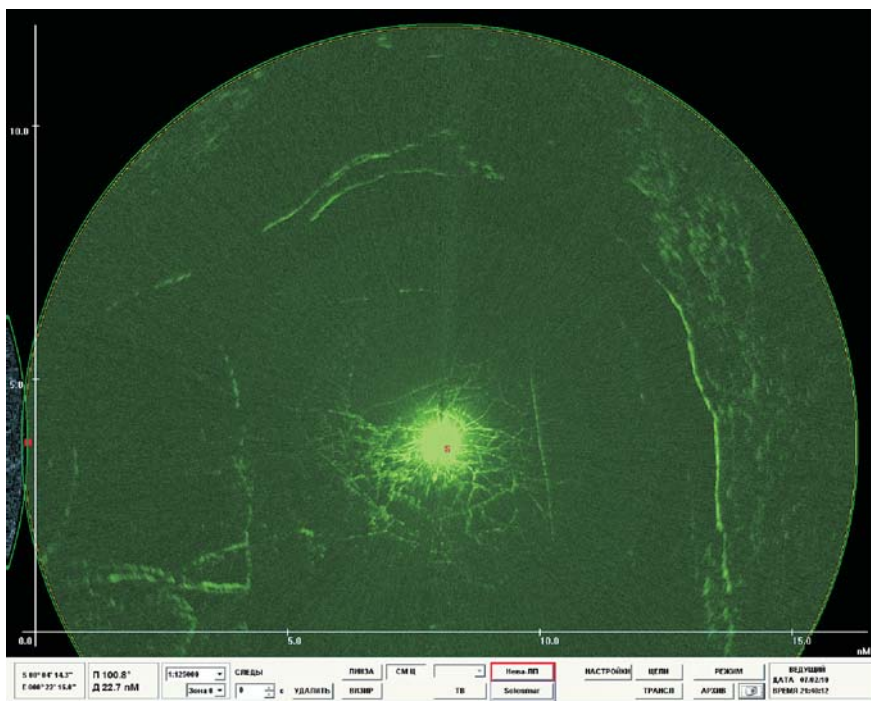


Рис. 7 б

к использованию разрыва во льдах, обнаруженного на периферии экрана, необходимо замерить его ширину. РЛС «Нева-ЛП» в тонком льду позволила на дистанции 6 миль определить ширину разрыва, ориентированного в направлении нашего движения, которая составила порядка 100 м.

При подходе к кромке припая Енисейского залива вход в канал был обнаружен практически одновременно радаром «Selesmar» и «Нева-ЛП» на дистанции 8 миль. Однако РЛС «Нева-ЛП» в этот момент обнаружила два параллельных канала с засветкой на экране еще на 2 мили. Причем измеренная ширина между внешними кромками каналов составила порядка 150 м.

По качеству отображения льда без искажений РЛС «Нева-ЛП» значительно превосходит лучшие РЛС мира, предлагаемые как «ледовые» радары.

На рис. 8 видно, что на периферии экранов наблюдается искажение изображения. Сигналы сливаются, точность отображение объектов на периферии хуже, чем в центре, значит, неточность определения ширины разрывов приведет к ошибке вычисления индекса разрывов и, в конечном итоге, к ошибочному выбору пути.



Рис. 8

Отображение льда радиолокационным комплексом «Sigma S6» с РЛС «Furuno»

Способность РЛС «Нева-ЛП» хорошо отображать канал была отмечена капитаном а/л «БАЙГАЧ» А.В. Скрыбиным. При проводке д/э «ВАРЗУГА» через тяжелую заторошенную перемышку льда ледоколом был проложен канал протяженностью 2,5 мили, затем ледокол вернулся за судном для проводки его по своему каналу. РЛС «Selesmar» не смогла обнаружить канал в сильно заторошенном льду, а на экране РЛС ММВ он был четко виден, и работа была успешно выполнена. При плавании по каналу в реке Енисей с помощью РЛС ММВ хорошо обнаруживались невидимые невооруженным глазом старые каналы и гряды торосов под снегом, пересекающие канал.

Еще одно достоинство РЛС ММВ состоит в том, что на малых шкалах мы можем определить ракурс отображаемого судна. Важно знать положение судна при заходе на околку в условиях ограниченной видимости. Под каким ракурсом ледокол входит в лед из полыньи полезно

видеть также и проводимому судну при плавании в тумане. Если используется трассировка и хорошо просматривается вход в канал, то отпадает необходимость в значительном уменьшении установленной скорости хода.

Испытания РЛС ММВ «Нева-ЛП» в качестве «ледового» радара показали, что при имеемых параметрах и настройках она уже в состоянии определить некоторые важные характеристики ледовой обстановки в ближней зоне. В основном это те характеристики, которые выражаются в баллах. Если можно определить зоны чистой воды и начальных ледяных образований, значит можно установить общую сплоченность. Выделяя на радиолокационном изображении торосы, мы легко определим их процентное отношение ко всему наблюдаемому ледяному покрову. РЛС легко определяет зоны дробленых льдов, которые во многих случаях являются основными путями для плавания во льдах. Как уже отмечалось выше, ниласовые льды четко выявляются на экране по линиям наслоений. Сжатия определяются по торосообразованию и разрывам поперек линии сжатия. Силу сжатия можно определить по времени складывания канала. РЛС позволяет измерять ширину канала с достаточной точностью. Если вводить в РЛС данные о толщине льда, поступающие от толщиномеров, уже давно используемых в ледовой разведке, то «ледовый» радар будет в постоянном режиме представлять нам реальную ледовую обстановку.

Относительно испытания самой РЛС «Нева-ЛП» следует отметить, что в процессе работы были получены хорошие результаты по всем техническим параметрам: точность измерения направления по курсовому углу составила $0,2^\circ$ при ТУ не более 1° ; погрешность измерения дальности на шкалах 0,125–0,75 м.м. составила 0,08 м при норме ТУ не более 25 м; застамушенная отмель в припае реки Енисей была обнаружена на дистанции 5 м.м., а минимальная дистанция обнаружения будет зависеть от места расположения антенны и выступающих частей надстройки, создающих теневые сектора.

Наблюдаемые в рейсе осадки в виде снега и тумана не оказывали какого-либо влияния на качество радиолокационного изображения льда.

Следует также отметить, что отсутствие редуктора в антенном приводе, механического контакта во вращающемся делает РЛС «Нева-ЛП» менее трудоемкой в техническом обслуживании и повышает надежность ее работы в условиях вибраций и низких арктических температур.

В процессе обсуждения результатов проведенных исследований со специалистами ЗАО «MCS» и ААНИИ определилась возможность создания на базе РЛС «Нева-ЛП» программы в виде приставки, позволяющей в автоматическом режиме производить дешифровку ледовой обстановки в ближней зоне и совмещать ее результаты с ледовыми рекомендациями, получаемыми через терминал.

Список литературы

1. Ничипоренко Н.Т., Байрашевский А.М. Судовые радиолокационные системы: [учебник]. – М.: Транспорт, 1982. – 316 с.
2. Ничипоренко Н.Т. Теория, разработка и внедрение комплекса радиолокационных средств миллиметрового диапазона с целью повышения безопасности мореплавания / Диссертация на соискание ученой степени д.т.н. – Л.: ЛВИМУ, 1991.
3. Программа и методика натурных испытаний РЛС миллиметровых волн «МР-2ПВ» шифра «Нева-ЛП» на атомном ледоколе «Вайгач» / Маренич И.Е., Шацберггер Э.М. : Разработка ЗАО «Морские комплексы и системы»: [утв. Афанасьев В.В., Рукша В.В.].
4. Отчет об испытании РЛС «Нева-ЛП» на атомном ледоколе «Вайгач» : [утв. Скрябин А.В.]. – Отв. исп. Шацберггер Э.М.

СОДЕРЖАНИЕ

Решетов Н.А. Участие Российского морского регистра судоходства в освоении нефтегазовых месторождений на шельфе Каспийского моря: настоящее и будущее	3
--	---

Вопросы безопасности судов

Григорьев Н.Н., Латухов С.В., Гаппоев М.А. Решение проблемы минимизации негативного влияния человеческого фактора на уровень аварийности при плавании в ледовых условиях Арктики путем введения обязательного психофизиологического отбора и контроля для моряков, работающих в экстремальных условиях	13
Емельянов М.Д. Типовые модели отказа критичных элементов морских судов	18

Новое судостроение

Блинов Э.К. Совершенствование деятельности Российского морского регистра судоходства в области нового судостроения	36
Баранов И.А., Злыгостев В.Е. Плавучая атомная теплоэлектростанция проекта 20870 с реакторными установками КЛТ-40С	44
Кринская М.Н., Фокин А.В., Кайгородов Е.Р., Шишкин С.А. Освидетельствование судов для перевозки сжиженного природного газа на класс РС	55

Мореходные качества судов

Гаппоев М.А. Анализ возможности и целесообразности применения теории рисков для дальнейшего совершенствования методики оценки безопасности судна при замене балласта в море	60
---	----

Вопросы прочности судов и плавучих сооружений

Бойко М.С., Рабинович О.Н., Тряскин В.Н. Прямой метод расчета нелинейных изгибающих моментов в корпусе судна при слеминге	74
---	----

Материалы и сварка

Орлов В.В., Сувориков В.А., Сырцев В.Ю., Башаев В.К., Галкин В.В. Освоение технологии производства сталей для судостроения с пределом текучести 235–390 МПа в толщинах до 50 мм по ГОСТ Р 52927-2008 на ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат»	82
--	----

Судовые механические установки, валопроводы и двигатели

Баранов В.А., Сергеев А.А., Шурпак В.К. Анализ перспективности применения различных видов альтернативного топлива на морских судах	99
--	----

Евенок В.И., Андрушин А.В., Цой Л.Г., Сергеев А.А. Проект новых требований Правил классификации и постройки морских судов Российского морского регистра судоходства к пропульсивной мощности транспортных судов ледового плавания	127
---	-----

Лысенков П.М., Серов А.В. Оптимизационные процедуры при центровке судовых валопроводов	146
---	-----

Михайлов В.Е., Шурпак В.К. Изменения в требованиях Российского морского регистра судоходства к тонкостенным баллонам из сталей высокой прочности	151
---	-----

Шишкин В.А., Русецкий А.А., Иванов М.Ю. Анализ состояния и перспектив развития средств активного управления судами с позиций корректировки требований Российского морского регистра судоходства	165
--	-----

Освоение шельфовых месторождений

Строганова О.А., Рыбакина О.Г., Тимофеев О.Я., Ярцев Б.А., Авдонкин А.С., Балагура С.В., Чернов В.Г. Требования Российского морского регистра судоходства к проектированию, строительству и эксплуатации морских подводных трубопроводов	196
---	-----

Электрооборудование и автоматизация судов

Бессонов А.Ю., Викулин В.Б., Жадобин Н.Е., Мачульский В.Б. Электродвигатели электрических исполнительных механизмов ДВС	210
Казначеев А.Н., Семенов М.Ю., Цицикян Г.Н. Модернизация нагрузочных устройств с использованием статических регуляторов мощности.....	220

Радио- и навигационное оборудование судов

Дерябин В.В., Сазонов А.Е. О возможности применения нейронных сетей для построения модели счисления пути судна	229
Кулинич А.И., Маринич А.Н., Припотнюк А.В., Устинов Ю.М., Шигабутдинов А.Р., Чернышов А.В. Перспектива развития судовых спасательных средств навигации и связи	247
Айзинов С.Д., Солодовниченко М.Б., Сытник А.А. Модернизация системы передачи метеорологической информации СУДС «Высоцк»	255
Ничипоренко Н.Т., Шацбергер Э.М., Сиваченко Б.Н., Яковлев В.Г. Результаты испытаний РЛС «НЕВА-ЛП» на атомном ледоколе «ВАЙГАЧ».....	262

Решетов Н.А. Участие Росстйского морского регистра судоходства в освоении нефтегазовых месторождений на шельфе Каспийского моря: настоящее и будущее // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – Вып. 33. – 2010. – С. 3 – 12.

В статье описан процесс обустройства нефтегазовых месторождений Северного Каспия. Отмечено плодотворное взаимодействие Российского морского регистра судоходства с ОАО «ЛУКОЙЛ» по техническому наблюдению за сооружаемыми объектами и освидетельствованию материалов и изделий для них, а также перспективы дальнейшего сотрудничества. Описаны технические особенности установленных на месторождениях сооружений. Основное внимание уделено вопросам обустройства месторождения им. Ю. Корчагина. Комплекс мероприятий включает геологоразведочные работы, строительство морских сооружений: ледостойких морских стационарных платформ ЛСП-1 и ЛСП-2, морского перегрузочного комплекса, подводных трубопроводов, а также выполнение морских операций по установке сооружений на место эксплуатации. Кроме того, отмечено сотрудничество Российского морского регистра судоходства с ООО «Петроресурс», ООО «Каспийская нефтяная компания» и ОАО «Нефтяная компания «Роснефть» при переоборудовании морского бурового комплекса проекта 17289, строительстве плавучей буровой установки «ЧИЛИМ» проекта Р5195 и переоборудовании кранового судна «ИСПОЛИН» в плавучую буровую установку.

Григорьев Н.Н., Латухов С.В., Гаппоев М.А. Решение проблемы минимизации негативного влияния человеческого фактора на уровень аварийности при плавании в ледовых условиях Арктики путем введения обязательного психофизиологического отбора и контроля для моряков, работающих в экстремальных условиях // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – Вып. 33. – 2010. – С. 13 – 17.

В статье поднимаются вопросы минимизации негативного влияния человеческого фактора на уровень аварийности при плавании в

ледовых условиях Арктики, где для обеспечения безопасности требуются не столько стандарты, сколько личный опыт и интуиция. Особое внимание уделено вопросам подбора, подготовки и расстановки кадров для плавания на трассах Северного морского пути. Сделан акцент на необходимость проведения психофизиологического отбора и контроля моряков, работающих в экстремальных условиях. В целях повышения безопасности мореплавания предлагается разработать и использовать при подборе персонала специальный документ – психологический паспорт моряка.

УДК 656.61:629.067

Емельянов М.Д. Типовые модели отказа критичных элементов морских судов // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – Вып. 33. – 2010. – С. 18 – 35.

В статье представлены наиболее распространенные модели отказа критичных элементов морских судов, к которым относятся модель предельной (разовой) нагрузки и кумулятивные модели накопления повреждения: линейная модель коррозионного износа, модель усталостного повреждения и модель механического износа пар трения. В случае отсутствия аналитической модели или недостаточности исходных данных для расчета показана возможность применения метода статистического планирования эксперимента для определения вероятности отказа. Эти модели могут использоваться для расчета вероятности отказа критичных элементов и узлов корпуса судна, главного двигателя, редуктора, валопровода с дейдвудным устройством, гребного винта и рулевого устройства.

УДК 629.5:656.07:629.061:69.059

Блинов Э.К. Совершенствование деятельности Российского морского регистра судоходства в области нового судостроения // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – Вып. 33. – 2010. – С. 36 – 43.

В данной статье аргументируется и обосновывается принятое руководством РС организационное решение по созданию в составе РС

специализированной Службы судостроения. Определены направления деятельности Службы судостроения в соответствии с конкретными объемами государственного финансирования отечественного судостроения, которые опубликованы в ФЦП по этой теме. Представляет интерес приведенный в статье анализ рынка преференций, действующих в мировой экономике для судостроителей и судовладельцев многих стран. Приведены примеры возможного участия РС в получении определенной доли в таких преференциях, в том случае если Правительство и Государственная Дума Российской Федерации примут соответствующие решения.

УДК 623.828.8:621.039

Баранов И.А., Злыгостев В.Е. Плавучая атомная теплоэлектростанция проекта 20870 с реакторными установками КЛТ-40С // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – Вып. 33. – 2010. – С. 44 – 54.

В статье дано краткое описание работ по созданию объектов малой атомной энергетики и предпосылок для постройки плавучей атомной теплоэлектростанции на базе судовых реакторов КЛТ-40. Приведены общие сведения об атомной станции малой мощности с плавучим энергоблоком, описание плавучего энергоблока, включая краткое описание реакторной установки и паротурбинной установки, определены экологические аспекты проекта и планируемые места размещения плавучих атомных теплоэлектростанций.

УДК 629.542:661.91:331.108.45

Кринская М.Н., Фокин А.В., Кайгородов Е.Р., Шишкин С.А. Освидетельствование судов для перевозки сжиженного природного газа на класс РС // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – Вып. 33. – 2010. – С. 55 – 59.

В статье представлена информация о проделанной РС работе, связанной с подготовкой персонала в области освидетельствования судов, предназначенных для перевозки сжиженного природного газа наливом, с привлечением специалистов Американского бюро

судоходства. Сделан обзор основных типов систем сохранения груза на указанных судах, даны их сравнительные характеристики. Приведены основные характеристики судна для перевозки сжиженного природного газа «GRAND ANIVA», имеющего совместный класс РС и Регистра Ллойда и являющегося первым в классе РС судном такого типа.

УДК 629.5.067:625.173.7

Гаппоев М.А. Анализ возможности и целесообразности применения теории рисков для дальнейшего совершенствования методики оценки безопасности судна при замене балласта в море // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – Вып. 33. – 2010. – С. 60 – 73.

Для выполнения анализа возможности и целесообразности дальнейшего совершенствования методики оценки безопасности судна в процессе замены балласта в море путем использования теории рисков в настоящей статье рассмотрена методика применения условных рисков для оценки безопасности морских судов, предложенная М.Д. Емельяновым.

УДК 629.12.539.4

Бойко М.С., Рабинович О.Н., Тряскин В.Н. Прямой метод расчета нелинейных изгибающих моментов в корпусе судна при слеминге // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – Вып. 33. – 2010. – С. 74 – 81.

В статье рассмотрены методы и алгоритмы имитационного моделирования волновых нагрузок на корпус судна с учетом нелинейной динамической нагрузки при слеминге. Решения линейной и нелинейной задач разделяются: по результатам решения линейной задачи о качке определяются кинематические параметры движения корпуса, на основе которых определяется величина нелинейной нагрузки. Результаты представляются в виде реализаций во времени процессов, происходящих с корпусом судна на нерегулярном волнении.

УДК 669.14.018.41:621.78

Орлов В.В., Сувориков В.А., Сырцев В.Ю., Башаев В.К., Галкин В.В. Освоение технологии производства сталей для судостроения с пределом текучести 235–390 МПа в толщинах до 50 мм по ГОСТ Р 52927-2008 на ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – Вып. 33. – 2010. – С. 82 – 98.

В работе представлены результаты производства на ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» и освидетельствования на соответствие требованиям Российского морского регистра судоходства листового проката толщиной до 50 мм из стали нормальной и повышенной прочности с гарантированным уровнем Z-свойств по ГОСТ Р 52927-2008.

УДК 629.54:621.436.72

Баранов В.А., Сергеев А.А., Шурпьяк В.К. Анализ перспективности применения различных видов альтернативного топлива на морских судах // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – Вып. 33. – 2010. – С. 99 – 126.

В статье рассмотрены вопросы применения различных видов альтернативного топлива на морских судах в свете ужесточения требований по ограничению выбросов NO_x и SO_x . В качестве альтернативного рассмотрено биотопливо, водотопливная эмульсия, водород, газовое топливо, а так же различные присадки к уже существующим сортам жидкого топлива. Более подробно, как наиболее перспективное, рассмотрено применение природного газа на судах. Рассмотрены способы использования газового топлива в судовых двигателях внутреннего сгорания, способы хранения газового топлива на судне, имеющийся опыт применения газа на судах в России и за рубежом, развитие нормативных требований по его применению.

УДК 629.5.011:629.561

Евенко В.И., Андриюшин А.В., Цой Л.Г., Сергеев А.А. Проект новых требований Правил классификации и постройки морских судов Рос-

сийского морского регистра судоходства к пропульсивной мощности транспортных судов ледового плавания // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – Вып. 33. – 2010. – С. 127 – 145.

В данной статье представлен разработанный совместно РС и ЦНИИМФ проект требований РС к пропульсивной мощности транспортных судов ледового плавания. Проект требований положен в основу соответствующих предложений РФ по формированию Руководства ИМО для судов, совершающих плавание в полярных водах Арктики (Guidelines for Ships Operating in Arctic Ice Covered Waters, MSC/Circ.1056).

УДК 629.5

Лысенков П.М., Серов А.В. Оптимизационные процедуры при центровке судовых валопроводов // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – Вып. 33. – 2010. – С. 146 – 150.

В статье приведен анализ с позиции классификационного общества технологических мероприятий, используемых в общей технологии центровки судового валопровода.

УДК 629.5.062; 629.5.064; 629.5.067-069

Михайлов В.Е., Шурпак В.К. Изменения в требованиях Российского морского регистра судоходства к тонкостенным баллонам из сталей высокой прочности // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – Вып. 33. – 2010. – С. 151 – 164.

В статье произведено сравнение требований Правил классификации и постройки морских судов Российского морского регистра судоходства (Правил РС) и широко применяемого международного стандарта ISO 9809-1 к тонкостенным баллонам из сталей высокой прочности. В результате анализа расчетных формул определено, что в области реальных соотношений толщины стенки к диаметру допускаемое давление для баллонов ISO 9809-1 будет на 15–25 % выше допускаемого Правилами РС. Проведенный расчет цилиндрической оболочки с двумя способами закрепления доннышек позволил определить величину краевого эффекта для доннышек различной формы. В

результате сформулированы требования к геометрии тонкостенных баллонов из высокопрочных сталей, при выполнении которых не возникает существенного краевого эффекта и возможно понизить требования к величине допускаемых напряжений, и подготовлены предложения по изменению требований Правил РС к судовым баллонам.

УДК 621.431.74.004:621.43-53

Шишкин В.А., Русецкий А.А., Иванов М.Ю. Анализ состояния и перспектив развития средств активного управления судами с позиций корректировки требований Российского морского регистра судоходства // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – Вып. 33. – 2010. – С. 165 – 195.

В связи с расширением границ применения средств активного управления судами и перспективами их дальнейшего совершенствования возникает необходимость отражения этих тенденций в соответствующих разделах Правил классификации и постройки морских судов Российского морского регистра судоходства (Правил РС). В статье, на основе сравнительного анализа конструктивных решений САУС различного назначения, опыта их проектирования и эксплуатации, а также требований к ним ведущих классификационных обществ, предлагаются направления и конкретные решения по совершенствованию разд. 7 «Средства активного управления судами» части VII «Механические установки» Правил РС. В данной статье не рассматриваются специфические вопросы, связанные с системами динамического позиционирования, поскольку материал посвящен в основном применению САУС в составе пропульсивных комплексов. Эти вопросы в дальнейшем могут быть рассмотрены особо при работе над развитием требований к САУС.

УДК 629.5.011:621.644.07

Строганова О.А., Рыбакина О.Г., Тимофеев О.Я., Ярцев Б.А., Авдонкин А.С., Балагура С.В., Чернов В.Г. Требования Российского морского регистра судоходства к проектированию, строительству и эксплуатации морских подводных трубопроводов // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – Вып. 33. – 2010. – С. 196 – 209.

В статье рассматриваются основные положения двух нормативных документов Российского морского регистра судоходства (РС): Правил классификации и постройки морских подводных трубопроводов (Правила МПТ) и Руководства по техническому наблюдению за постройкой и эксплуатацией морских подводных трубопроводов (Руководство МПТ). Рассмотрены вопросы нормирования внешних нагрузок и прочности элементов МПТ, требованиям к гибким полимерно-металлическим трубам для МПТ, а также дополнительным мерам по защите подводных трубопроводов в районах с интенсивной ледовой экзарацией. Более подробно рассматриваются вопросы работоспособности стальных труб МПТ при наличии различного вида трещиноподобных дефектов, а также предлагаемая методика для оценки допустимости подобных дефектов.

УДК 629.5.03

Бессонов А.Ю., Викулин В.Б., Жадобин Н.Е., Мачульский В.Б. Электродвигатели электрических исполнительных механизмов ДВС // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – Вып. 33. – 2010. – С. 210 – 219.

В статье описаны основные типы электродвигателей электрических исполнительных механизмов двигателей внутреннего сгорания с электронными регуляторами частоты вращения. Приведены характерные особенности указанных выше электродвигателей, а также рассмотрены их преимущества по сравнению с электродвигателями обычной конструкции.

УДК 621.3.072.8.004.69

Казначеев А.Н., Семенов М.Ю., Цицикян Г.Н. Модернизация нагрузочных устройств с использованием статических регуляторов мощности // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – Вып. 33. – 2010. – С. 220 – 228.

В статье рассматриваются вопросы использования статических регуляторов мощности для модернизации нагрузочных устройств как основного средства тестирования при швартовных испытаниях судов-

вой электростанции. На основе исследования разных способов регулирования мощности сформулированы допустимые ограничения и выбран наиболее оптимальный из них. Предложены пути снижения затрат при изготовлении и эксплуатации нагрузочных устройств с одновременным расширением возможностей их применения.

УДК 629.5.72:543.444

Дерябин В.В., Сазонов А.Е. О возможности применения нейронных сетей для построения модели счисления пути судна // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – Вып. 33. – 2010. – С. 229 – 246.

В статье приводятся последние результаты проведенных авторами исследований по созданию нейронной сети для построения модели счисления пути судна. Статья также знакомит специалистов классификационных обществ с основными сведениями об интегрированных системах навигации.

УДК 629.067:629.5.05

Кулинич А.И., Маринич А.Н., Припотнюк А.В., Устинов Ю.М., Шигабутдинов А.Р., Чернышов А.В. Перспектива развития судовых спасательных средств навигации и связи // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – Вып. 33. – 2010. – С. 247 – 254.

В статье показано, что появление нового и совершенствование технико-эксплуатационных характеристик существующего судового радиооборудования заставляет по-новому определять состав судовых спасательных средств навигации и связи.

УДК 621.396.93

Айзинов С.Д., Солодовниченко М.Б., Сытник А.А. Модернизация системы передачи метеорологической информации СУДС «Высоцк» // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – Вып. 33. – 2010. – С. 255 – 261.

В статье приведены результаты модернизации СУДС «Высоцк», обосновано использование беспроводной линии связи как наиболее экономичной системы. Кроме того, определены места установки датчиков метеорологической информации, информационные показатели (дальность, скорость передачи), которые позволяют использовать линию связи для передачи видеoinформации с применением протокола сжатия MPEG-4. Проведен энергетический расчет радиолинии, на основании которого выбрано оборудование передачи данных.

УДК 629.5.052.3:629.561.5

Ничипоренко Н.Т., Шацбергер Э.М., Сиваченко Б.Н., Яковлев В.Г. Результаты испытаний РЛС «НЕВА-ЛП» на атомном ледоколе «ВАЙГАЧ» // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – Вып. 33. – 2010. – С. 262 – 273.

В статье представлены результаты сравнительного анализа тактической пригодности радиолокационных станций, работающих в диапазоне миллиметровых и сантиметровых волн, при использовании их в качестве радара для определения важных характеристик ледовой обстановки в ближней зоне.

N.A. Reshetov. The Russian Maritime Register of Shipping Participation in the Oil-and-Gas Field Development on the Caspian Sea Shelf: the Present and the Future // Transactions of Russian Maritime Register of Shipping. – Issue 33. – 2010. – P. 3 – 12.

The article describes the process of the oil-and-gas field development in the Northern Caspian Sea. Successful cooperation of Russian Maritime Register of Shipping and the OAO “LUKOIL” has been noted in relation to technical supervision of the facilities under construction and survey of materials and products for them, as well as perspectives for further cooperation. The field facilities’ technical features have been specified. The main attention has been paid to the Korchagin field development. The activities include search and exploration, construction of offshore facilities: ice resistant fixed offshore platforms LSP-1 and LSP-2, offshore offloading unit, subsea pipelines, as well as marine operations to install facilities at the operation site. Besides, attention has been given to the cooperation of Russian Maritime Register of Shipping and the OOO “Petroresurs”, the OOO “Caspian Oil Company”, the OAO “Rosneft Oil Company” during re-equipment of the offshore drilling unit (project 17289), construction of the mobile offshore drilling unit CHILIM (project P5195) and re-equipment of the crane ship ISPOLIN into the mobile offshore drilling unit.

N.N. Grigoryev, S.V. Latukhov, M.A. Gappoyev. Solving the Problem of Minimizing the Human Factor Negative Impact upon the Accident Rate when Navigating in Ice Conditions of the Arctic by Introducing Mandatory Psychophysiological Selection and Monitoring for Seafarers Working under Extreme Conditions // Transactions of Russian Maritime Register of Shipping. – Issue 33. – 2010. – P. 13 – 17.

The article covers issues associated with minimizing the negative impact of the human factor upon the accident rate when navigating in ice conditions of the Arctic where personal experience and intuition are required to ensure safety rather than standards. Special attention has been given to staff selection, training and deployment for navigation along the Northern Sea Route. The necessity for psychophysiological selection and monitor-

ing for seafarers working under extreme conditions has been accentuated. To enhance the safety of navigation, it has been suggested that a special document, namely, the seafarer's psychological passport be developed and used for staff recruitment.

UDC 656.61:629.067

M.D. Yemelyanov. Typical Failure Models for Sea-Going Ships' Critical Components // Transactions of Russian Maritime Register of Shipping. – Issue 33. – 2010. – P. 18 – 35.

The article presents the most frequent failure models for the sea-going ships' critical components including the ultimate (one-time) load model and the cumulative models of damage accumulation, i.e. linear model of corrosion wear, fatigue damage model and the model of friction couple mechanical wear. For the case of the analytical model absence or of insufficient basic data for calculation, the opportunity of applying the method of statistical planning of the experiment for determining the failure probability has been demonstrated. The models may be used to calculate the failure probability for critical components and units of the ship's hull, main engine, reduction gear, shafting and sterntube, propeller and steering gear.

UDC 629.5:656.07:629.061:69.059

E.K. Blinov. Improving the Activities of Russian Maritime Register of Shipping in Newbuilding // Transactions of Russian Maritime Register of Shipping. – Issue 33. – 2010. – P. 36 – 43.

The article gives reasons and substantiations for the RS management decision on establishing the specialized Shipbuilding Division within RS. The Shipbuilding Division activities have been specified in compliance with the actual scope of the national shipbuilding financing by the government, as stated in the relevant federal goal-based program. The review of the world economy current preferences for shipbuilders and shipowners in different countries is of particular interest. Examples of possible RS participation in such preferences are given for the case the Government and the State Duma of the Russian Federation take relevant resolutions.

UDC 623.828.8:621.039

I.A. Baranov, V.Ye. Zlygostev. Floating Nuclear Thermal Power Station of 20870 Project Equipped with Reactor Plants KLT-40C // Transactions of Russian Maritime Register of Shipping. – Issue 33. – 2010. – P. 44 – 54.

The article contains the brief description of the low-capacity nuclear power engineering facilities' development and the background for construction of the floating nuclear thermal power station on the basis of ship reactors KLT-40. It also contains general information on the low-capacity nuclear power station with the floating power unit, the description of the floating power unit including the brief description of the reactor plant and the steam-turbine plant. The ecological aspects of the project have been determined, as well as the intended locations for floating nuclear thermal power stations.

UDC 629.542:661.91:331.108.45

M.N. Krinskaya, A.V. Fokin, Ye.R. Kaigorodov, S.A. Shishkin. Survey of LNG Carriers to the RS Class // Transactions of Russian Maritime Register of Shipping. – Issue 33. – 2010. – P. 55 – 59.

The article covers the RS activities on training personnel to survey ships designed for the carriage of liquefied natural gas in bulk, engaging the American Bureau of Shipping experts. The review of principal types of systems for cargo storage on board the above ships has been made, and their comparative characteristics have been specified. Main particulars of the LNG carrier GRAND ANIVA have been given, which has the RS/LR dual class and is the first RS-classed ship of the type.

UDC 629.5.067:625.173.7

M.A. Gappoyev. Analyzing the Possibility and Expediency of Applying the Risk Theory to Elaborate the Ship Safety Assessment Procedure during Ballast Water Exchange at Sea // Transactions of Russian Maritime Register of Shipping. – Issue 33. – 2010. – P. 60 – 73.

To analyze the possibility and expediency of applying the risk theory to elaborate the ship safety assessment procedure during ballast water exchange at sea, the article considers the procedure of conditional risk application for assessing the safety of sea-going ships, as suggested by M.D. Yemelyanov.

UDC 629.12.539.4

M.S. Boyko, O.N. Rabinovich, V.N. Tryaskin. Direct Method to Calculate Non-Linear Hull Bending Moments under Slamming // Transactions of Russian Maritime Register of Shipping. – Issue 33. – 2010. – P. 74 – 81.

The article considers the methods and algorithms for simulation modeling of wave loads upon the ship's hull, taking into account the non-linear dynamic load under slamming. The linear and non-linear tasks are solved separately: proceeding from the results of solving the linear task of oscillating motions, the kinematic parameters of the hull motions are determined being the basis for the non-linear load value determination. The results are presented as temporal realization of processes, which occur in the hull on irregular seas.

UDC 669.14.018.41:621.78

V.V. Orlov, V.A. Suvorikov, V.Yu. Syrtsev, V.K. Bashaev, V.V. Galkin. Developing the Manufacture Procedure for Shipbuilding Steels with a Yield Strength of 235–390 MPa and Thicknesses up to 50 mm under GOST R 52927-2008 by OAO “Magnitogorsk Metallurgical Concern” // Transactions of Russian Maritime Register of Shipping. – Issue 33. – 2010. – P. 82 – 98.

The article contains the manufacture results of plates of normal and higher strength steel up to 50 mm thick with a guaranteed standard of Z properties under GOST R 52927-2008 by OAO “Magnitogorsk Metallurgical Concern” and their survey for compliance with the requirements of Russian Maritime Register of Shipping.

UDC 629.54:621.436.72

V.A. Baranov, A.A. Sergeyev, V.K. Shurpiak. Analyzing the Prospectives of Using Various Alternative Fuels for Sea-Going Ships // Transactions of Russian Maritime Register of Shipping. – Issue 33. – 2010. – P. 99 – 126.

The article considers issues covering the use of various alternative fuels for sea-going ships in view of strengthening requirements for limitation of the NO_x and SO_x emissions. Biofuel, water-fuel emulsion, hydrogen, gas fuel as well as different additives to existing fuel oils have been considered as alternative fuels. The use of natural gas on board ships has been presented in more detail as the most prospective. The use of gas fuel for marine ICE, gas fuel storage on board, experience in gas application on board ships both in Russia and abroad, as well as elaboration of the application requirements have been reviewed.

UDC 629.5.011:629.561

V.I. Evenko, A.V. Andryushin, L.G. Tsoy, A.A. Sergeyev. Draft Requirements of the Rules for the Classification and Construction of Sea-Going Ships of Russian Maritime Register of Shipping for the Ice Transport Ships' Propulsion Power // Transactions of Russian Maritime Register of Shipping. – Issue 33. – 2010. – P. 127 – 145.

The article contains draft RS requirements for the ice transport ships' propulsion power developed by RS in conjunction with CNIIMF. The draft requirements became the basis for the respective RF proposals for developing the IMO Guidelines for Ships Operating in Arctic Ice Covered Waters (MSC/Circ.1056).

UDC 629.5

P.M. Lysenkov, A.V. Serov. Optimization Procedures to be Used during the Ship's Shafting Alignment // Transactions of Russian Maritime Register of Shipping. – Issue 33. – 2010. – P. 146 – 150.

The article contains the review of technological measures forming part of the general ship's shafting alignment technique, as seen by the classification society.

UDC 629.5.062; 629.5.064; 629.5.067-069

V.E. Mikhailov, V.K. Shurpyak. Amendments to the Requirements of Russian Maritime Register of Shipping for Thin-Walled Cylinders of High Strength Steel // Transactions of Russian Maritime Register of Shipping. – Issue 33. – 2010. – P. 151 – 164.

The article compares the requirements for thin-walled cylinders of high strength steel, as stipulated in the Rules for the Classification and Construction of Sea-Going Ships (RS Rules) to those of the widely applied international standard ISO 9809-1. As a result of reviewing the calculation formulas, it has been determined that, as far as the actual wall thickness-to-diameter relationship is concerned, the permissible pressure for the cylinders described in ISO 9809-1 is by 15–25 % higher than that permitted by the RS Rules. The cylindrical shell analysis for two types of bottom attachment enabled the edge effect value to be determined for different bottom shapes. As a result, the requirements for the geometry of thin-walled cylinders of high strength steel have been formulated, the compliance with which does not involve essential edge effect whereby the requirements for permissible stresses can be lowered, and the suggestions for amending the RS Rules requirements for the ship's cylinders have been prepared.

UDC 621.431.74.004:621.43-53

V.A. Shishkin, A.A. Rusetsky, M.Yu. Ivanov. Review of Status and Perspectives for the Development of Active Means of the Ship's Steering in View of Amending the Requirements of Russian Maritime Register of Shipping // Transactions of Russian Maritime Register of Shipping. – Issue 33. – 2010. – P. 165 – 195.

In view of extending the application of active means of the ship's steering and their prospective elaboration, it becomes necessary to reflect these trends in the respective sections of the Rules for the Classification and

Construction of Sea-Going Ships of Russian Maritime Register of Shipping (RS Rules). Based on the comparative analysis of structural solutions for AMSS of different kinds, their design and operation experience, as well as the relevant requirements of the leading classification societies, the article suggests focus areas and specific solutions for elaborating Section 7 “Active Means of the Ship’s Steering”, Part VII “Machinery Installations” of the RS Rules. The article does not consider specific issues connected to dynamic positioning systems, since the material is mainly dedicated to the AMSS operation as part of propulsion systems. The above issues may be specially considered later when elaborating the requirements for AMSS.

UDC 629.5.011:621.644.07

O.A. Stroganova, O.G. Rybakina, O.Ya. Timofeyev, B.A. Yartsev, A.S. Avdonkin, S.V. Balagura, V.G. Chernov. Requirements of Russian Maritime Register of Shipping for the Design, Construction and Operation of Subsea Pipelines // Transactions of Russian Maritime Register of Shipping. – Issue 33. – 2010. – P. 196 – 209.

The article considers the main provisions of the RS two normative documents, namely, the Rules for the Classification and Construction of Subsea Pipelines (SP Rules) and the Guidelines on Technical Supervision during Construction and Operation of Subsea Pipelines (SP Guidelines). The article focuses on the issues of external load normalization and the SP components strength, on the requirements for flexible polymer-metal pipes for SP, as well as on additional measures for the SP protection in areas of intense ice gouging. The article provides a wide coverage of the SP steel pipes performance for cases of crack-like defects of different types, as well as the procedure for the above defects permissibility evaluation.

UDC 629.5.03

A.Yu. Bessonov, V.B. Vikulin, N.Ye. Zhadobin, V.B. Machulsky. Electric Motors of the ICE Electric Actuators // Transactions of Russian Maritime Register of Shipping. – Issue 33. – 2010. – P. 210 – 219.

The article describes the main types of electric motors of the ICE electric actuators equipped with electronic speed governors. Characteristic

features of the above electric motors have been specified, as well as their advantages as compared to conventional electric motors.

UDC 621.3.072.8.004.69

A.N. Kaznacheyev, M.Yu. Semenov, G.N. Tsitsikyan. Loading Devices' Modernization Using Static Power Governors // Transactions of Russian Maritime Register of Shipping. – Issue 33. – 2010. – P. 220 – 228.

The article considers the aspects of using static power governors for modernization of loading devices as principal testing equipment during the ship's electric power plant mooring tests. On the basis of the study of different types of power governing, the permissible limits have been formulated and the optimum type of power governing has been chosen. The ways of lowering expenses for the manufacture and operation of loading devices with the simultaneous extension of their application have been suggested.

UDC 629.5.72:543.444

V.V. Deryabin, A.Ye. Sazonov. The Possibility to Apply Neural Nets for the Ship's Dead Reckoning Modeling // Transactions of Russian Maritime Register of Shipping. – Issue 33. – 2010. – P. 229 – 246.

The article contains the latest results of the authors' research into the neural net building for the ship's dead reckoning modeling. The article also provides classification societies' experts with the overview of integrated navigation systems.

UDC 629.067:629.5.05

A.I. Kulinich, A.N. Marinich, A.V. Pripotnyuk, Yu.M. Ustinov, A.R. Shigabudinov, A.V. Chernyshov. Prospective Development of the Ship's Life-Saving Navigational and Communication Facilities // Transactions of Russian Maritime Register of Shipping. – Issue 33. – 2010. – P. 247 – 254.

The article demonstrates the necessity of the new approach to the list of the ship's life-saving navigational and communication facilities due to the development of new ship's radio equipment and the improvement of operating characteristics of the existing one.

UDC 621.396.93

S.D. Aizinov, M.B. Solodovnichenko, A.A. Sytnik. Modernization of Meteorological Data Transmission System in VTMS "Vysotsk" // Transactions of Russian Maritime Register of Shipping. – Issue 33. – 2010. – P. 255 – 261.

The article presents the VTMS "Vysotsk" modernization results, substantiating the use of the wireless communication line as the most economical system. Besides, the locations for meteorological data transmitters' installation, information indices (transmission range and velocity) have been determined which enable the use of the communication line for transmitting video information using the compression protocol MPEG-4. Energy calculation for the radio line has been made being the basis for the data transmission equipment selection.

UDC 629.5.052.3:629.561.5

N.T. Nichiporenko, E.M. Schatsberger, B.N. Sivachenko, V.G. Yakovlev. "NEVA-LP" Radar Test Results on Board Nuclear Icebreaker VAIGACH // Transactions of Russian Maritime Register of Shipping. – Issue 33. – 2010. – P. 262 – 273.

The article presents the comparative analysis results of the millimeter- and centimeter-wave radars' tactical fitness when used to determine essential characteristics of ice conditions within short range.

Российский морской регистр судоходства

Научно-технический сборник, вып. 33

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 26.11.10. Формат 60 × 84/16. Гарнитура Гельветика.

Усл. печ. л.: 17,2. Уч.-изд. л.: 15,7. Тираж 250. Заказ 2414.

Российский морской регистр судоходства
191186, Санкт-Петербург, Дворцовая набережная, 8

Тел.: (812) 312-89-59

Факс: (812) 312-89-86