

РОССИЙСКИЙ МОРСКОЙ



РЕГИСТР СУДОХОДСТВА

---

# НАУЧНО- ТЕХНИЧЕСКИЙ СБОРНИК

ВЫПУСК

36

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ

2013

Редакционная коллегия Российского морского регистра судоходства:

Седов С.Н., Евенко В.И., Балагура С.В., Баранов В.А., Бессонов А.Ю., Быстров С.А., Захаров А.А., Землянский П.Л., Колышкин О.В., Копилец И.Н., Кутейников А.А., Маркушина М.Р., Нерсесов А.Г., Пискорский В.Ф., Путрайм А.Р., Сергеев А.А., Стерлинг М.Р., Суворов А.В., Тарица Г.В., Толмачев С.А., Фетисов А.В., Фокин А.В., Шихов П.В., Шишкин С.А.

## Регистру судоходства – 100 лет

---

**С.Н. Седов,**

*генеральный директор*

*ФАУ «Российский морской регистр судоходства»*

### СТО ЛЕТ ДВИЖЕНИЯ ВПЕРЕД

**31** декабря 2013 года Российскому морскому регистру судоходства исполняется 100 лет. Все эти годы деятельность Регистра была направлена на безопасную эксплуатацию судов во всех широтах, включая арктические и антарктические, охрану человеческой жизни на море и сохранность перевозимых грузов. Особое внимание наша организация всегда уделяла вопросам минимизации отрицательного воздействия морского транспорта на окружающую среду и сохранения экологического равновесия в районах судоходства.

Деятельность Регистра ведется с учетом всех современных потребностей отечественного морского транспорта и охватывает широкий спектр направлений. Неизменность высоких требований к качеству нашей работы, эффективность системы управления ресурсами нашей организации, энергичность в отношении поиска новых направлений деятельности – все это позволило Регистру значительно развить свой потенциал и занять достойное место во многих перспективных областях рынка классификационных и экспертных услуг.

Ключевыми задачами, стоящими перед Регистром, являются активное участие в реализации государственных программ по развитию судостроения, постоянное совершенствование научно-технической базы, внедрение современных технологий, своевременная разработка и обеспечение морской индустрии техническими стандартами и правилами международного уровня.

РС является признанным мировым лидером в области разработки технических стандартов для ледоколов и судов ледового плавания. Более 80 % строящихся на класс РС судов традиционно имеют ледовый класс. В настоящее время в классе РС находится более 3000 судов ледового плавания и 33 специа-

лизированных ледокола, включая самые мощные в мире. РС активно участвует в текущих крупных проектах по строительству ледоколов в рамках Программы строительства ледокольного флота России на 2012 – 2014 гг. Среди таких проектов – строительство ледокола с асимметричным корпусом на судостроительном заводе «Янтарь» в Калининграде, ледокола нового поколения мощностью 25 МВт на Балтийском заводе в Санкт-Петербурге, серии ледоколов мощностью 16 МВт на Выборгском судостроительном заводе.

Особо следует отметить возможности РС по классификации судов с атомными энергетическими установками. Мы по-прежнему единственные в мире осуществляем классификацию судов гражданского атомного флота. Под техническим наблюдением РС ведется строительство головного универсального атомного ледокола нового поколения мощностью 60 МВт. Судно будет способно продвигаться непрерывным ходом в сплошном ледяном поле толщиной до 3 м и иметь возможность одинаково эффективно работать как на глубокой воде в западных районах Арктики (Баренцево, Печорское и Карское моря), так и на более мелководных участках в устье Енисея и районе Обской губы. Планируется построить три таких ледокола, которые станут самыми большими и самыми мощными ледоколами в мире. В настоящий момент на Балтийском заводе под техническим наблюдением РС завершается строительство первой в мире плавучей атомной тепловых электростанции (ПАТЭС).

Наличие современных требований к судам ледового класса позволяет РС участвовать в проектах по строительству современных крупнотоннажных танкеров и газовозов, имеющих ледовые категории. В Южной Корее Регистр осуществляет классификацию целого ряда судов, предназначенных для перевозки сжиженного природного (СПГ) и углеводородного газа. В ближайшей перспективе планируется строительство на класс РС до 13 современных газовозов для перевозки СПГ в порядке обеспечения потребностей Группы «Газпром» по морской транспортировке газа с таких проектов, как «Владивосток СПГ» и «Сахалин-2». Соответствующее соглашение о стратегическом партнерстве в классификации и сертификации танкеро-газовозов СПГ мы подписали с компанией «Газпром маркетинг и трейдинг» в июне этого года. Благодаря напряженной работе по

развитию данного направления в РС и серьезным инвестициям в подготовку квалифицированных кадров на протяжении последних пяти лет, сегодня с удовлетворением можно констатировать, что Регистр имеет необходимый потенциал для освидетельствования газозовов.

РС накопил значительный опыт по осуществлению технического наблюдения за всем комплексом объектов обустройства морских нефтегазовых месторождений, включая подводные трубопроводы. РС имеет собственные Правила разработки и проведения морских операций и постоянно участвует в подготовке и проведении морских операций по буксировке объектов к месту установки, наблюдает за производством материалов и изделий для таких объектов.

Сегодня Регистр добился участия во всех текущих проектах по освоению морских нефтегазовых месторождений на шельфе Российской Федерации, среди которых «Кравцовское» в Балтийском море, им. Ю. Корчагина и им. В. Филановского в северной части Каспийского моря, «Приразломное» в Баренцевом море. Кроме того, на класс Регистра были построены буровые установки «Полярная Звезда» и «Северное Сияние», предназначенные для Штокмановского газоконденсатного месторождения в Баренцевом море. Выдающийся с технической точки зрения проект, осуществленный при участии Регистра – стационарный морской ледостойкий отгрузочный причал «Варандей» в Баренцевом море. Это – уникальное морское сооружение, занесенное в Книгу рекордов Гиннеса как самый северный круглогодично действующий нефтяной терминал в мире.

Еще одно интересное и перспективное направление – наземные объекты, в частности, заводы по сжижению природного газа, где РС может оказывать сертификационные услуги.

РС как классификационное общество имеет давнюю историю взаимодействия с Военно-Морским Флотом России и в настоящее время участвует в ряде проектов по строительству, ремонту и переоборудованию кораблей и вспомогательных судов для ВМФ. Техническое наблюдение РС дает возможность проектировать корабли и вспомогательные суда для военного флота с учетом передовых достижений мирового судостроения и требований международных конвенций, что является неотъемлемым условием плавания судов ВМФ в международных водах и их беспрепятственного захода в иностранные морские порты.

К сожалению, представители бизнеса часто ассоциируют Российский морской регистр судоходства исключительно с контролем за техническим состоянием морских судов и плавучих сооружений. Между тем следует отметить, что потенциал РС позволяет ему распространять свои компетенции на новые отрасли, способствуя внедрению передовых технологий и оптимизации производственных процессов в широком диапазоне. Регистр все больше внимания уделяет непрофильным направлениям, в частности, экспертной оценке в любом виде экономической деятельности. Одной из областей является оказание сертификационных услуг. Организация ведет активную работу по усилению присутствия на этом рынке.

Регистр сертифицирует системы менеджмента предприятий на соответствие требованиям стандартов серии ИСО, а также продукцию на соответствие требованиям технических регламентов РФ и Таможенного союза. РС является органом по сертификации Единой национальной системы аккредитации, имеет аттестат аккредитации в системе ГОСТ Р. Результаты работы аудиторов РС признаются европейским органом по сертификации EUROCERT S.A.

Отдельное направление развития услуг РС в этой области – сертификация на соответствие требованиям государственных военных стандартов систем менеджмента качества предприятий, участвующих в выполнении государственного оборонного заказа, и организаций, осуществляющих исследования, разработку, производство, поставку, обеспечение, эксплуатацию, ремонт и утилизацию военной техники и продукции оборонного назначения. Для предоставления услуг в этой области РС аккредитован в Системе добровольной сертификации (СДС) «Военный Регистр». Таким образом, мы имеем возможность предоставлять своим клиентам целый комплекс услуг, что позволяет нашей организации занимать лидирующие позиции в сфере сертификации.

По-прежнему актуальной для Регистра остается тема контейнерных перевозок. Регистр сотрудничает с широким кругом компаний, занимающихся проектированием, производством, испытаниями и эксплуатацией контейнеров. Под техническим наблюдением Регистра в настоящий момент находятся контейнеры для перевозки генеральных грузов, контейнеры с открытым верхом и съемной крышей, контейнеры для перевозки сыпучих грузов,

контейнеры для перевозки взрывчатых материалов и ядерных отходов, контейнеры-цистерны для перевозки химических продуктов, неохлажденных и охлажденных газов, контейнеры, перегружаемые в открытом море (оффшорные) для доставки грузов на морские нефтегазодобывающие платформы. В 2012 году РС также допущена модель впервые произведенного в России контейнера-цистерны для перевозки жидкого гелия. В работе над высокотехнологичными проектами РС уделяет особое внимание обеспечению экологической безопасности и защите окружающей среды.

РС осуществляет экспертизу промышленной безопасности опасных производственных объектов, активно сотрудничает со страховыми компаниями в области оценки производственных рисков, на основании Приказа Минэнерго №182 от 19.05.2010 года активно развивает новый вид деятельности – проведение энергетического обследования предприятий с последующим оформлением энергетического паспорта.

В современных условиях только слаженное взаимодействие всех составляющих способно обеспечить эффективный результат работы в целом. Принимая во внимание многоплановость нашей деятельности, в том числе выходящей за рамки классификации судов, богатый опыт, международное признание и широкую сеть представительств по всему миру, можно с уверенностью говорить о том, что Регистр сегодня выступает интегратором инновационных решений в морской индустрии. Здесь формируется техническая политика и закладывается динамика технического развития. Наша деятельность охватывает все фазы жизненного цикла судов и плавучих сооружений. Мы сотрудничаем с крупными научными центрами, институтами и проектно-конструкторскими бюро, работающими в области судостроения и судоходства. Нашими постоянными партнерами являются судостроительные и судоремонтные верфи, судоходные компании, морские учебные заведения.

Таким образом, можно сказать, что сегодня Регистр является системообразующим участником морской индустрии. Сто лет работы нашей организации – это сто лет движения вперед отечественного судостроения и судоходства.

**А.В. Дутов,**  
генеральный директор ФГУП  
«Крыловский государственный научный центр»

**Е.М. Апполонов,**  
заместитель генерального директора  
ФГУП «Крыловский государственный научный центр»

**О.Я. Тимофеев,**  
заместитель генерального директора  
– начальник 5 отделения  
ФГУП «Крыловский государственный научный центр»

## **РОССИЙСКИЙ МОРСКОЙ РЕГИСТР СУДОХОДСТВА И КРЫЛОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР – ГАРАНТЫ СОЗДАНИЯ ПЕРЕДОВОЙ МОРСКОЙ ТЕХНИКИ**

**На** протяжении всей своей 100-летней истории Российский морской регистр судоходства был и есть теми надежными и «узкими воротами», только через которые создаваемая морская техника могла попасть в море. Также и ФГУП «Крыловский государственный научный центр», до недавнего времени – ЦНИИ им. акад. А.Н.Крылова многие десятилетия вносил и вносит большой вклад в отчетственное судостроение, решая многие важнейшие задачи в тесном сотрудничестве с Регистром. В советское время для обеспечения прогрессивности создаваемой морской техники наряду с прохождением согласований с Регистром все эскизные и технические проекты рассматривались и оформлялись заключением ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова.

Наиболее продолжительное время основным направлением деятельности РС было наблюдение за созданием судов различного типа. При этом правила Регистра постоянно совершенствовались. В этом непосредственное участие принимал и институт. Тандем Регистр и ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова оперативно реагировал, как сейчас говорят, на жизненно важные вызовы. В частности, под эгидой Регистра были осуществлены силами института экспедиционные плавания д/э «Куйбышевгэс», результаты которых вошли в золотой фонд строительной механики

корабля. В ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова была разработана и внедрена в правила Регистра методика «Вероятностная оценка деления судов на отсеки». Важно отметить, что осуществленный в начале второй половины прошлого века переход на крупнотоннажный флот потребовал резкого переосмысления расчетной базы, что способствовало внедрению вероятностных подходов применительно к расчетам прочности судов. Развивались статистические оценки определения внешних сил и связанная с этим проблема нормирования. В результате взаимной деятельности Регистра и ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова были разработаны «Нормы прочности транспортных судов».

Наиболее продуктивным видом совместной деятельности стало нормирование судов ледового плавания и ледоколов. В этой области СССР, а теперь Россия фактически стали законодателями во всем мире.

С началом работ в нашей стране (70-е годы прошлого века) по освоению шельфа, что было связано, в основном, с разведкой морских месторождений, Регистр оперативно и с участием института разработал Правила классификации и постройки плавучих буровых установок полупогружного и самоподъемного типов, которые затем постоянно совершенствовались.

В сложные 90-е годы ЦНИИ им. акад. А.Н.Крылова и Регистр соединила необычная, порученная институту работа по проектированию и строительству судна очистки жидких радиоактивных отходов типа «Ландыш». Со стороны Регистра она включала наблюдение за проектированием и постройкой, сертификацию зарубежного и отечественного специального оборудования, ввод судна в эксплуатацию.

В конце 90-х годов прошлого века началась активная совместная деятельность Регистра и института в отношении продления срока службы без докования ППБУ типа «Шельф», которые эксплуатировались на Каспийском и Баренцевом морях. В результате этой работы в 2002 году появился документ «Нормативно-методические указания по определению технического состояния корпусов плавучих полупогружных буровых установок», рекомендации которого были использованы при дефектации погружной буровой платформы «Обская».

В последующие годы наступил очередной этап общей для нас деятельности: началось создание новых для страны морских

объектов – добычных платформ, терминалов для отгрузки углеводородов, затем морских трубопроводов, средств их укладки и др. С участием института были разработаны правила Регистра по этим техническим средствам. Примером тому служат ныне действующие Правила классификации, постройки и оборудования ПБУ и МСП, в которых охвачены все аспекты проектирования стационарных морских сооружений. Следует также отметить, что присутствующая в этих правилах часть XV «Оценка безопасности ПБУ/МСП» оказалась пионерской по сравнению с правилами других классификационных обществ и содержит, например, введенный для оценки степени согласия группы экспертов коэффициент конкордации, который вошел в требования МАКО.

Кроме того, в связи с активизацией в институте проектных работ вследствие включения в состав института ЦКБ «Балтсудопроект», началось непосредственное взаимодействие с Регистром по конкретным проектам. Одним из первых примеров такого взаимодействия стало определение требований по присвоению класса «эскортный буксир» и совместное проведение натурных испытаний для подтверждения класса. В качестве другого примера можно привести оперативное согласование с Главным управлением РС рабочей конструкторской документации на модернизацию платформы «Орлан», которая сейчас эксплуатируется на шельфе о. Сахалин.

Еще одно новое направление общей деятельности возникло в связи с разработкой институтом для различных заказчиков проектов нетрадиционных морских операций. Это потребовало разработки новых Правил разработки и проведения морских операций, а также разработки дополнительных требований к операциям установки МСП на месторождении.

Важно также отметить еще весьма существенное направление совместной деятельности – проектирование плавучих железобетонных сооружений: доков, причалов, баз обеспечения и пр. Здесь, наряду с рассмотрением технической документации, Регистром при участии института разрабатывались и совершенствовались Правила постройки корпусов морских судов и плавучих сооружений с применением железобетона (последняя редакция была выпущена в 2000 году).

На наш взгляд, укреплению связей между Крыловским государственным научным центром и Регистром способствует

также проявленная центром инициатива подключения Регистра к рассмотрению концептуальных проектов морской техники, разрабатываемых по Федеральной целевой программе «Развитие гражданской морской техники на 2009-2016 гг.». Это позволяет Регистру вникать в новые разработки на стадии, предшествующей последующему проектированию.

В будущем Российский морской регистр судоходства и Крыловский государственный научный центр ожидает еще более сложная работа, связанная с интенсификацией освоения Арктики, созданием нестандартной морской техники, в том числе подводно-подледной.

Гарантом эффективного взаимодействия Регистра и Крыловского государственного научного центра является участие их специалистов в работе Научно-технического совета (НТС) Регистра. В разные годы председателями секций НТС по теории корабля, прочности судов, мореходным качествам и других были видные сотрудники центра (института). Кроме того, специалисты Регистра и центра работают вместе в подкомитетах и рабочих группах ИМО, МКОБ, МАКО и других организаций.

Любая организация – это прежде всего люди. Мы имеем и имеем дело с прекрасными специалистами, отдающими прогрессу российского флота все свои знания и умение. В этом мы видим залог уверенности в продолжении тесных деловых связей между Российским морским регистром судоходства и Крыловским государственным научным центром, между нашими сотрудниками и учеными на благо российского судостроения и Российского флота.

**С.И. Буянов,**

*генеральный директор ЗАО «ЦНИИМФ»*

## **РОССИЙСКИЙ МОРСКОЙ РЕГИСТР СУДОХОДСТВА И ЦНИИМФ. СТРАТЕГИЯ СОТРУДНИЧЕСТВА (ПАРТНЕРСТВА)**

**К**онец 2013 года и начало 2014 года отмечены знаменательными событиями в деятельности Российского морского регистра судоходства – одного из ведущих членов Международной ассоциации классификационных обществ (МАКО), отмечающего свой 100-летний юбилей, и Центрального ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательского и проектно-конструкторского института морского флота (ЦНИИМФ) – ведущей научной организации России в области морского транспорта, которой 2 марта 2014 года исполняется 85 лет. Все эти многие годы деятельность Регистра и ЦНИИМФ, сотрудничающих по многим вопросам, была направлена на обеспечение безопасности мореплавания, охраны человеческой жизни на море, надежной морской перевозки грузов, предотвращение загрязнения окружающей среды, повышение экономической эффективности и конкурентоспособности российского флота.

Сотрудничество РС и ЦНИИМФ имеет многосторонний характер. Многие научно-исследовательские работы, выполненные учеными ЦНИИМФ в тесном взаимодействии со специалистами РС в области мореходных качеств и гидромеханики судна, теории и расчета гребных винтов, направляющих насадок, повышения пропульсивных и маневренных качеств, остойчивости судов (в том числе при ветре и волнении), прочности транспортных судов и других областях, завершились разработкой, изданием и совершенствованием норм и правил РС.

Одними из наиболее актуальных задач, которые выделены в рамках Государственной программы «Развитие судостроения на 2013-2030 годы» и Федеральной целевой программы «Развитие гражданской морской техники на 2009-2016 годы», являются эффективное и экологически безопасное освоение морских

месторождений углеводородов в Арктике, а также обеспечение эффективной эксплуатации Северного морского пути. Поэтому обеспечение прочности судов ледового плавания, винтеризация высокотехнологичных крупнотоннажных ледокольных судов, включая газовозы, ледостойкие морские плавучие и стационарные буровые установки, являются одними из главных направлений деятельности как Регистра, так ЦНИИМФ.

Специалисты ЦНИИМФ и РС активно участвуют в разработке современных нормативов РС для ледокольных судов. В рамках совместных исследований разработаны проекты и предложения по требованиям к пропульсивной мощности судов ледового плавания, к прочности элементов пропульсивной установки. Интенсивное освоение арктического шельфа и шельфа замерзающих морей обуславливает стремительное развитие ледокольной техники, что приводит к необходимости специального рассмотрения и одобрения Регистром новой технической документации. В таких случаях специалисты ЦНИИМФ выполняют специальные экспертизы на соответствие конструкторской и технической документации требованиям и нормативам РС.

В настоящее время ведущие верфи, проектно-конструкторские бюро, фирмы производители пропульсивных комплексов постоянно обращаются в ЦНИИМФ за выполнением таких услуг. В этой области ЦНИИМФ признан Регистром как экспертная научная организация в отношении научно-исследовательских и проектно-конструкторских работ и услуг, выполняемых для всех типов судов – объектов технического наблюдения РС.

Большое значение для РС и ЦНИИМФ имеет участие в деятельности таких международных организаций, как Международная морская организация (ИМО), Хельсинская комиссия (ХЕЛКОМ), Арктический Совет, Совет стран Баренцева моря, по выработке современных стандартов безопасности морского судоходства и решений, не противоречащих интересам Российской Федерации.

Разработка ИМО Обязательного Международного кодекса по безопасности для судов, эксплуатируемых в полярных водах (Полярный кодекс), приобретает важнейшее значение, что обусловлено обостряющейся конкуренцией в районах Арктического шельфа и напрямую связано с экономическими и политическими интересами Российской Федерации. В российской

делегации в работе над указанным документом принимают участие представители РС и ЦНИИМФ, которые являются основными разработчиками технических предложений с российской стороны. РС и ЦНИИМФ совместно разработали и внесли основополагающие для обеспечения безопасности арктического судоходства предложения по ледовой классификации судов, пропульсивной мощности и другие. Большое значение имеет включение в состав Полярного кодекса Ледового сертификата судна, одного из основных документов, обеспечивающих безопасность при эксплуатации судов в ледовых условиях. В настоящее время РС и ЦНИИМФ являются общепризнанными организациями, обеспечивающими отечественных и зарубежных судовладельцев этим важным документом. Для оперативного решения текущих вопросов по данной проблематике регулярно проводятся совместные совещания, а также двухсторонние встречи между специалистами ЦНИИМФ и РС. Анализ работы над Полярным кодексом показал, что успешная работа над такими важными документами требует более тесных организационных форм сотрудничества двух организаций. С учетом последнего была создана совместная рабочая группа для выработки согласованных позиций и решений по указанному документу. Такие формы сотрудничества будут полезны и при решении других ответственных задач и важных проблем, стоящих перед РС и ЦНИИМФ.

В рамках межправительственного сотрудничества ЕС и Балтийских государств по международным проектам ХЕЛКОМ РС и ЦНИИМФ разрабатывают предложения по предотвращению различных загрязнений морской среды на Балтийском море в результате судоходной деятельности, включая перенос нежелательных водных организмов с судовыми балластными водами, сброс сточных вод с судов, выбросы в атмосферу окислов азота и т.д.

С принятием ИМО Международного кодекса по управлению безопасной эксплуатацией судов и предотвращением загрязнения (МКУБ) в ЦНИИМФ и РС были развернуты скоординированные работы по подготовке к внедрению в судоходных компаниях требований МКУБ. ЦНИИМФ отработал состав документов Системы управления безопасностью (СУБ) для компаний и их судов, а РС – порядок освидетельствования компаний и судов на

соответствие их СУБ требованиям МКУБ. В результате десятки судоходных компаний, включая крупнейшие (ДВМП, СЗРП, Волготанкер и др.) получили Документ о соответствии компании требованиям МКУБ (ДСК), а их суда – Свидетельство об управлении безопасностью (СВУБ). Состав и содержание документов и порядок освидетельствования постоянно актуализировались ЦНИИМФ и РС.

Еще одним примером успешной совместной деятельности по вопросам безопасности является разработка Технического регламента «О безопасности объектов морского транспорта», утвержденного постановлением Правительства РФ в 2010 году. Тендер на выполнение этой работы, объявленный Минпромэнерго России, выиграл ЦНИИМФ. РС принял активное участие в написании отдельных разделов документа и защите его на общественных слушаниях. В настоящее время идет работа по его корректировке и актуализации.

Сотрудничество РС и ЦНИИМФ и сегодня успешно развивается и является одним из необходимых условий, обеспечивающих высокие стандарты безопасности мореплавания, конкурентно-способность отечественного морского транспорта и судостроения, защиту интересов Российской Федерации.

Руководство и коллектив ЦНИИМФ поздравляет своих коллег в Российском морском регистре судоходства со 100-летием со дня его образования и желает здоровья, счастья и дальнейших успехов.

УДК 629.12.001.11

*А.Г. Назаров, канд. техн. наук, КБ "Albatross Marine Design", Таиланд*

## ОСОБЕННОСТИ ОЦЕНКИ ОСТОЙЧИВОСТИ МАЛЫХ СУДОВ

*Ключевые слова: остойчивость, малые суда, нормирование*

В связи с проводимой Российским морским регистром судоходства (РС) и другими классификационными обществами (КО) работой по совершенствованию нормативно базы, особое значение приобретает актуализация требований к остойчивости как одному из основных мореходных качеств малых судов (т.е. судов с длиной корпуса  $LH < 24\text{м}$ ). В целях повышения безопасности малых судов (МС), в статье поставлены задачи анализа существующих требований к остойчивости в неповрежденном состоянии и выработки рекомендаций по их совершенствованию с точки зрения проектанта.

### 1 Особенности остойчивости

Говоря об остойчивости МС, необходимо помнить их некоторые особенности. Например, для МС характерны существенно различные архитектурные типы, соотношения главных размерений и применяемые определения водонепроницаемости; неучет этих особенностей при нормировании будет приводить к исключению целых типов судов (например, катамаранов) из нормативного поля, как получилось в Техническом регламенте [12]. Диаграммы статической остойчивости (ДСО) большинства современных МС обрываются на углах заливания. Это особенно характерно для прогулочных судов и судов низших категорий. МС эксплуатируются в режиме высоких относительных скоростей, что сопровождается эффектами изменения посадки и остойчивости в динамическом режиме. МС имеют ограниченный бюджет постройки

и зачастую эксплуатируются непрофессионалами, поэтому критерии их остойчивости должны быть простыми для понимания, расчета и оперативного контроля в процессе эксплуатации (рис. 1).



Рис. 1  
Тест на смещение людей к борту на катере XP980  
(проект AMD, сертификация DNV)

## 2 Критерии устойчивости

Все существующие критерии устойчивости можно условно разделить на несколько групп:

- требования к начальной устойчивости и ДСО;
- критерии погоды, заключающиеся в оценке внешнего воздействия на судно (ветер, волнение);
- специальные требования, относящиеся к узкоспециальным задачам эксплуатации и отдельным типам судов.

Наибольшее применение при проектировании МС находят критерии международных стандартов ISO 12217-1 и ISO 12217-3 (см. таблицу). Новизна требований стандартов ISO заключается в комплексном подходе к оценке основных мореходных качеств: устойчивости, плавучести и непотопляемости. Например, наличие у судна блоков плавучести позволяет уменьшить надводный борт и снижать требования к устойчивости, и т.д. Критерии стандарта ИСО [3] приближены к характерным для МС случаям эксплуатации: это обеспечивает возможность их оперативного контроля. Например, вместо метацентрической высоты  $h_0$ , которую трудно оценить без выполнения расчетов загрузки судна, в стандарте ИСО для МС применен альтернативный подход – нормируется угол крена при смещении людей к борту (offset load test) – см. рис. 1. Он является основным значимым критерием для МС низших категорий с длиной  $L_H \leq 6 - 8$  м; аналогичный критерий предусмотрен в правилах GL [6] для судов  $L_H \leq 10$  м и др. Заметим, что аналогичный критерий присутствует и в ГОСТ 19105-79 [8], которому соответствовало большинство лодок и катеров  $L_H \leq 6$  м советской постройки. Однако значения кренящих моментов и допустимые углы крена отличаются: в ISO 12217 [3] они определяются при смещении к борту в наиболее неблагоприятное положение всех людей. В ГОСТ 19105-79 [8] безопасный угол крена устанавливается при смещении к одному борту 60% полезной нагрузки; груз массой, равной 40% грузоподъемности, должен быть размещен в диаметральной плоскости. При этом подходе критерий максимума плеча устойчивости не используется. Для судов высших категорий в стандарте ISO 12217-1 применяется критерий погоды, для которого в отличие от громоздких вычислений [10,11], амплитуда бортовой качки определяется простыми выражениями  $25+20/V_D$  для категории А и  $20+20/V_D$  для категории В, где  $V_D$  – водоизмещение, м<sup>3</sup>.

Сводная таблица требований к остойчивости малых моторных судов в неповрежденном состоянии

Критерий	ISO 12217 A, B	ISO 12217 C, D	HSC Code Одно-корпусные	HSC Code Много-корпусные	GL Суда L<24 м	MCA SCV Code	NBS	IMO Res. 749(18)	PC/МПС РУ/МС	ГОСТ 19105-79
Критерии погоды										
С учетом качки	+	-	+	+	-	-	-	+	+	-
Без учета качки, только действие ветра	-	+	-	+	-	-	-	-	+	-
На вершине волны	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-
С учетом разрушающегося волнения (удар обрушивающейся волны в борт)	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-
Начальная остойчивость										
Метацентрическая высота	-	-	+	-	+	+	Открытые суда	+	+	-
Угол крена при смещении людей к борту	+	+	Пассажирские суда	Пассажирские суда	-	+	Открытые суда	+	+	-
Надводный борт при смещении людей к борту	-	+	-	-	-	+	Открытые суда	-	+	+
Совместное действие смещения людей и крена на циркуляции	-	-	Пассажирские суда	Пассажирские суда	Для судов L<10м	-	-	+	+	-
Крен на циркуляции	-	-	-	+	Для судов L<10м	-	-	-	+	-

Требования к ДСО											
Угол максимума											
Угол заката	+	-	+	-	+	+	+	+	+	+	-
Угол заливания	-	-	-	-	Однокор- пусные суда L>10м	-	-	-	-	+	-
Максимальное плечо устойчивости	+	+	-	-	-	-	-	-	-	+	-
Площадь ДСО	+	-	+	-	-	+	+	+	+	+	-
Площадь ДСО - перерасчет для катамаранов и отно- сительно широких судов	+	-	+	-	+	+	+	+	+	+	-
Максимальный восста- навливающий момент	-	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-
Специальные критерии											
Тест на поворот на 90 гра- дусов на скорости	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+
Тест на подъем челове- ка с воды	-	Суда	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Действие кранов и подъемных устройств	-	L<8м	-	-	-	+	+	+	+	-	-
Требования к судам, выполняющим буксировку	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	-
Требования к судам с блоками плавучести и RIB	-	-	-	-	-	+	+	+	+	-	-
тест на спрямление силами экипажа	+	-	-	-	-	+	+	+	+	-	-

Автором выполнен анализ условий удовлетворения критериев устойчивости в стандартах ИСО 12217-1 и ИСО 12217-3 для однокорпусных моторных судов из числа проектов КБ «AMD» (рис.2). В качестве параметра значимости  $S$  критерия использовано отношение допустимого значения критерия  $K_P$  к фактическому значению  $K_A$ , т.е.  $S=K_P/K_A$ . Таким образом, наиболее значимые критерии имеют параметр значимости, близкий к единице  $S \rightarrow 1$ . Результаты анализа убедительно показывают, что для судов низших проектных категорий С и D наиболее значимым является критерий смещения людей к борту (рис.3); значимость возрастает с уменьшением длины судна. Из опыта сертификации МС этот же критерий является основным для назначения пассажироместности. Критерии крена при действии ветра и углы заливания не показывают существенной корреляции с длиной корпуса судна  $L_H$ .

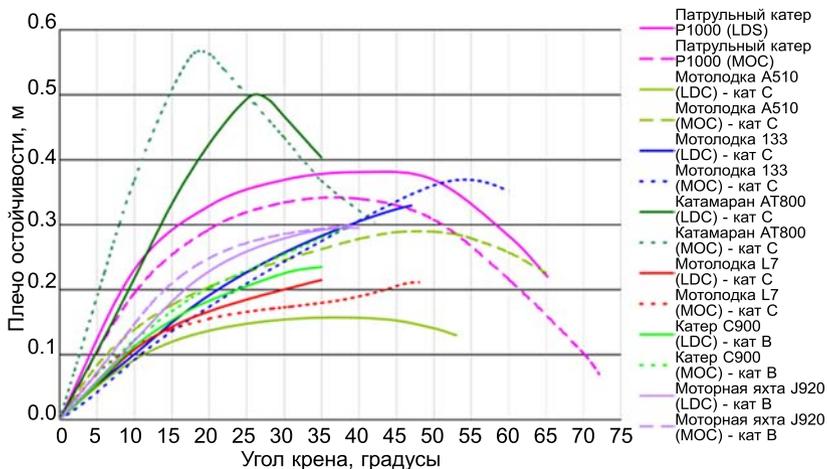


Рис. 2  
Примеры диаграмм устойчивости МС для состояния в полном грузу (LDC) с минимальной нагрузкой (MOC)

Для судов высших категорий А и В (рис.4) тест на смещение людей к борту имеет существенно меньшее значение; критерии углов заливания и максимального плеча остойчивости примерно равноценны. Для судов категории А наиболее жестким при проектировании оказывается критерий погоды. Очевидно, приведенные выводы полностью подтверждают практику проектирования и эксплуатации МС.

Правила SCV Code [7] морской администрации Великобритании (MCA) применяются для МС коммерческого и специального назначения длиной до 24 м. Следует отметить, что сам документ предполагает как альтернативный вариант соответствие требованиям стандарта ИСО 12217.

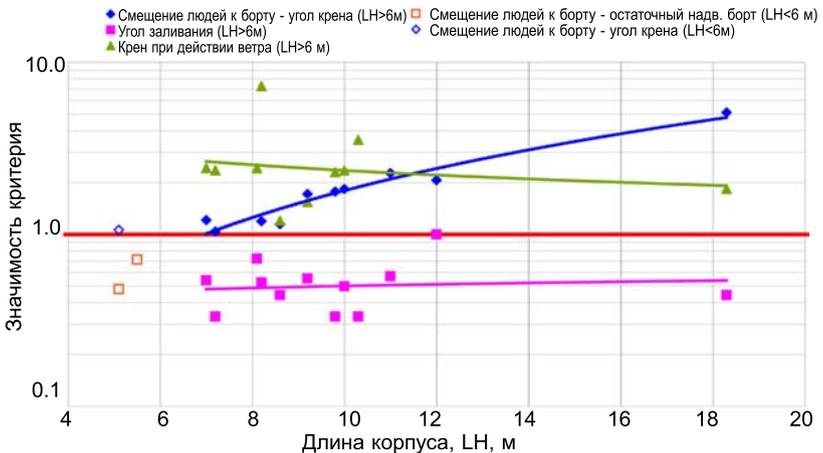


Рис. 3  
Значимость критериев остойчивости согласно стандартам ИСО 12217-1 и ИСО 12217-3 для судов категории С

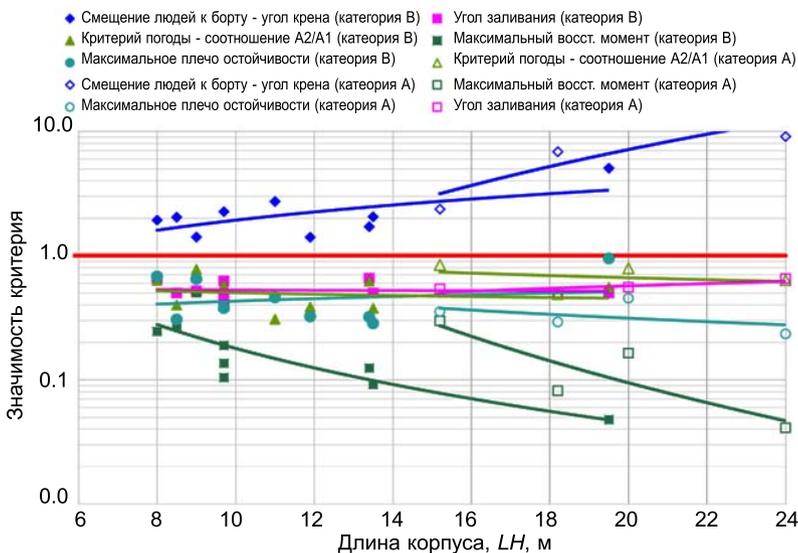


Рис. 4  
Значимость критериев остойчивости согласно стандарту ИСО 12217-1 для судов категорий А, В

В Скандинавских странах применяются критерии правил NBS [5]. Анализ значимости критериев HSC Code [2], иногда применяемых КО для коммерческих и специальных МС, представлен автором в [4]. Все критерии HSC Code для неповрежденного состояния практически равноценны ( $S=0,3-0,7$ ), кроме поперечной метацентрической высоты, которая наименее значима ( $S=0,1-0,2$ ). Определяющим случаем для однокорпусных МС специального назначения является остойчивость после затопления машинного отделения.

В практике Регистра судоходства Украины [10], для нормирования используется ряд критериев, не имеющих аналогов в мировой практике. Эти же критерии, с небольшими дополнениями, позаимствованы РС [11] для прогулочных МС. Применение этих критериев вызывает сложности у проектировщиков; получение высших категорий судами практически невозможно, причем и суда высших категорий с СЕ сертификатами не могут соответствовать этим

критериям. Например, в [9] автором рассмотрен критерий устойчивости на разрушающемся волнении, фактически представляющий собой требование сохранения устойчивости при ударе обрушивающейся волны в борт, что лишено смысла и на реально существующих судах не может быть выполнено.

В нововведенном Техническом регламенте [12] критерии основаны на требованиях к диаграммам устойчивости; в частности, угол заливания  $\theta_d \geq 60^\circ$ , метацентрическая высота  $h_0 \geq 0,5$  м, плечо устойчивости  $l_m \geq 0,20$  или  $0,25$  м в зависимости от категории при угле  $\theta_m \geq 30^\circ$ . Кроме того, в [12] предусмотрены требования к непотопляемости, которые в международной практике [3,5–7] для МС вообще не применяются. Очевидно, что большинство реально существующих МС этим критериям не соответствуют (см. рис. 2), и документ [12] нуждается в полной и скорейшей переработке.

Из приведенной выше таблицы очевидно, что из всей системы требований критерии согласно [10] и [11] являются наиболее экстенсивными, но в то же время специфические для МС эксплуатационные случаи в них учитываются недостаточно.

### **3 Особенности расчетов**

Существует проблема формализации непроницаемых объемов МС из-за различий в нормативных документах и практике для малых и «больших» судов. В резолюции ИМО А.749(18) [1], допускается включать в расчет надстройки и рубки, не являющиеся водонепроницаемыми, вплоть до углов их заливания. В стандартах ИСО 12217 надстройки и рубки включаются в расчет, если остекления и закрытия соответствуют стандарту ИСО 12216, что означает равнопрочность остекления конструкциям рубки (расчетное давление  $p \geq 5$  кПа) и категориям водонепроницаемости 1 и 2. Это принципиальный момент для МС. Во-первых, надстройки представляют собой единой целое и под ними, как правило, нет водонепроницаемой палубы. Во-вторых, при формальном игнорировании надстроек будет некорректно учитываться сопутствующий дифферент судна, что может приводить к ошибке в опасную сторону. Для выполнения расчетов используется программное обеспечение (ПО) с возможностью чтения геометрии непосредственно из графической базы данных трехмерного чертежа, причем большинство ведущих КО (кроме РС) не предъявляют каких-либо требований к его сертификации (за исключением бортового ПО).

#### 4 Опыт кренования

Резолюция ИМО А.749(18) [1] предполагает, что методика опыта кренования должна быть адаптирована для судов малого размера; к сожалению, это не всегда учитывается КО, в т.ч. при разработке нормативных документов. Опыт показывает, что требование разницы между судами серии при точности измерения водоизмещения 2% и отклонении положения центра тяжести 1% для МС недостижимо, так как превышает точность измерений посадки, достижимую на практике рулеткой или по маркам углублений (рис.5). Очевидно, что для МС указанные допускаяемые значения должны быть увеличены; для судов  $L < 10$  м проведение опыта кренования в стандартном понимании вообще утрачивает смысл, так как требуемую точность обеспечить невозможно. В этом случае определение водоизмещения взвешиванием и оценка остойчивости тестом на смещение нагрузки дают более адекватные результаты.

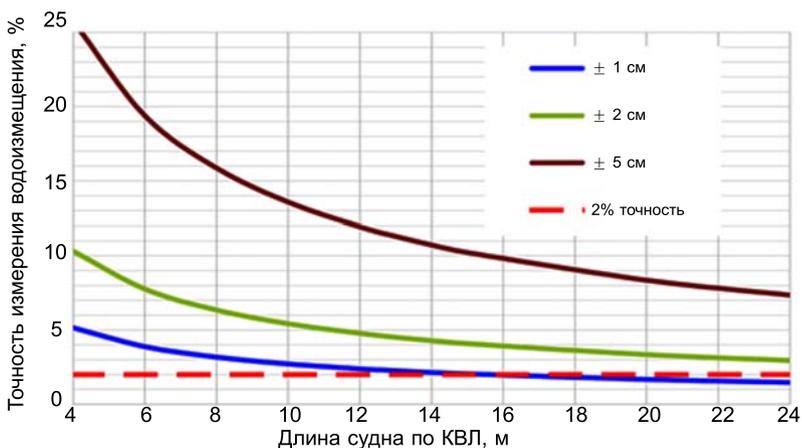


Рис. 5

Достижимая точность определения водоизмещения в зависимости от точности замеров посадки и длины для современных МС

## **Заклучение**

В настоящее время существуют общепринятые подходы к оценке остойчивости МС, которым необходимо следовать при разработке национальных правил. Критерии остойчивости и методы оценки остойчивости должны быть приближены к эксплуатационным случаям, физически обоснованы, соответствовать достижимой точности и не быть перегружены вычислениями. Нормативная деятельность должна опираться на практику и реально существующие суда и соответствовать современному уровню развития техники, даже если при этом нарушается «преемственность» нормативной базы.

## *Список литературы*

1. Code on Intact Stability for All Types of Ships Covered by IMO Instruments - Resolution A.749(18). – IMO, London, 1993.
2. International Code of Safety for High Speed Craft (2000 HSC Code) – IMO, London, 2008.
3. ISO-12217. Small Craft Stability and Buoyancy Assessment and Categorization.
4. Nazarov A., Leeprasert A., Piamalung A., Suebyiw P., Wongkitrungrueng W. Design Development for 16.7m Rescue/Patrol Boat// Surveillance, Search and Rescue Craft Conference, SURV-8, RINA, 2013 - Poole, UK, pp.55-62.
5. Nordic Boat Standard - Commercial Boats less than 15 metres - DNV. Maritime Administrations of Sweden Norway, Finland, Iceland, Denmark. 1990.
6. Germanischer Lloyd. Rules for Classification and Construction of Yachts and Boats up to 24m, 2002.
7. Small Vessels in Commercial Use for Sport or Pleasure, Workboats and Pilot Boats – Alternative Construction Standards. MGN 280 – SCV Code. - Maritime Coastguard Agency, UK.
8. ГОСТ 19105-79. Суда прогулочные гребные и моторные. Типы, основные параметры и общие технические требования.
9. Назаров А.Г. О критериях остойчивости малых судов на разрушающемся волнении // Інновації в суднобудуванні та океанотехніці - III міжнародна науково-технічна конференція. – Миколаїв. – 2012.
10. Правила классификации и постройки малых судов. – Регистр судоходства Украины, 2005.
11. Правила классификации и постройки малых прогулочных судов. –СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2012.
12. Технический регламент Таможенного союза ТР ТС 026/2012. О безопасности маломерных судов.

**Г.В. Тарица**, канд. техн. наук, ФАУ «Российский морской регистр судоходства»

**И.В. Щербаков**, ООО ПКБ «Петробалт»

**К.С. Вераксо**, ЗАО «ЦНИИМФ»

## **ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЕКТНЫХ РЕШЕНИЙ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ МОРЕХОДНЫХ КАЧЕСТВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЭКСПЛУАТАЦИИ ГОЛОВНОГО СУДНА**

*Ключевые слова: скоростное патрульное судно, береговая охрана, ледовый класс, мореходные характеристики, проектирование, правила Российского морского регистра судоходства*

### **Введение**

Создание современных судов невозможно без всеобъемлющего и объективного анализа проектных и фактических характеристик, достигнутых в период эксплуатации головного судна. Такой анализ позволяет определить достоверность проведенных модельных испытаний и точность расчетов, проводимых с помощью современных специализированных программных продуктов, выявить и внедрить в дальнейшем те проектные решения, которые могут улучшать характеристики серийных судов.

При переходе к строительству серийных судов в большинстве случаев необходима корректировка проекта по результатам строительства, испытаний и опытной эксплуатации головного судна.

Проект 22120 был разработан ПКБ «Петробалт» для строительства скоростного патрульного судна ледового класса по требованиям правил и под техническим наблюдением Российского морского регистра судоходства. Головное судно было построено на ОАО «Морской завод «Алмаз»» и после успешных государственных испытаний было передано в декабре 2010 года заказчику – Федеральной пограничной службе Российской Федерации.

При заключении контракта на строительство второго судна одним из главных требований, поставленных перед проектантом

заказчиком, по улучшению эксплуатационных характеристик было требование по оптимизации мореходных качеств судна, с соблюдением всех норм, предъявляемых РС к плавучести, устойчивости и непотопляемости.

В данной статье рассмотрены проектные решения, реализованные на втором судне пр. 22120, заводской номер 051.

Подписанию контракта на первое серийное судно этого проекта предшествовало утверждение Решения Заказчика «Об изменении комплекта поставки пограничного патрульного судна пр. 2210 зав. № 051».

Основными направлениями изменений в проекте, в соответствии с утвержденным Решением, стали:

- оптимизация мореходных качеств судна;
- оптимизация расположения судовых помещений применительно к задачам, решаемым Береговой охраной;
- изменение и установка дополнительного судового комплектующего оборудования.

В настоящей статье сделан акцент на оптимизации мореходных качеств судна.

## 1 Главные размерения и эксплуатационные характеристики судов пр. 22120

Тип судна: однокорпусное судно с развитой надстройкой и ходовым мостиком, расположенным в носовой части судна, с двухвальной энергетической установкой, расположенной в кормовой части и состоящей из двух дизель-редукторных агрегатов с валопроводами и гребными винтами регулируемого шага. Главные размерения и основные эксплуатационные характеристики судов приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Главные размерения и эксплуатационные характеристики**

Главные размерения и эксплуатационные характеристики	Головное судно	Серийное судно
Класс РС	КМ⊗ЛУ4⊗A1	КМ⊗Arc4⊗Aut 1-C
Длина наибольшая, м	71	
Длина по КВЛ, м	67,67	
Длина между перпендикулярами, м	64,78	
Ширина наибольшая, м	10,4	
Ширина по КВЛ, м	9,17	9,18
Высота борта на миделе, м	6,0	
Осадка по КВЛ, м	3,62	3,5
Дедвейт, т	250	297,4
Водоизмещение полное, т	1160	1276,7
Масса судна порожнем, т	905	963,6
Твердый балласт, т	70	5
Мощность энергетической установки, кВт	2*3750	2*3850
Объем топлива, м <sup>3</sup>	235	297
Район плавания	Неограниченный	
Наибольшая скорость хода, уз.	21	21,8
Дальность плавания по запасам топлива, миль	4900	6300
Скуловые кили коробчатой конструкции. Суммарная площадь, м <sup>2</sup> .	17	15

## 2 Оптимизация мореходных качеств

Проведенные модельные исследования мореходности судна по проекту 22120, зав. №050, подтвержденные в ходе эксплуатации, позволили сделать следующие основные выводы:

1) Движение со скоростью  $V \geq 18$  уз (на встречном волнении силой 4 балла) сопровождается брызгообразованием в носовой оконечности судна, которое приводит к забрызгиванию палубы, а при отрицательных температурах – к ее обледенению (рис. 1).



а)



б)

Рис. 1

Встречное волнение силой 4 балла, скорость хода 18 узлов (а) и 21 узел (б)

2) При повышении встречного волнения (6 баллов) качка судна существенно возрастает по сравнению с плаванием на волнении силой 4 балла. Амплитуда килевой качки – до  $7^\circ$ , вертикальной – 2,3 м. Амплитуды вертикальных ускорений при плавании со скоростью 12 уз в носовой оконечности достигают  $a_{z3} \% = 0,67g$ , в

кормовой части судна – 0,37g. Движение судна со скоростью хода 18 уз сопровождается интенсивным брызгообразованием, а также зарыванием носовой оконечности в волну до 100 раз в час. Ход судна на встречном волнении силой 6 баллов в таких условиях сопровождается повышенной утомляемостью экипажа и снижением его работоспособности. По условиям качки, ускорений и заливаемости движение судна на встречном 6-балльном волнении ограничено до скорости хода не более 9 уз.

3) Амплитуда бортовой качки судна на волнении силой 6 баллов в положении лагом к волне без хода достигает  $\theta_3 \% \approx 27^\circ$ , вертикальных и поперечных ускорений в рубке – 0,25g и 0,28g, соответственно. С увеличением скорости хода из-за значительного роста демпфирования наблюдается уменьшение амплитуд бортовой качки судна.

4) Большие углы крена при действии ветра и волнении на циркуляции.

Все вышеперечисленные особенности поведения судна на воде в полной мере удовлетворяют правилам и нормам РС, но для улучшения эксплуатационных характеристик и условий службы экипажа заказчиком были предъявлены повышенные требования.

Для уменьшения брызгообразования и зарывания носовой оконечности в волну при движении на встречном волнении был увеличен развал носовой ветви шпангоутов (рис. 2).

Для оптимизации характеристик качки, устойчивости на курсе, остойчивости и непотопляемости были внесены следующие проектные изменения:

- уменьшен радиус скулы (см. рис. 2);
- увеличены площади плоского борта и плоского днища, цилиндрическая вставка и полнота кормовой ветви шпангоутов;
- добавлен кормовой скег в ДП судна;
- понижено второе дно с целью понижения центра тяжести оборудования;
- уменьшена парусность судна.

Понижение центра тяжести судна было достигнуто путем уменьшения высоты второго дна и платформы, перераспределением крупногабаритного оборудования и увеличением массы корпуса судна ниже ВЛ. Парусность удалось понизить за счет уменьшения габаритов и перераспределения помещений надстройки.

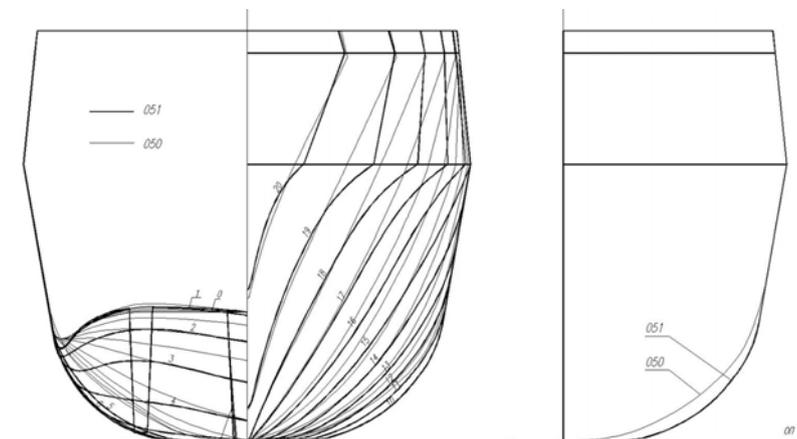


Рис. 2  
Увеличение развала шпангоутов и уменьшение радиуса скулы

Изменения, внесенные в форму обводов, геометрию надводной части надстройки в совокупности с понижением положения центра тяжести привели к значительным улучшениям мореходных качеств судна, что было подтверждено на модельных испытаниях в гидродинамическом бассейне ФГУП «Крыловский ГНЦ» и на Государственных сдаточных испытаниях в Финском заливе. Положительный эффект был получен за счет увеличения плеч остойчивости формы при различных углах крена (рис. 3).

Были улучшены значения критериев проверки остойчивости по правилам РС (табл. 2), значение критерия погоды для различных вариантов нагрузки судна приблизилось к оптимальному ( $K=1,5$  см. гл. 2.1 части IV «Остойчивость» Правил классификации и постройки морских судов). Изменение плеч остойчивости формы и центра тяжести привело к более устойчивому поведению судна при малых углах крена, что можно увидеть на кривой плеч диаграммы динамической остойчивости (рис. 4).

Таблица 2

**Сравнение критериев остойчивости для различных вариантов загрузки**

Наименование	Значение для судов заводских номеров					
	050	051	050	051	050	051
	в полном грузу		50 % запасов		10% запасов	
П о л н о е водоизмещение, т	1160,2	1261,1	1139,1	1220,7	1130,4	1218,9
Дедвейт, т	255	297,4	233,9	257,1	225,3	255,3
Продольный ЦТ, м	28,66	28,52	29,06	28,54	28,89	28,55
Исправленный ЦТ, м	4,28	4,23	4,29	4,24	4,33	4,29
Возвышение ЦВ, м	2,27	2,15	2,247	2,104	2,237	2,102
И с п р а в л е н н а я начальная МЦВ, м	0,748	0,664	0,773	0,658	0,742	0,608
Осадка на миделе, м	3,62	3,58	3,59	3,50	3,57	3,5
Площадь под кривой ДСО до 30°, мрад	0,111	0,103	0,107	0,1	0,098	0,092
Площадь под кривой ДСО до 40° или угла заливания, мрад	0,199	0,188	0,193	0,184	0,178	0,17
Площадь под кривой ДСО от 30° до 40° или угла заливания, мрад	0,089	0,086	0,085	0,084	0,08	0,078
Максимальное плечо ДСО при углах более 30°, м	1,086	0,815	1,079	0,822	1,043	0,773
Угол максимального плеча ДСО, град	72,6	65,5	73,0	66,2	73,0	66,0
Угол заката ДСО, град	119,5	120,4	119,6	119,7	118,9	117,3
Статический угол крена от постоянного ветра, град	10,99	10,28	11,08	10,77	12,31	11,68
Критерий погоды	2,06	1,52	1,83	1,42	1,65	1,33

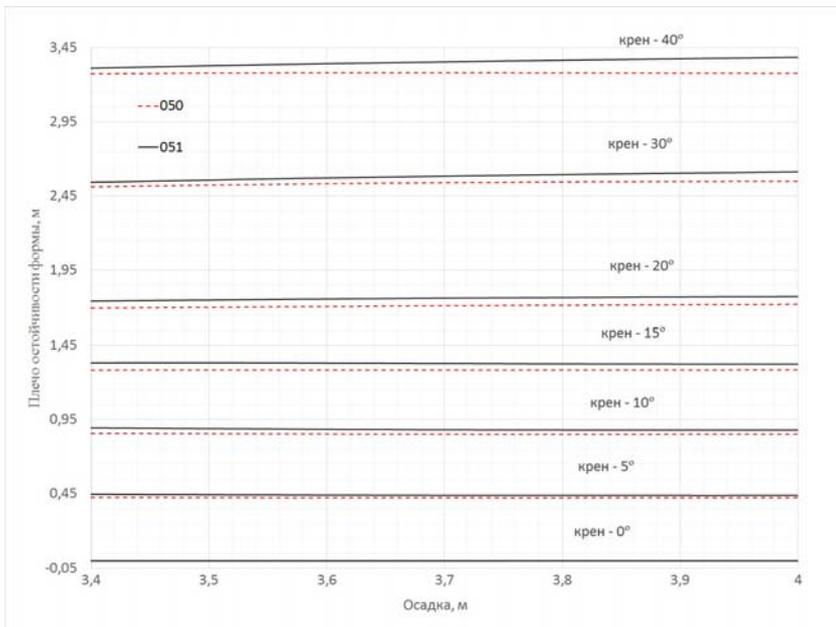


Рис. 3  
Изменение плеч остойчивости формы

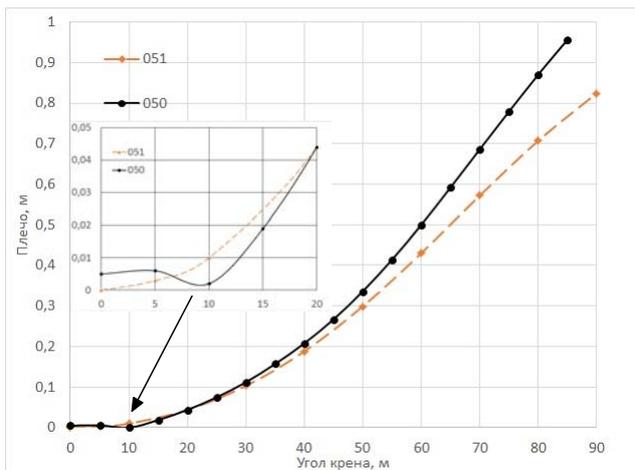


Рис. 4  
Кривые плеч диаграммы динамической остойчивости

На диаграмме плеч динамической остойчивости для судна зав. № 050 можно заметить впадину в районе 10 град крена, что привело к излишней чувствительности судна от действия ветра, волнения или переноса груза. На диаграмме плеч динамической остойчивости для судна зав. № 051 этого провала нет, что позволило улучшить параметры качки.

Результаты мореходных и буксировочных испытаний, проведенных в гидродинамическом бассейне ФГУП «Крыловский ГНЦ», показали, что на регулярном встречном волнении 3 балла модель не раскачивалась и не забрызгивалась; на волнении 5 баллов наблюдалась незначительная килевая качка модели на скоростях ниже 10 уз (для натуры), забрызгивания не наблюдалось (рис. 5).

Амплитуда бортовой качки на волнении 5 баллов при положении судна лагом к волне и без скорости –  $6.3^\circ$ .



Рис. 5  
Модель судна пр. 22120 (зав. № 051), волнение 5 баллов, скорость хода – 22 уз

### **3 Маневренность**

Одним из направлений улучшения мореходных качеств была минимизация кренов на циркуляции.

Изменения обводов судна, такие, как увеличение цилиндрической части, уменьшение радиуса скулы, применение кормового скега в ДП судна решили эту задачу в полной мере (табл. 3).

Таблица 3

**Сравнение мореходных качеств судов пр. 22120**

Скорость, уз	Показатели маневренности для судов					
	зав. № 050			зав. № 051		
	Угол пере- кладки руля	Макс. крен, град	Диаметр уст. циркуляции, кВт/длин корпуса	Угол пере- кладки руля	Макс. крен, град	Диаметр уст. циркуля- ции, кВт/ длин корпуса
14	-	-	150	6,5/17	35	-
19	20	-	-	8,7/22	12	10
20	5	130	-	-	10	11
21,8	5	150	1,8/5	-	10	8

**4 Ходкость на чистой воде**

Одним из главных требований заказчика ко второму судну было сохранение скорости не менее 21 уз. Поэтому перед проектантом стояла непростая задача, в которой необходимо было улучшить мореходные качества с минимальными потерями по скорости.

Также необходимо отметить, что мощность энергетической установки и характеристики винторулевого комплекса серийного судна остались аналогичными головному.

Перед проведением модельных испытаний была проведена аналитическая оценка влияния на сопротивление изменений формы обводов корпуса. С помощью программного комплекса NAPA по методу Holtrop84 и конечнообъемных методов решения уравнений Новье-Стокса (CFD, RANS), реализованных в программном комплексе, была получена кривая буксировочного сопротивления, картина распределения градиентов давления по корпусу судна (рис. 6, 7), аналитическая модель профиля волны.

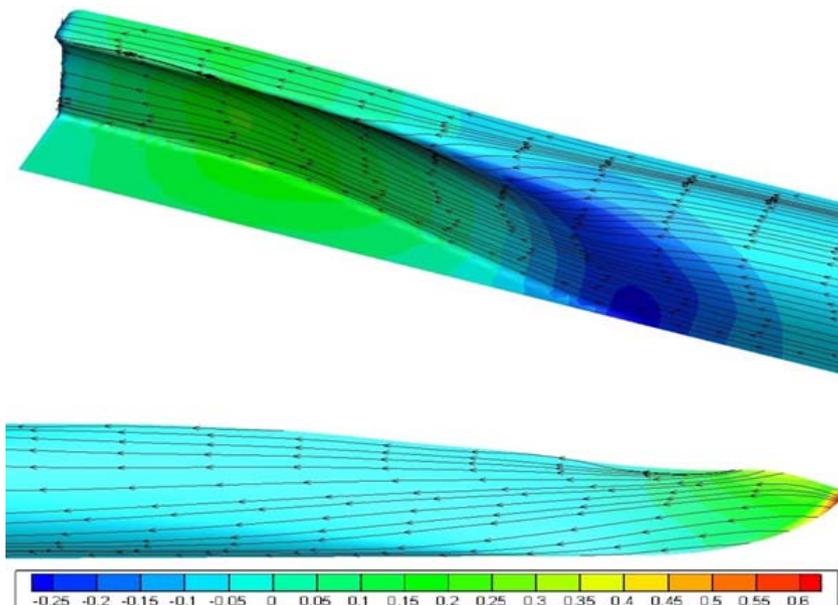


Рис. 6  
Распределения градиентов давления по корпусу судна

Достоверность оценивалась сравнением расчетных и экспериментальных значений гидродинамического сопротивления для судна зав. № 050. Анализ показал совпадение расчетных и экспериментальных значений гидродинамических сопротивлений с точностью до 3%. На рис. 8 представлены результаты экспериментального и расчетного определения гидродинамического сопротивления для рассматриваемых вариантов. Предлагаемые решения показали снижение гидродинамического сопротивления для судна зав. № 051 в сравнении с судном зав. № 050 на 5–10%, что позволило прогнозировать требуемую скорость не менее 21 уз.

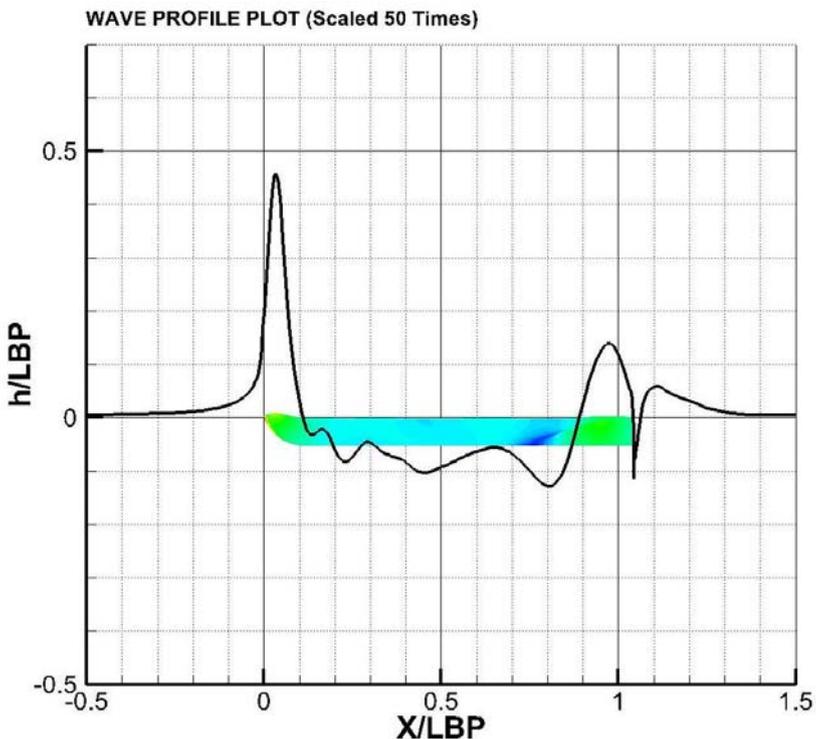


Рис. 7  
Распределение давлений и линий тока по корпусу судна

После проведения натуральных скоростных испытаний судно показало наибольшую достижимую скорость 21,8 уз при осадке 3,4 м. Положительным эффектом для сохранения высокой скорости при увеличении водоизмещения и смоченной поверхности послужило смещение центра величины в корму (табл. 4) в соответствии с рекомендациями для скоростных судов [1] и смещение ординаты оси линии вала от ДП на 200 мм каждая.

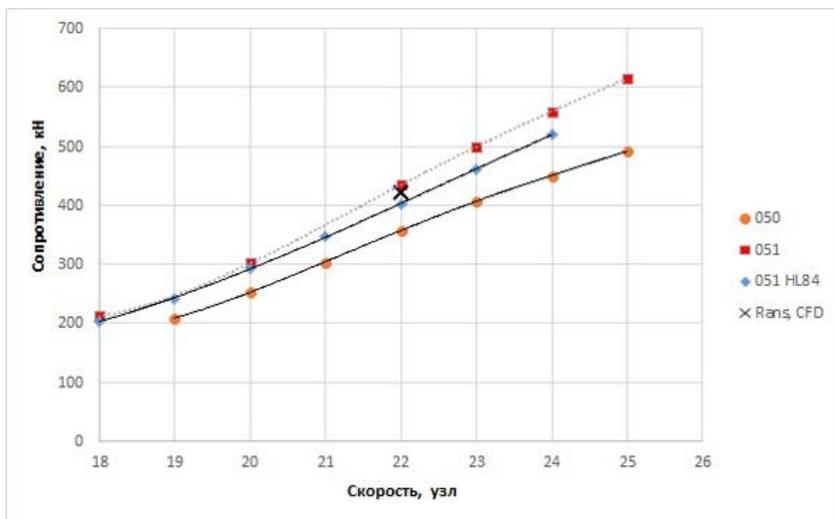


Рис. 8  
Результаты расчетов гидродинамического сопротивления

Таблица 4  
Сравнение геометрических параметров формы корпуса

Судно	Осадка, м	Объем, м <sup>3</sup>	Xс, м	WSA, м <sup>2</sup>	CB
Зав. № 050	3,4	1012	28,856	834	0,506
Зав. № 051	3,4	1131	28,498	884	0,558

## Выводы

В процессе строительства головного судна вносится значительное количество изменений и усовершенствований. Характеристики построенного головного судна могут существенно отличаться от проектных. Для оптимизации характеристик серийных судов целесообразно проводить сравнительный анализ результатов модельных и натурных испытаний головного судна.

Рассмотренные методы анализа с применением программного комплекса NAPA дали результаты, с высокой степенью достоверности, позволяющие уверенно использовать данный программный комплекс при проектировании судов.

Принятые проектные решения по глубокой модернизации головного судна позволили достичь улучшенных эксплуатационных характеристик серийных судов как по скорости и дальности плавания, так и по уровню комфорта для экипажа.

### *Список литературы*

1. Справочник по теории корабля. Гидромеханика, сопротивление движению судов. Судовые движители. Том 1. Под ред. Я.И. Войткунского. – Л., Судостроение, 1985.
2. Справочник по теории корабля. Статика судов. Качка судов. Том 2. Под ред. Я.И. Войткунского. – Л., Судостроение, 1985.
3. Правила классификации и постройки морских судов. Том 1. – СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2013.
4. Модельные мореходные испытания судна по проекту 22120: технический отчет. – УДК 629.5.017. – Вып. № 44576. – Договор № 193 – 55/08 – 2008.
5. Модельные исследования характеристик ходкости патрульного судна пр. 22120: научн.-техн. отчет по НИР, договор №196-54/08. – УДК [629.5.018.71:629.561.7]. – Вып. № 44837. – 2009.
6. Отчет по испытаниям модели судна пр. 22120, договор № 490 – 11. – 2011.

**Ю.И. Ефименков**, канд. техн. наук, ЗАО «ЦНИИМФ»

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

**Г.В. Маркозов**, канд. техн. наук, ЗАО «ЦНИИМФ»

**С.А. Сотсков**, ФАУ «Российский морской регистр судоходства»

## **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАЗРАБОТКИ ТРЕБОВАНИЙ К СУДАМ ОГРАНИЧЕННОГО РАЙОНА ПЛАВАНИЯ R2-RSN(4,5)**

*Ключевые слова:* суда смешанного плавания, требования к прочности корпусов, долгосрочные характеристики волнения, ограничение по волнению, надежность прогнозов волнения, редуциционные коэффициенты к общим и местным волновым нагрузкам

Многолетний опыт использования судов смешанного (река-море) плавания на бесперевалочных перевозках показал их высокую экономическую эффективность и достаточную эксплуатационную надежность, что обусловило заинтересованность судовладельцев в постройке новых и модернизации существующих таких судов.

Однако между судами смешанного (река-море) плавания **R2-RSN** и **R3-RSN** существует достаточно большая разница, как в части требуемых характеристиках прочности корпусов судов, так и устанавливаемых таким судам постоянных эксплуатационных ограничений по допустимому режиму волнения, районам плавания и сезонам эксплуатации.

Практика обращения судовладельцев, а также опыт проектирования и модернизации судов смешанного (река-море) плавания выявили целесообразность введения промежуточного класса, суда с которым допускались бы к эксплуатации в тех же районах, что и суда ограниченного района плавания **R2-RSN**, но с более жестким ограничением по волнению.

Задача разработки требований к судам ограниченного района плавания **R2-RSN(4,5)** решалась интерполяцией действующих

требований РС, предъявляемых к судам смешанного (река-море) плавания **R2-RSN** и **R3-RSN**.

Результаты выполненного анализа показали, что по большинству позиций требования к судам **R2-RSN** и **R3-RSN** полностью совпадают. Выявленные при анализе различия приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Отличие требований действующих правил РС к судам смешанного (река-море) плавания R2-RSN и R3-RSN**

Характеристика		Требования правил РС для районов плавания	
		R2-RSN	R3-RSN
Общая прочность	1.1. Редукционные коэффициенты к волновым изгибающим моментам и $W_{min}$	$\varphi=0,94-0,26L \times 10^{-2}$	$\varphi=0,71-0,22L \times 10^{-2}$
	1.2. Учет изгибающего момента MF при ударе волн в развал бортов	Учитывается для судов длиной от 100 м до 200 м при большом развале бортов	Не учитывается
Местная прочность	2.1. Редукционные коэффициенты к волновым давлениям и расчетным ускорениям при качке	$\varphi=1,0-0,20L \times 10^{-2}$	$\varphi=0,86-0,18L \times 10^{-2}$
	2.2. Минимальные толщины	Уменьшение на 10% (для рамных связей в балластных отсеках – на 15%)	Уменьшение на 20% (для рамных связей в балластных отсеках – на 30%)
	2.3. Коэффициенты допускаемых напряжений, не зависящие от запаса общей прочности корпуса	Увеличиваются на 5%	Увеличиваются на 10%
Остойчивость	3.1. Критерий ускорения	Требуется проверка 60°	Проверка не требуется
	3.2. Угол заката диаграммы статической остойчивости		Допускается уменьшение до 50° при предъявлении дополнительных требований

Принимая во внимание, что для судов **R2-RSN(4,5)** районы плавания сохраняются такими же, как и для судов **R2-RSN**, порядок учета ударного изгибающего момента, подходы к назначению минимальных толщин и коэффициентов допускаемых напряжений, а также требования к остойчивости предложено сохранить, как для судов **R2-RSN**. Редукционные коэффициенты к волновым общим и местным нагрузкам подлежат уточнению.

Результаты выполненного ретроспективного анализа требований, предъявляемых российскими классификационными обществами к судам смешанного (река-море) плавания, показали, что история этих судов началась с выхода судов внутреннего плавания в прибрежные морские районы. Допустимые условия плавания в море таких судов определялись с ориентацией на уровень безопасности плавания, вытекающий из действующих в то время требований РС к судам неограниченного района плавания. Пониженный стандарт прочности корпусов судов внутреннего плавания компенсировался при этом введением для условий их плавания в море жестких ограничений по районам плавания, допустимым сезонам эксплуатации и по волнению.

В начале 70-х годов практически одновременно появились требования РС и Российского Речного Регистра (РРР) к новым классам судов смешанного плавания (ИСП РС и «М-СП» РРР), предназначенным для эксплуатации в достаточно обширных морских районах. Требования к этим классам судов разрабатывались на основе одинаковых подходов к нормированию характеристик общей и местной прочности корпусов и были достаточно хорошо согласованы между собой.

С середины 70-х годов до настоящего времени требования к прочности корпусов судов смешанного (река-море) плавания с классом РРР сохранились без значительных изменений. Совершенствование требований РРР к судам этого типа развивалось, в основном, в направлении уточнения влияния эксплуатационных ограничений на допустимые районы плавания судов.

Требования к прочности корпусов судов смешанного (река-море) плавания с классом РС претерпели значительные изменения. Развитие этих требований шло в направлении их унификации с требованиями, предъявляемыми к традиционным морским судам.

Особенностью судов смешанного (река-море) плавания являлось то, что они допускались к эксплуатации в море с жестким ограничением по допустимому волнению, вероятность превышения которого в результате неоправданного прогноза волнения достаточно высока. Это обусловило необходимость считаться при нормировании прочности с объективной возможностью попадания судов на волнение, превышающее установленное погодное ограничение.

Развитие подходов к нормированию характеристик прочности корпусов судов смешанного (река-море) плавания и определению допустимых условий их эксплуатации осуществлялось на основе использования полновероятностной схемы, в первую очередь, за счет уточнения влияния статистических характеристик оправдываемости прогнозов волнения на долгосрочные характеристики редуцированного волнения, т.е. волнения, на которое попадает судно, использующее места убежища для укрытия от неблагоприятных погодных условий.

Новый этап в развитии требований РС к судам смешанного (река-море) плавания начался в середине 90-х годов в связи с введением класса IIIСР (**R3-RSN**). На протяжении нескольких лет уровень требований правил РС к этим судам был существенно пересмотрен, и в правилах 1997 г. реализован ряд уточнений, приводящих к значительному смягчению требований к характеристикам общей и местной прочности корпусов таких судов по сравнению с первоначальными требованиями, которые сохранились, в основном, вплоть до настоящего времени.

Результаты выполненного анализа показали, что при решении задачи уточнения требований к прочности корпусов судов ограниченного района плавания **R2-RSN(4,5)** можно опираться на подтвержденный опытом эксплуатации уровень надежности, обеспечиваемый для судов смешанного (река-море) плавания действующими правилами РС.

Для определения редуцированных коэффициентов к волновым нагрузкам судов ограниченного района плавания **R2-RSN(4,5)** предлагается использовать расчетный аппарат, основанный на следующих основных принципах:

– регламентируемые волновые нагрузки для новых эксплуатационных ограничений должны обеспечивать судну необходимый, подтвержденный опытом эксплуатации уровень безопасности;

– при оценке уровня безопасности плавания учитывается, что судно, эксплуатирующееся в море, по объективным причинам, связанным с возможными ошибками прогноза погоды, может попасть на волнение, превышающее установленное ограничение;

– при определении количественных показателей уровня безопасности плавания судна с установленными эксплуатационными ограничениями должны учитываться долгосрочные характеристики ветра и волнения в характерных морских районах, регламентируемое судну удаление от места убежища, надежность прогнозирования волнения, ходкость судна на волнении;

– необходимый уровень безопасности плавания судна принимается равным уровню безопасности плавания судна-эталона.

Под судном-эталонем понимается судно с теми же главными размерениями корпуса, обводами, с той же энерговооруженностью и характеристиками потери скорости на волнении, что и рассматриваемое судно ограниченного района плавания **R2-RSN(4,5)**. Плавание судна-эталона осуществляется с эксплуатационными ограничениями, установленными правилами РС для существующего класса, достаточный уровень безопасности которого подтвержден длительным опытом эксплуатации, а волновые нагрузки при этом соответствуют регламентируемым действующими правилами РС для соответствующего класса.

В качестве судов-эталонов рассматриваются суда ограниченного района плавания **R2-RSN**, районы и сезоны плавания которого совпадают с устанавливаемыми для судна ограниченного района плавания **R2-RSN(4,5)**.

С учетом отмеченного выше, волновые нагрузки для судна ограниченного района плавания **R2-RSN(4,5)** определяются из решения следующего уравнения относительно  $\psi$ :

$$Q^*(\psi X|y_1, y_2, \dots, y_n) = Q_n^*(X|z_1, z_2, \dots, z_m),$$

где  $Q^*(\psi X|y_1, y_2, \dots, y_n)$  – долгосрочная обеспеченность (вероятность превышения) расчетного значения нормируемой волновой нагрузки для судна ограниченного района плавания **R2-RSN(4,5)** при установленных этому классу эксплуатационных ограничениях, характеризуемых совокупностью параметров  $y_1, y_2, \dots, y_n$ ;

$Q_n^*(X|z_1, z_2, \dots, z_m)$  – долгосрочная обеспеченность (вероятность превышения) расчетного значения нормируемой волновой нагрузки для судна-эталона при установленных такому судну эксплуатационных

ограничениях, характеризуемых совокупностью параметров  $z_1, z_2, \dots, z_m$ ;

$X$  – расчетная величина нормируемой волновой нагрузки, регламентируемая правилами РС для судна-эталона;

$\psi$  – коэффициент, характеризующий изменение расчетной волновой нагрузки для судна **R2-RSN(4,5)** по отношению к регламентируемым правилами РС для судна-эталона ограниченного района плавания **R2-RSN**.

Редукционные коэффициенты для волновых нагрузок судна ограниченного района плавания **R2-RSN(4,5)** определяются по следующим зависимостям:

- для волновых изгибающих моментов и  $W_{min}$

$$\varphi = \psi' \varphi^3;$$

- для волновых давлений

$$\varphi_r = \psi'' \varphi_r^3,$$

где  $\varphi_\psi$  и  $\varphi_r^3$  – редукционные коэффициенты к волновым изгибающим моментам и волновым давлениям, регламентируемым действующими правилами РС для судна-эталона (**R2-RSN**).

В качестве расчетной оценки уровня безопасности плавания используется обеспеченность нормируемой величины рассматриваемой волновой нагрузки в разрешенных для судна соответствующего класса условиях эксплуатации, для определения которой используется следующая зависимость:

$$Q(\psi X | (y_1, y_2, \dots, y_n)) = \frac{1}{S_{max}} \int_0^{S_{max}} \int_0^{h_{3\%}^{max}(XX)} Q(\psi X | h_{3\%}) f_p(h_{3\%}) dh_{3\%} dx,$$

где  $Q(\psi X | h_{3\%})$  – условная обеспеченность нормируемой величины волновой нагрузки  $X$  судна ограниченного района плавания **R2-RSN(4,5)** на квазистационарном режиме волнения, характеризуемом высотой волны  $h_{3\%}$ ;

$\psi$  – величина  $\psi'$  или  $\psi''$  в зависимости от рассматриваемой волновой нагрузки (волновые изгибающие моменты или волновые давления);

$S_{max}$  – максимальное расстояние между местами убежища;

$h_{3\%}^{max}$  – максимальное значение высоты волны  $h_{3\%}$ , с которой может встретиться судно во время рейса из-за опасной ошибки в прогнозе волнения при уходе с произвольной точки трассы с координатой  $x$  в ближайшее место убежища, отстоящее от рассматриваемой точки трассы на расстояние  $l(x)$ ;

$f_p(h_{3\%})$  – долгосрочная функция плотности распределения высот волн  $h_{3\%}$ , на которые попадает судно при движении по разрешенной морской трассе с учетом ограничения по волнению  $[h_{3\%}]$  и возможности укрытия в местах убежища от неблагоприятных погодных условий (редуцированное волнение).

Обеспеченность  $Q_H^*(X|(z_1, z_2, \dots, z_m))$  для судна-эталона определяется по аналогичной зависимости при  $\psi = 1$ , а также  $S_{max}$ ,  $h_{3\%}^{max}$  и  $f_p(h_{3\%})$ , определяемых для условий эксплуатации, характерных для судна-эталона.

Максимальный режим волнения определяется из решения уравнения пути, проходимого судна в условиях развивающегося волнения, начиная от допустимой величины  $[h_{3\%}]$ .

Потеря скорости хода на волнении описывается аналитической зависимостью, описывающей результаты натурных экспериментов.

Долгосрочная функция  $f_p(h_{3\%})$  плотности распределения высот волн  $h_{3\%}$ , на которые попадает судно при движении по заданной морской трассе с учетом ограничения по волнению  $[h_{3\%}]$ , определяется следующим образом:

$$f_p(h_{3\%}) = f(h_{3\%}) \text{ при } h_{3\%} \leq [h_{3\%}],$$

$$f_p(h_{3\%}) = d \left\{ \int_0^{[h_{3\%}]} Q(h_{3\%}|h_{3\%}^{пр}) f(h_{3\%}^{пр}) dh_{3\%}^{пр} \right\} dh_{3\%} \text{ при } h_{3\%} > [h_{3\%}],$$

где  $f(h_{3\%})$  – долгосрочная функция распределения вероятностей высот волн  $h_{3\%}$  в рассматриваемом морском районе в разрешенный период эксплуатации, принимаемая по справочным данным по режимам ветра и волнения РС;

$f(h_{3\%}^{пр})$  – долгосрочная функция распределения вероятностей прогнозных высот волн  $h_{3\%}^{пр}$ ;

$Q(h_{3\%}|h_{3\%}^{пр})$  – условная обеспеченность фактических высот волн  $h_{3\%}$  при фиксированных прогнозных высотах  $h_{3\%}^{пр}$ .

Анализ современных данных по долгосрочным характеристикам волнения, приведенных в справочных данных РС (издания 2003 – 2009 гг.), показал, что режимные характеристики волнения  $h^*$  (высота волны 3%-й обеспеченности, имеющая долгосрочную обеспеченность 5%) в районах эксплуатации судов смешанного (река-море) плавания существенно жестче, чем следует из справочных данных РС 1974 г., использованных ранее при разработке современных требований правил РС (табл.2).

На основе анализа данных 2003-2009 гг. выбраны типовые расчетные условия эксплуатации судов смешанного плавания **R2-RSN(4,5)** и **R2-RSN**:

открытые моря – южная часть Северного моря (в течение всего года и в декабре);

Таблица 2

**Сопоставление данных по характеристике бурности районов эксплуатации судов смешанного (река-море) плавания R2-RSN по данным различных источников**

Район плавания	По данным 2003-2009 г.	По данным 1974 г.
Открытые моря	3,1-7,1	4,0-5,7
Закрытые моря	2,2-5,4	2,6-3,6

закрытые моря – северо-западная часть Средиземного моря (в течение всего года и в декабре).

Для этих условий эксплуатации определены параметры логарифмически нормального закона распределения вероятностей режимов волнения и ветра, как в целом за разрешенный сезон (табл. 3), так и для наиболее благоприятного месяца из числа разрешенных для плановой эксплуатации.

Таблица 3

**Исходные данные по расчетным условиям эксплуатации судов ограниченного района плавания R2-RSN(4,5) и судов-эталонов R2-RSN**

Срок эксплуатации	Характеристика расчетных условий эксплуатации	Обозначение	Размерность	R2-RSN [R2-RSN (4,5)]
Сезон (в течение всего года)	Допустимый режим волнения	$[h_{3\%}]$	м	4,5 [ 6,0]
	Допустимое удаление от места убежища	$S_{max}$	Миля	
	- открытые моря			50
	- закрытые моря			100
	Характеристики закона долгосрочного распределения режимов волнения			
	- открытые моря	$h_{0,5}$	м	2,408
		s	-	1,488
	- закрытые моря	$h_{0,5}$	м	1,547
		s	-	1,285
	Расчетные скорости ветра	w	м/с	
	- открытые моря			18,8
	- закрытые моря			18,1

На основе анализа и обобщения имеющихся данных по оправдываемости прогнозов волнения для описания функции  $Q(h_{3\%}|h_{3\%}^{пр})$  использован закон Релея в виде:

$$Q(h_{3\%}|h_{3\%}^{пр}) = \exp(-(h_{3\%})^2/E),$$

где  $E$  – второй начальный момент распределения, зависящий от  $h_{3\%}^{пр}$  и характеристики бурности рассматриваемого морского района  $h^*$ .

В пользу такого решения можно отметить следующее.

1. Использование закона Релея для аппроксимации условной плотности распределения вероятностей  $h_{3\%}$  при  $h_{3\%}^{пр}$  дает более постепенное уменьшение обеспеченности  $Q(h_{3\%}|h_{3\%}^{пр})$  что лучше согласуется с результатами опытной эксплуатации достаточно большой группы судов класса «М-СП» РРР.

2. Использование закона Релея лучше учитывает характерную для условной плотности  $h_{3\%}$  при  $h_{3\%}^{пр}$  не симметричную форму распределения и исключает возможность получения значимых обеспеченностей для отрицательных  $h_{3\%}$ .

3. Выбор закона распределения Релея основан на результатах достаточно большого числа исследований, выполненных для различных морских районов, что позволяет дифференцированно подходить к назначению статистических характеристик оправдываемости прогнозов волнения в зависимости от  $h_{3\%}^{пр}$  и  $h_{3\%}$ .

В то же время следует отметить, что, по всей видимости, наиболее оправданным является использование для описания условной плотности  $Q(h_{3\%}|h_{3\%}^{пр})$  закона Вейбулла. Однако в настоящее время отсутствуют сколько-нибудь систематизированные сведения по оправдываемости прогнозов волнения, позволяющие установить функциональную зависимость параметра этого закона от прогнозируемой высоты волны и характеристик бурности района эксплуатации.

Условная обеспеченность нормируемой величины волновых изгибающих моментов на волнении  $h_{3\%}$  определяется по следующей зависимости:

$$Q(X|h_{3\%}) = Q(M_w|h_{3\%}) = \exp(-0,5(M_w/\sigma_B(h_{3\%}))^2),$$

где  $\sigma_B(h_{3\%})$  – стандарт волнового изгибающего момента на квазистационарном режиме волнения, характеризуемом высотой волны  $h_{3\%}$ :

$$\sigma_B(h_{3\%}) = c_M c_b B L^2,$$

$$c_M = \varphi(h_{3\%}, L, B/d, d/L).$$

Значения коэффициентов стандарта волновых изгибающих моментов принимаются по результатам специального исследования, выполненного в ЛИВТ, рекомендации которого подтверждены результатами многочисленных натуральных экспериментов с судами смешанного (река-море) плавания.

Для волновых давлений использована следующая зависимость, вытекающая из закона распределения Релея:

$$Q(X|h_{3\%}) = Q(c_w^{orp}|h_{3\%}) = \exp(-0,5(c_w^{orp}/(0,3776h_{3\%}))^2).$$

Результаты оценки редуцированных коэффициентов к волновым изгибающим моментам судов ограниченного района плавания **R2-RSN(4,5)** были получены при вариации длин судов ( $L = 60, 90, 120$  и  $140$  м), состояний загрузки (груз, балласт), видов деформации корпуса (прогиб, перегиб).

Расчеты выполнялись как для долгосрочных характеристик волнения, характерных для разрешенного сезона эксплуатации, так и для наиболее тяжелого по волновым условиям месяца из числа разрешенных для эксплуатации.

Соотношения главных размерений судов-представителей принимались по результатам обработки данных по 17 проектам судов смешанного (река-море) плавания.

Обобщенные результаты расчета редуцированного коэффициента  $\varphi$  для судов ограниченного района плавания **R2-RSN(4,5)** приведены на рис.1. Большие значения показанных на этом рисунке интервалов соответствуют исходным данным по долгосрочным характеристикам волнения для наиболее тяжелого по волновым условиям месяца. В то же время отличие результатов расчета при вариации состояния загрузки судна и вида деформации корпуса весьма незначительны.

По результатам выполненных расчетов предложена следующая зависимость для определения редуцированного коэффициента к волновым изгибающим моментам:

$$\varphi = 0,92 - 0,29L \times 10^{-2},$$

уточняющая зависимость, первоначально предложенную РС.

Некоторое ужесточение коэффициента  $\varphi$  по сравнению с первоначальными предложениями РС ( $\varphi = 0,84 - 0,22L \times 10^{-2}$ )

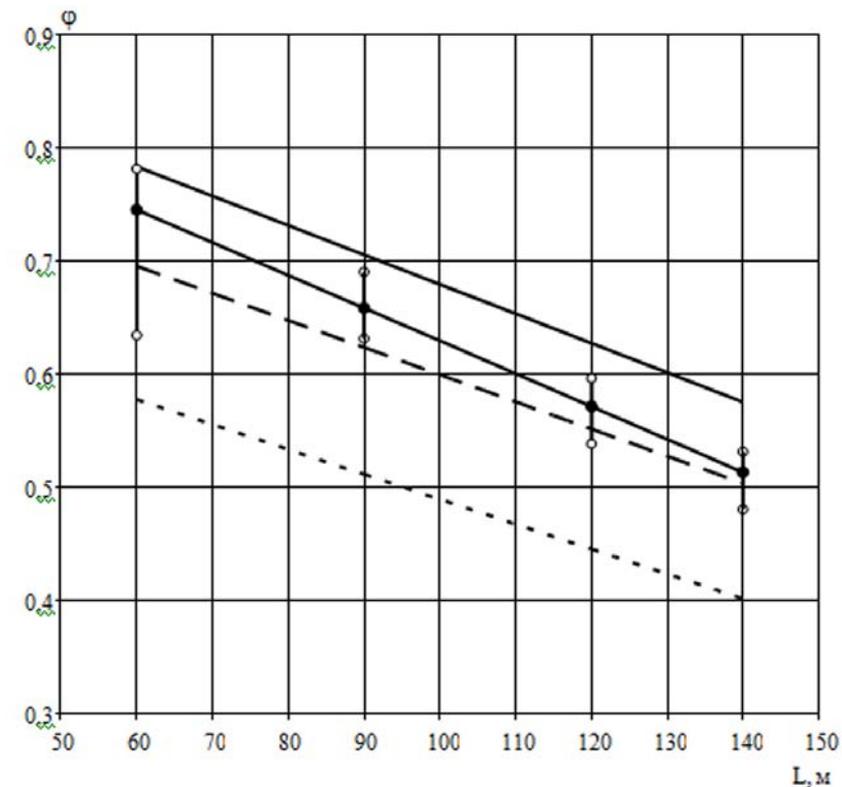
обусловлено достаточно слабым влиянием дополнительного ограничения по волнению  $[h_{3\%}] \leq 4,5$  м на снижение волновых изгибающих моментов в закрытых морях, где для рассматриваемого класса судов **R2-RSN(4,5)** сохраняется возможность значительного удаления судна от места убежища (до 100 миль).

Результаты выполненных расчетов редуцированных коэффициентов для волновых давлений показали возможность сохранения предложенной ранее РС зависимости для определения редуцированных коэффициентов  $\varphi_r$  (рис.2), а именно:

$$\varphi = 0,94 - 0,19L \times 10^{-2}.$$

Учитывая ряд неизбежных допущений при нормировании нагрузок для судов смешанного плавания, был выполнен анализ устойчивости результатов расчета при вариации потери скорости хода судна на волнении и характеристик оправдываемости прогнозов волнения.

Результаты выполненных расчетов показали, что использование применяемого подхода, основанного на сопоставлении уровней надежности рассматриваемого судна и судна-эталона, повышает устойчивость результатов расчета. Результаты выполненных исследований позволили сформулировать требования к судам ограниченного района плавания **R2-RSN(4,5)**, которые были реализованы в правилах РС 2013 г.



— R2-RSN

- - - R3-RSN

- · - R2-RSN(4,5) по предварительным предложениям РС

—○— диапазон изменений расчетных значений коэффициента  $\phi$  для R2-RSN(4,5) при распределений вероятностей  $n_{3\%}$

—●— R2-RSN(4,5) по предложениям настоящей работы

Рис. 1  
 Результаты расчета редукционного коэффициента к волновым изгибающим моментам судов R2-RSN(4,5)

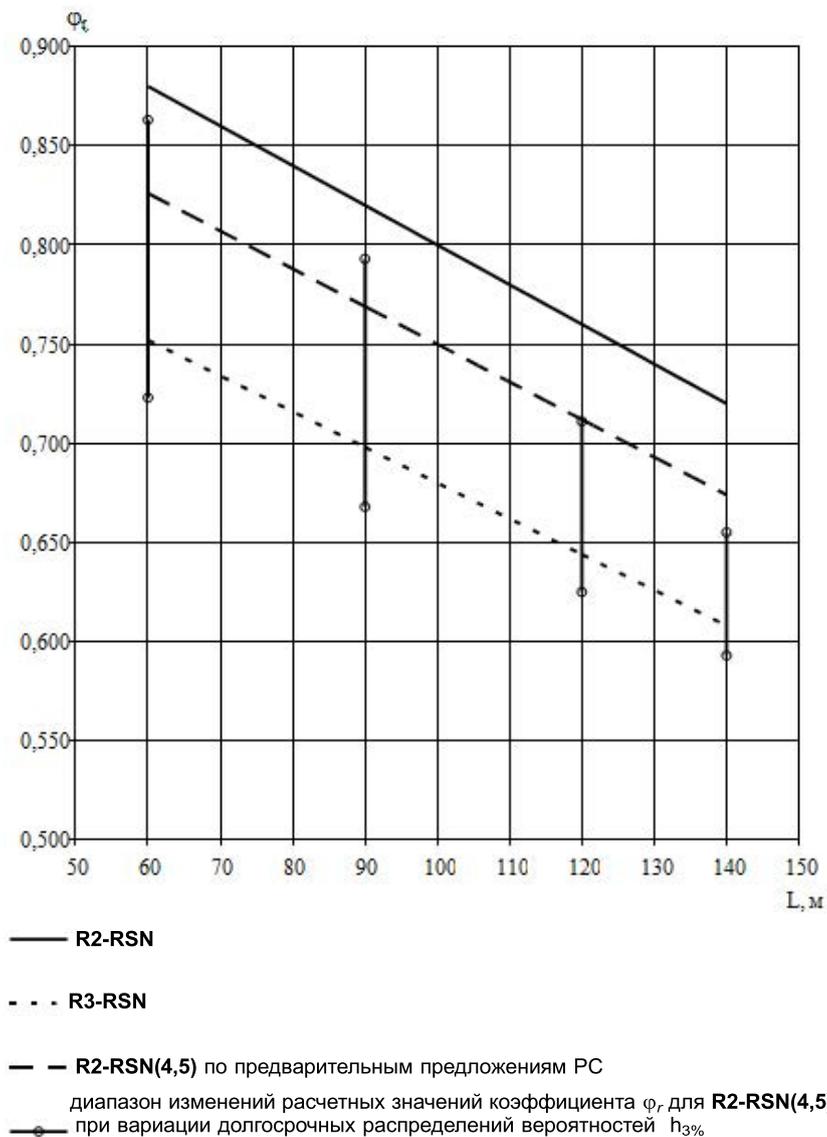


Рис. 2  
 Результаты расчета редуцированного коэффициента к волновым давлениям судов R2-RSN(4,5)

*В.В. Ярисов, канд. техн. наук, доц., БФУ, г. Калининград*

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭКВИВАЛЕНТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ИНЕРЦИИ, ДЕМПФИРОВАНИЯ И ОСТОЙЧИВОСТИ СУДОВ С ЖИДКИМИ ГРУЗАМИ В ДЛИННОПРОТЯЖЕННЫХ ОТСЕКАХ КОРПУСА**

*Ключевые слова: качка судна, измерение характеристик остойчивости, длиннопротяженные отсеки корпуса*

### **I Эквивалентная модель качки корабля с жидким грузом в длиннопротяженных отсеках корпуса**

Данная работа является продолжением исследований, выполненных в КГТУ под руководством д-ра техн. наук, проф. В.В. Гарькавого [1].

Идеи Н.Е. Жуковского, нашедшие отражение в работе по динамике твердого тела с полостями, заполненными жидкостью [1], а также в известной работе о качке тела на мелководье, послужившей отправной точкой для разработки гидродинамической теории качки корабля [44], сводились к тому, что движение твердого тела с жидким наполнителем или движение тела на взволнованной поверхности воды можно рассматривать как движение некоего эквивалентного твердого тела с инерционными и другими качествами, определяющимися свойствами как самого твердого тела, так и свойствами жидкости, взаимодействующей с ним. Таким образом, задача сводилась к более простой задаче о движении твердого тела под воздействием независимых движущих сил. Техника решения заключалась в искусстве определения параметров, характеризующих эквивалентное твердое тело, например, эквивалентной массы, инерции, демпфирования, остойчивости.

Такие идеи весьма привлекательны с той точки зрения, что, если мы умеем рассчитать характеристики движения твердого тела, то эти же методы с успехом можно применить и к эквивалентному твердому телу. При этом существо задачи не

обедняется, поскольку все особенности, связанные с взаимодействием твердого тела и жидкости, сохраняются в эквивалентных характеристиках тела. Особенно такой прием удобен для рассмотрения случая качки судна с жидким грузом на нерегулярном волнении, когда появляется возможность перенести на указанную задачу детально отработанные методы расчета качки судов с твердыми не смещаемыми грузами на нерегулярном волнении.

Запишем исходную систему уравнений бортовой качки судна с жидким грузом, сохранив в разложениях по  $H = \sqrt{(Dh - \lambda_{44}\sigma^2)^2 + 4N^2\sigma^2}$  лишь первые члены, соответствующие первому тону колебаний внутренней жидкости. Это упростит дальнейшие выкладки, не снижая общности получаемых результатов.

Поделив все члены уравнения бортовой качки на коэффициент при старшей производной и свернув к одночленному выражению правую часть уравнения, получим:

$$\ddot{\theta} + 2\nu\dot{\theta} + \Pi_1^2\theta + \tau_1\ddot{q}_1 - S_1q_1 = \bar{H}\chi_0\alpha_0 \sin(\sigma t + \varepsilon), \quad (1)$$

$$\ddot{q}_1 + g\lambda_1q_1 + \bar{\sigma}_1\lambda_1\ddot{\theta} - g\beta_1\lambda_1\theta = 0, \quad (2)$$

$$\text{где } \bar{H} = \sqrt{(n_1^2 - q\delta^2)^2 + 4\gamma^2\delta^2}, \quad q = \frac{\lambda_{44}}{J + \lambda_{44}}; \quad (3)$$

$$2\nu = \frac{2N}{J + \lambda_{44}}, \quad n_1^2 = \frac{Dh}{J + \lambda_{44}}, \quad \tau_1 = \frac{\rho\delta_1}{J + \lambda_{44}}, \quad S_1 = \frac{\gamma\beta_1}{J + \lambda_{44}}; \quad (4)$$

$$\operatorname{tg}\varepsilon = \frac{2\nu\delta}{n_1^2 - q\delta^2}, \quad (5)$$

где  $\theta$  – угол крена судна;  
 $\alpha_0$  – максимальный угол волнового склона;  
 $\sigma$  – частота волнения;  
 $t$  – время;  
 $\rho$  – плотность;  
 $\gamma$  – удельный вес воды;  
 $h$  – начальная поперечная метацентрическая высота судна;  
 $D$  – весовое водоизмещение судна;  
 $J$  – момент инерции массы судна с жидким грузом, лишенным свободной поверхности;  
 $\lambda_{44}$  – присоединенный момент инерции при бортовой качке судна;  
 $2N$  – коэффициент демпфирования (внешнего) бортовых колебаний судна [5].

Остальные обозначения соответствуют общепринятым при рассмотрении качки судна с жидкими грузами.

Введем далее следующие обозначения:

$$\varphi_1 = \frac{1}{\sqrt{B\ell}} \sin \frac{\pi}{B} \eta, \quad \lambda_1 = \frac{\pi}{B} th \frac{\pi}{B} d, \quad \beta_1 = \frac{4}{\pi^2} B^{3/2} \ell^{1/2}, \quad (6)$$

$$\delta_1 = \beta_1 \left[ -\vartheta_0 - \frac{2e}{\pi} th \frac{\pi}{B} \frac{d}{2} \right] = \beta_1 F, \quad (7)$$

где  $B$  – ширина отсека с жидким грузом;  
 $\ell$  – длина отсека с жидким грузом;  
 $d$  – глубина налива воды в отсеке;  
 $\vartheta_0$  – отстояние центра тяжести судна от уровня свободной поверхности жидкости груза (рис. 1).

В случае, когда движение судна и внутренней жидкости носит гармонический характер, соответствующий виду правой части уравнения (1), возможно уравнение качки привести к некоторому эквивалентному виду, который мы далее будем называть стандартным.

В результате получим:

$$J^* \ddot{\theta} + 2N\dot{\theta} + Dh^* \theta = H \chi_\theta \alpha_0 \sin(\sigma t + \varepsilon), \quad (8)$$

где

$$H = \sqrt{(Dh - \lambda_{44} \sigma^2)^2 + 4N^2 \sigma^2}; \quad (9)$$

$J^*$  – эффективный или приведенный момент инерции;  
 $h^*$  – эффективная или приведенная метацентрическая высота.

Для  $J^*$ ,  $h^*$  можно записать:

$$\frac{J^*}{J + \lambda_{44}} = 1 + \frac{F}{g(J + \lambda_{44})} u(\sigma, \sigma_1); \quad (10)$$

$$\frac{h^*}{h} = 1 - \frac{1}{Dh} u(\sigma, \sigma_1); \quad (11)$$

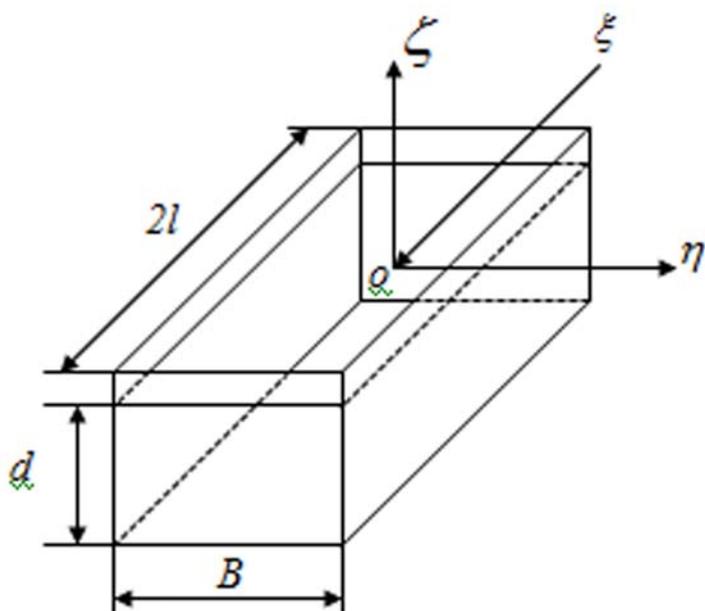
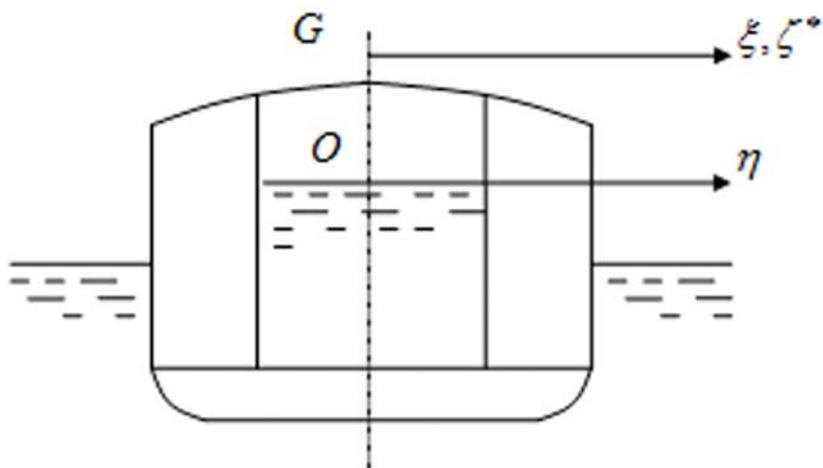


Рис. 1  
Принятая система координат

$$u(\sigma, \sigma_1) = \frac{\gamma \beta_1^2 (\sigma_1^2 + \lambda_1 \sigma^2 F)}{\sigma_1^2 - \sigma^2}. \quad (12)$$

$$J^* = (J + \lambda_{44}) + \delta i_q = J_c + \lambda_{44} + i - \delta i_\theta + \delta i_q; \quad (13)$$

$$\delta i_\theta = m_w B^2 \Gamma \left( \frac{2d}{B} \right), \quad \delta \left( \frac{2d}{B} \right) = \frac{1}{3} - \left( \frac{2}{\pi} \right)^5 \frac{2B}{d} \operatorname{th} \frac{\pi d}{B 2}; \quad (14)$$

В случае наличия внутреннего демпфирования [5], оставляя в разложениях по  $m=1,3,5\dots$  лишь первые члены, соответствующие первому тону колебаний внутренней жидкости, и свернув к одночленному выражению правую часть уравнения, получим:

$$J^* \ddot{\theta} + 2N \dot{\theta} + Dh^* \theta = H \chi_\theta \alpha_0 \sin(\sigma t + \varepsilon), \quad (15)$$

$$H = \sqrt{(Dh - \lambda_{44} \sigma^2)^2 + 4N^2 \sigma^2}; \quad (16)$$

где  $2N_\theta^0 = 2N = k_\theta (i - \delta_{i\theta})$ .

Делая предположение о гармоническом характере колебаний судна и внутренней жидкости, можно записать:

$$J^* \ddot{\theta} + 2N^* \dot{\theta} + Dh^* \theta = H \chi_\theta \alpha_0 \sin(\sigma t + \varepsilon), \quad (17)$$

где эффективные значения момента инерции масс, коэффициента демпфирования и коэффициента остойчивости выражаются следующими зависимостями:

$$J^* = (J_c + \lambda_{44}) + (i - \delta i_\theta - \rho \lambda_1 \sigma_1^2) - \rho (g \beta_1 + \sigma_1^2 \delta_1) w \lambda_1 [k_1 k_\theta \delta_1 - (\sigma_1^2 - \sigma^2) \delta_1], \quad (18)$$

$$2N^* = 2N + k_\theta (i - \delta i_\theta - \rho \lambda_1 \delta_1^2) + \rho w \lambda_1 (g \beta_1 + \sigma_1^2 \delta_1) [k_\theta \delta_1 (\sigma_1^2 - \sigma^2) + k_1 (g \beta_1 + \sigma^2 \delta_1)] \quad (19)$$

$$Dh^* = Dh + \gamma \beta_1 \lambda_1 \delta_1 - w \lambda_1 \rho g \beta_1 (\sigma_1^2 - \sigma^2) (g \beta_1 + \sigma_1^2 \delta_1). \quad (20)$$

Если ввести обозначения:

$$\delta_1 = \beta_1 F, \quad \rho \lambda_1 \beta_1^2 = u_1, \quad g + \sigma_1^2 F = U_1, \quad (21)$$

$$g = \sigma^2 F = R(\sigma), \quad Z(\sigma, \sigma_1) = u_1 U_1 W, \quad (22)$$

где 
$$w = \left[ (\sigma_1^2 - \sigma^2) + k_1^2 \sigma^2 \right]^{-1}.$$

Тогда для относительных эффективных характеристик судна с жидким грузом можно записать:

$$\bar{J}^* = \frac{J^*}{J_0 + \lambda_{44}} = 1 - \frac{Z(\sigma, \sigma_1) F}{J_0 + \lambda_{44}} \left[ k_1 k_\theta - (\sigma_1^2 - \sigma^2) \right], \quad (23)$$

$$2\bar{N}^* = \frac{2N^*}{2N_0} = 1 + \frac{Z(\sigma, \sigma_1)}{2N_0} \left[ k_\theta F (\sigma_1^2 - \sigma^2) + k_1 R(\sigma) \right], \quad (24)$$

$$\bar{h}^* = \frac{h^*}{h_1} = 1 - \frac{g Z(\sigma, \sigma_1) (\sigma_1^2 - \sigma^2)}{D h_1}, \quad (25)$$

где 
$$h_1 = h + \frac{g u_1 F}{D};$$

$$J_0 = J_c + (i - \delta_{i\theta} - u_1 F^2); \quad (26)$$

$$2N_0 = 2N + k_\theta (i - \delta_{i\theta} - u_1 F^2). \quad (27)$$

**2 Приведение расчетных формул для определения эквивалентных характеристик инерции, демпфирования и остойчивости судов с жидкими грузами к безразмерной форме**

Для удобства выполнения систематических расчетов формулы (10), (11), (22) – (24) были преобразованы к безразмерному виду:

$$\bar{J}^* = \frac{j^*}{J + \lambda_{24}} = 1 + \frac{16}{\pi^4} \left( \frac{\rho l B^4}{J + \lambda_{24}} \right) \bar{a} \cdot \frac{\left( 1 + \frac{\sigma^2}{\sigma_1^2} \bar{a} \pi h \frac{\pi}{B} d \right)}{\left( 1 - \frac{\sigma^2}{\sigma_1^2} \right)}, \quad (28)$$

$$\bar{h}^* = 1 - \frac{16}{\pi} \left( \frac{B^3}{D/\gamma} \right) \frac{l/B}{h/B} \cdot \frac{\left( 1 + \bar{a} \frac{\sigma^2}{\sigma_1^2} th \frac{\pi}{B} d \left( \frac{\sigma^2}{\sigma_1^2} \right) \right)}{\left( 1 - \frac{\sigma^2}{\sigma_1^2} \right)}, \quad (29)$$

$$\bar{a} = \left[ -\frac{\xi_0}{B} - \frac{2}{\pi} th \frac{\pi}{B} \frac{d}{2} \right], \quad (30)$$

$$\bar{J}^* = \frac{j^*}{J_0 + \lambda_{24}} = 1 - \frac{16}{\pi^4} \cdot \frac{B^4 \rho l \bar{a} \bar{b} \left( \frac{k_1 k_g}{\sigma_1^2} \right) - \left( 1 - \frac{\sigma^2}{\sigma_1^2} \right)}{(J_0 + \lambda_{24}) \left[ \left( 1 - \frac{\sigma^2}{\sigma_1^2} \right) + \frac{k_1^2}{\sigma_1^2} \frac{\sigma^2}{\sigma_1^2} \right]}, \quad (31)$$

$$\bar{h}^* = \frac{h^*}{h_1} = 1 - \frac{16}{\pi^4} \cdot \frac{\gamma B^3 l \bar{b} \left( 1 - \frac{\sigma^2}{\sigma_1^2} \right)}{D h_1 \left[ \left( 1 - \frac{\sigma^2}{\sigma_1^2} \right)^2 + \frac{k_1^2}{\sigma_1^2} \frac{\sigma^2}{\sigma_1^2} \right]}, \quad (32)$$

$$2\bar{N}^* = \frac{2N^*}{2N_0} = 1 + \frac{16 B^4 \rho l k_g \bar{a} \bar{b}}{\pi^4 2N_0} \times$$

$$\times \frac{\left[ \left( 1 - \frac{\sigma^2}{\sigma_1^2} \right) + \frac{k_1}{k_\theta} \left( \frac{g}{\sigma_1^2 F} + \frac{\sigma^2}{\sigma_1^2} \right) \right]}{\left[ \left( 1 - \frac{\sigma^2}{\sigma_1^2} \right) + \frac{k_1^2 \sigma^2}{\sigma^2 \sigma_1^2} \right]}, \quad (33)$$

$$\bar{b} = 1 + \bar{a} \pi h \frac{\pi}{B} d. \quad (34)$$

Формулы (25), (27) относятся к случаю отсутствия внутреннего демпфирования, а формулы (31) – (33) – к случаю его наличия.

### 3 Вывод приближенных формул для определения коэффициентов сопротивления движению внутренней жидкости для отсеков судов

Коэффициент «волнового» демпфирования внутренней жидкости будем определять по формуле, приведенной в работе Н.А. Николаенко [7]:

$$k_1 = \frac{1}{2} \nu (\pi/B)^2, \quad (35)$$

где  $\nu$  – кинематическая вязкость жидкости.

Для приближенного определения коэффициента «вязкостного» демпфирования внутренней жидкости воспользуемся формулами для сил сопротивления жидкости, отвечающими модели Релея-Ламба и модели Ньютона-Рейнольдса. Для элементарного объема жидкости получим:

$$|d\bar{F}_a| = k \theta \omega \rho ds dz, \quad (36)$$

$$|dR_f| = \frac{\nu}{vz} \left( C_f \rho \frac{\omega^2 r^2}{2} ds \right) dz, \quad (37)$$

где  $\omega$  – угловая скорость вращения отсека с жидкостью;  
 $\rho$  – плотность жидкости;  
 $r$  – модуль радиус-вектора рассматриваемой точки (центра элементарного объема);  
 $C_f$  – коэффициент сопротивления трения гидродинамически гладкой пластины.

Для определения  $C_f$  воспользуемся формулой Прандтля-Шлихтинга

$$C_f = \frac{0,445}{(\lg Re)^{2,58}}. \quad (38)$$

Приравнявая выражения (36) и (37), получим:

$$k_0 = C_f \omega = 2\pi \sigma C_f. \quad (39)$$

Для чисел Рейнольдса имеем зависимость:

$$Re_\omega = \frac{vL}{\nu} = \frac{\omega r^* r^*}{\nu} = \frac{\omega r^{*2}}{\nu}, \quad (40)$$

где остаточное значение величины  $r^*$  определяется по формуле:

$$r^* = \sqrt{Bd/\pi}. \quad (41)$$

#### 4 Примеры расчетов, сопоставление расчетных и экспериментальных данных, относящихся к изучению качки судов с жидкими грузами

Для большей наглядности приведем пример числового расчета, выполненного для модели судна с жидким грузом. Характеристики модели и отсека с жидким грузом:

общий вес модели с грузом	$D = 23,57$ кг;
возвышение центра тяжести модели с грузом	$Z_g = 6,6$ см;
момент инерции массы судна с грузом	$J_c + j = 0,739$ кН;
начальная метацентрическая высота	$h = 1,8$ см;
длина отсека	$2l = 0,4$ м;
ширина модели, отсека	$B = 0,2$ м;
длина модели	$LM = 1,2$ м;
высота борта модели	$H = 0,15$ м;
осадка модели, глубина жидкости в отсеке	$T = d = 0,1$ м.

Парциальные частоты системы судно – жидкий груз составили: частота свободных бортовых колебаний модели с жидким грузом, закрытым сверху крышкой  $n_1 = 7,55$  1/с (измерено экспериментально); частота свободных колебаний внутренней жидкости первого тона  $\sigma_1 = 11,9$  1/с (получено расчетом).

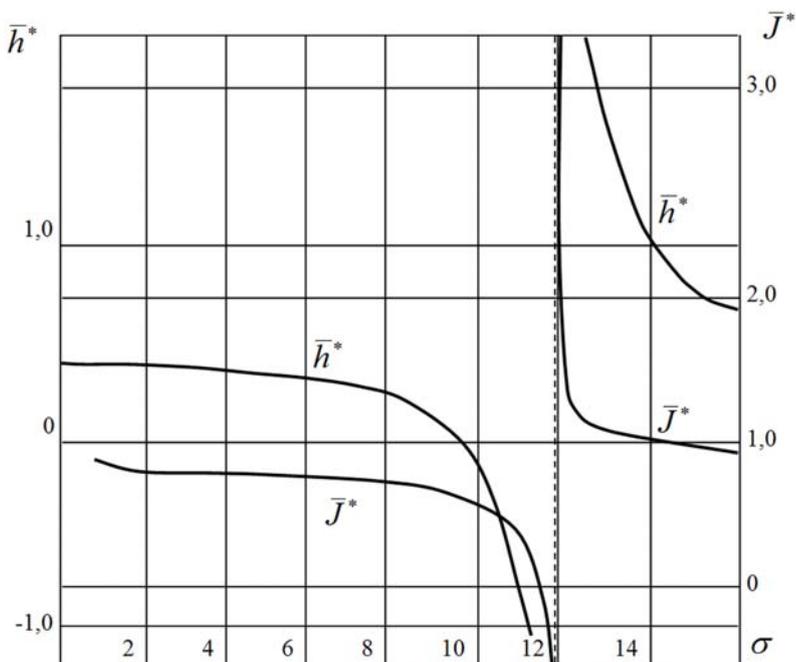


Рис. 2  
 Эквивалентные характеристики устойчивости и инерции  
 без модели в случае отсутствия внутреннего демпфирования

На рис. 2 представлены графические зависимости эквивалентных характеристик модели  $\bar{J}^* = J^*/(J + \lambda_{44})$ ,  $\bar{h}^* = h^*/h$  в зависимости от частоты внешнего возмущения –  $\sigma$ . При  $\sigma = \sigma_1$  обе характеристики претерпевают разрыв. Второй интересный режим соответствует частоте волнения, при которой эффективная метацентрическая высота обращается в нуль (на рис. 3 –  $\sigma \cong 10$  1/с). При этом амплитуды бортовой качки хотя и не равны нулю, но весьма малы, как следует из рис.3. Однако в опытах на этой частоте отмечено появление параметрического резонанса. Его появление можно заранее предсказать именно при  $\sigma \cong 10$  1/с, где график эффективной метацентрической высоты пересекает нулевую ось.

Поскольку собственные частоты рассматриваемой колебательной системы с двумя степенями свободы равны  $n_1^0 = 5,3$  1/с,  $n_2^0 = 12,05$  1/с,

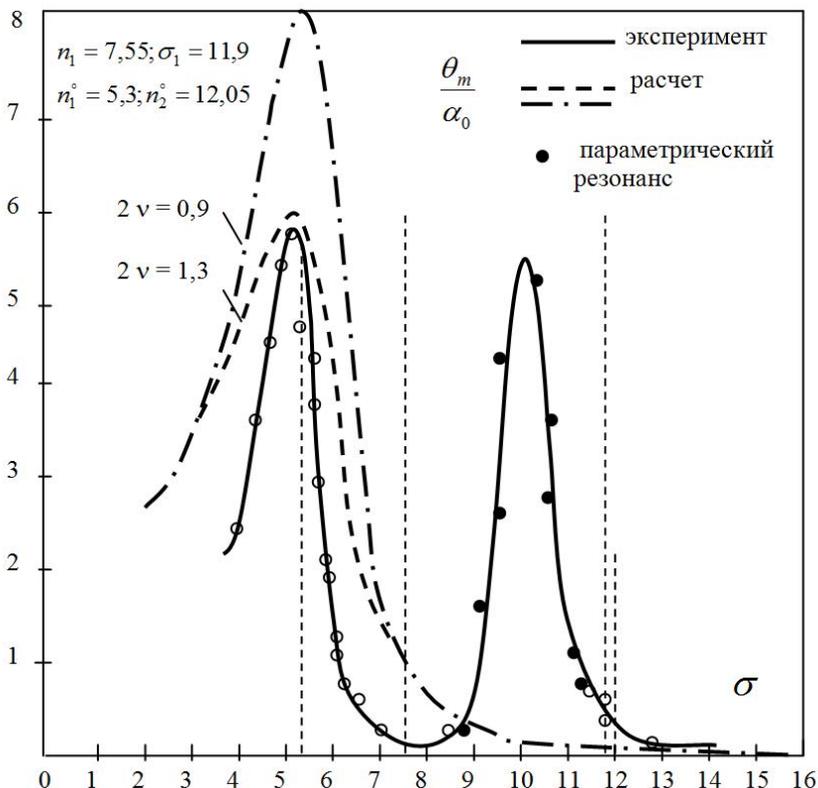


Рис. 3  
Сопоставление результатов расчета и эксперимента для модели

то амплитудно-частотная кривая бортовой качки, представленная на рис. 3 имеет два резонансных пика при  $\sigma = 5,3$  1/с и  $\sigma = 12,05$  1/с. Однако второй экстремум при  $\sigma = 12,05$  1/с выражен весьма слабо из-за увеличения роли внешнего демпфирования при больших частотах волнения. На том же рис. 3 приведена экспериментальная кривая, полученная в работе [21]. Кривая имеет два локальных максимума - в области основного резонанса ( $\sigma = n_1^0 = 5,3$  1/с) и в области параметрического резонанса, отмеченного залитыми точками, при  $\sigma \approx 10$  1/с, когда колебания модели совершаются с частотой,

примерно в два раза меньшей частоты волнения. Как известно [25], это проявление нелинейности. Связанное с изменением момента сил устойчивости вследствие участия модели в орбитальном движении частиц воды.

Параметрический резонанс данного рода возникает в области частот волн, примерно в два раза больших частоты собственных колебаний судна, однако колебания в этом режиме происходят с периодом, близким к периоду качки на тихой воде.

Как было отмечено в эксперименте, колебания модели, соответствующие параметрическому резонансу, возбуждались не всегда. Необходимо было, чтобы высота волн превышала некоторое критическое значение, что хорошо согласуется с «пороговым» условием возбуждения этого вида резонанса в работе [5], в которой рассматривается нелинейная бортовая качка судна.

На рис. 3 нанесены две расчетные кривые, соответствующие различному внешнему демпфированию ( $2\nu = 0,9$ ;  $2\nu = 1,3$ ). Расхождение расчетных и экспериментальных кривых в области основного резонанса заставляет предположить, что демпфирование колебаний внутренней жидкости должно заметно влиять на характеристики качки модели судна с жидким грузом.

На рис. 4 представлены графические зависимости эквивалентных характеристик модели с демпфированием

$$\bar{J}^* = \frac{J^*}{J_0 + I_{44}}, \quad \bar{h}^* = h^*/n_1. \quad (42)$$

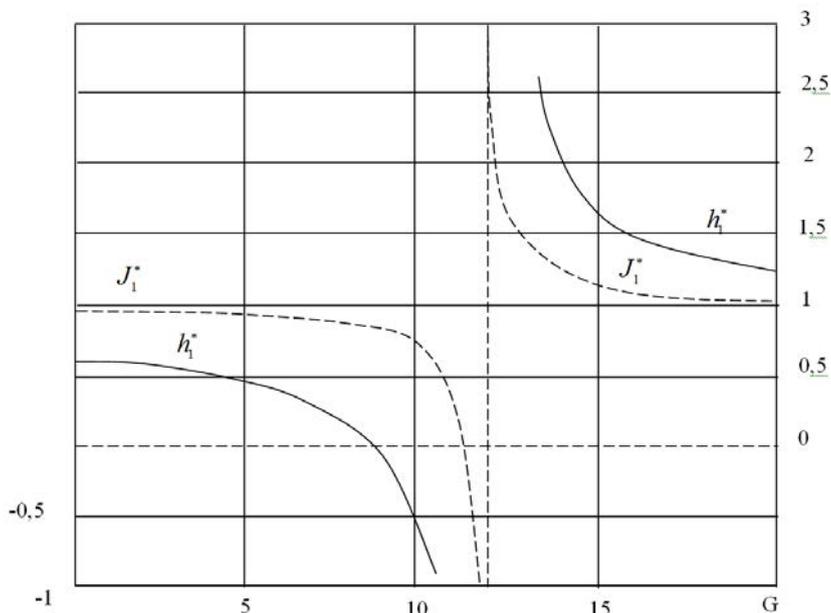


Рис. 4  
Эквивалентные характеристики остойчивости и инерции  
для модели в случае влияния внутреннего демпфирования

### Выводы

1. Расчеты на ПЭВМ эквивалентных характеристик могут быть легко выполнены для произвольного судна и произвольного отсека с жидким грузом.
2. Сравнение расчетных и экспериментальных данных показывает хорошее качественное совпадение.
3. Для более конкретного определения величин  $k_1$ ,  $k_0$  необходимо проведение соответствующих экспериментов на моделях по программе, разработанной в [2].

## *Список литературы*

1. Гарькавый В.В. Качка судна с жидким грузом при наличии внутреннего демпфирования // Сб. научн. Трудов КТИРПИХ «Мореходность судов» - Вып. 93. – Калининград: КТИРПИХ, 1981. – С. 14-29.
2. Гарькавый В.В., Уткин А.И., Ярисов В.В. Эквивалентная модель качки корабля с жидким грузом в длиннопротяженных отсеках корпуса: Учеб. пособие. – Калининград: БГАРФ, 1999. – 66 с.
3. Жуковский Н.Е. О движении твердого тела, имеющего полости, наполненные однородной капельной жидкостью. – Т. 1. – М. – Л.: Гостехиздат, 1948. – 392 с.
4. Жуковский Н.Е. Действие волнующейся жидкости малой глубины на плавающие на ее поверхности тела. Тр. ЦАГИ. – Вып. 85, 1931.
5. Луговский В.В. Нелинейные задачи мореходности корабля. – Л.: Судостроение, 1966. – 235 с.
6. Маков Ю.Л. Экспериментальное исследование некоторых вопросов качки на волнении судов с поврежденным корпусом // Отчет о НИР 73 – 2, КТИРПИХ. – Калининград, 1973. – 71 с.
7. Николаенко Н.А. Вероятностные методы динамического расчета машиностроительных конструкций. – М.: Машиностроение, 1967. – 168 с.
8. Рахманин Н.Н., Живица С.Г. О влиянии свободных поверхностей жидких грузов на остойчивость судов с учетом динамики судна // Научно-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. 1977. Вып. 20. Ч.1. – С. 17 – 28.
9. Ярисов В.В. Проектная оценка мореходных качеств судна с жидким грузом: монография. – Калининград: Изд-во КГТУ, 2010. - 163 с.

## **Вопросы прочности судов и плавучих сооружений**

---

УДК 629.124.74:629.563.2:51-74

**А.С. Большев**, д-р техн. наук, профессор, СПбГПУ

**С.А. Фролов**, канд. техн. наук, доцент, СПбГПУ

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

### **МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ МОРСКИХ ПЛАВУЧИХ ОБЪЕКТОВ В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ "ANCHORED STRUCTURES"**

*Ключевые слова:* математическое моделирование, морские плавучие объекты, системы удержания, внешние нагрузки, статические и динамические задачи

#### **Введение**

При проектировании разнообразных плавучих морских объектов, используемых для обустройства месторождений углеводородов на континентальном шельфе, приходится решать широкий круг статических и динамических задач, связанных с перемещением этих объектов под действием волнения, ветра, течения и льда. Перемещения плавучих сооружений возможны, как правило, во всех шести степенях свободы и сложным образом связаны с нагрузками, вызывающими эти перемещения, с реакцией систем удержания, гидродинамическим влиянием находящихся поблизости иных плавучих или стационарных объектов.

Как правило, перемещения плавучих объектов ограничиваются силами, создаваемыми якорной системой удержания, различными швартовными связями, соединяющими эти объекты с иными объектами, отбойными устройствами, уменьшающими силы контактного взаимодействия корпусов плавучих объектов. Расчет этих связей и устройств требует изучения динамики плавучего сооружения или группы взаимосвязанных объектов.

Обычно при проектировании плавучих сооружений, при обосновании морских операций с их участием необходимо изучить статику и динамику различных конструктивных вариантов, проверить инженерные решения и добиться выполнения ограничений, определяющих условия безопасной эксплуатации объектов. При этом, ориентируясь на длительность эксплуатации объектов, необходимо изучить поведение сооружений под воздействием самых разных сочетаний внешних воздействий.

Таким образом, для обоснования проектов плавучих объектов необходимо решать широкий круг вопросов, направленных на исследования их статики и динамики. Наиболее универсальным и относительно дешевым способом их решения является создание мощного проблемно-ориентированного программного комплекса, позволяющего в короткий срок выполнить математическое моделирование всех необходимых режимов функционирования самых разнообразных конструктивных вариантов создаваемых сооружений.

В Санкт-Петербургском государственном политехническом университете создан и при постоянной поддержке Российского морского регистра судоходства более 15 лет успешно развивается программный комплекс "Anchored Structures" (далее по тексту – ПК) [2], который способен решать большинство статических и динамических задач, возникающих у проектировщика. В настоящей статье излагаются некоторые методологические основы, используемые при решении проектных задач, и приводятся примеры практического применения ПК.

### **Методы определения волновых нагрузок**

Для определения волновых нагрузок на различные морские объекты в ПК используется либо методология гидродинамической теории, либо методология, связанная с использованием формулы Морисона.

Первый подход позволяет учесть дифракционные эффекты и взаимное гидродинамическое влияние корпусов плавучих объектов. Однако возможности вычисления нагрузок от волн конечной высоты в этом случае менее развиты.

Второй подход позволяет наиболее полно учесть нелинейный характер волн и рассчитать нагрузки от волн конечной высоты. Однако его строгое применение возможно только для сооружений, состоящих из элементов с размерами много меньше, чем длина волны.

При анализе поведения сооружений обычно производится расчет волновых нагрузок от регулярных волн или нерегулярного волнения. В общем случае, волнение может быть представлено одним из известных спектров волнения, который несложно смоделировать как совокупность элементарных гармоник с рассчитываемой амплитудой, частотой и случайной фазой.

Вектор волновой нагрузки на сооружение в шести степенях свободы  $F_w(t) = (F_{w1}, \dots, F_{wj}, \dots, F_{w6})$ , зависящий от времени, определяется, в этом случае, как суперпозиция нагрузок отдельных составляющих спектра:

$$F_w(t) = \sum_{i=1}^N F_{wi}(\omega_i) \sin(\omega_i t + \varphi_i), \quad (1)$$

где  $F_{wi}$  – вектор амплитуд нагрузок и моментов от  $i$ -й гармоники спектра волнения;  
 $t$  – время;  
 $\omega_i$  – круговая  $i$ -й гармоники;  
 $\varphi_i$  – фаза  $i$ -й гармоники спектра нагрузки;  
 $N$  – число гармоник.

Для решения задачи динамического поведения сооружений на основе гидродинамической теории качки в ПК выполняется определение вектора волновых нагрузок  $F_{wi}$  и гидродинамических параметров сооружения ( $\lambda$  – матрицы присоединенных масс и  $B$  – матрицы коэффициентов волнового сопротивления) для каждой конкретной частоты спектра волнения. Для получения значений этих параметров для различных частот используется дифракционная теория и разновидность широко известного метода гидродинамических особенностей – метод пространственных источников излучения [1].

При определении волновых нагрузок на объекты, малых по сравнению с длиной волны размеров, в ПК строится модель волны конечной высоты и производится вычисление волновых нагрузок по формуле Морисона. В качестве основы для построения модели волны конечной высоты принята идеология, основанная на результатах, полученных J.D.Fenton и M.M. Rienecker [3] и развивающих метод функции тока, использованных R.G.Dean [4]. Используемая методология позволяет построить модель волн сравнительно большой высоты на мелководье и может быть отнесена к «методам аппроксимации Фурье», так как она базируется на использовании усеченного разложения в ряд Фурье для значений функции тока.

Для построения набегающей волны конечной высоты используется описание ряда для функции тока с неизвестными коэффициентами  $B_j$ :

$$\psi(x, z) = B_0 z + \sum_{j=1}^N B_j \frac{\sinh jkz}{\cosh jkD} \cos jkx, \quad (2)$$

где  $k$  и  $D$  – безразмерное волновое число и глубина.

Эти коэффициенты вычисляются так, чтобы обеспечить решение уравнения Лапласа для функции тока в движущейся со скоростью волны системе координат и учесть граничные условия на дне и свободной поверхности. Подобный подход позволяет использовать произвольную длину ряда, зависящую от степени нелинейности волны, и обеспечивает применимость метода в более широком диапазоне параметров волн и глубины акватории, чем, например, метод, основанный на теории волн Стокса 5-го порядка.

### **Методы расчета ледовых нагрузок**

При расчете ледовых нагрузок на плавучие объекты обычно необходимо производить расчеты для условий их взаимодействия с полями ровного или торосистого льда. Методологически расчет ледовых нагрузок может осуществляться в квазистатической или динамической постановке.

При определении нагрузок в квазистатической постановке в ПК ледовая нагрузка рассчитывается на условно неподвижное сооружение с использованием российских [5,6] или зарубежных [7] норм.

Следует подчеркнуть, что взаимодействие льда с плавучими заякоренными объектами нередко характеризуется динамическими процессами прорезания льда сооружением. К сожалению, изучение динамики этого взаимодействия даже со стационарными сооружениями до сих пор не нашло должного развития в мировой практике. Еще менее изучены вопросы динамического взаимодействия льда с податливым сооружением. В этой связи авторами реализован собственный подход к моделированию динамического взаимодействия льдов с наклонными преградами. Ледовые образования в общем случае представляются в виде консолидированной части и кия тороса, нагрузки от которых рассчитываются независимо друг от друга. Движение ледового образования описывается заданием его направления и скорости движения, а перемещение податливого

сооружения определяется в результате интегрирования его уравнений движения с учетом контактных сил. Нагрузки от килля тороса вычисляются в силу зависимостей, рекомендуемых международными стандартами, а для расчета сил от ровного льда или консолидированной части тороса используется авторская методика [8].

### Расчет нагрузок от ветра и течения

При расчетах нагрузок от ветра и течения на различные сооружения в ПК используется одна из двух различных постановок задачи. Первая, наиболее простая, предполагает, что перемещения, скорости движения и углы поворота сооружения достаточно малы, и его можно считать условно неподвижным.

Вторая постановка задачи учитывает скорость движения сооружения и конечность углов его поворота.

В рамках первой постановки задачи, постоянная составляющая ветровой нагрузки на условно неподвижное сооружение рассчитывается по формуле

$$F=0,5\rho_a V_w^2 A_w(\alpha_w) C_w(\alpha_w), \quad (3)$$

где  $V_w$  – расчетная средняя скорость ветра, м/с;  
 $\rho_a$  – плотность воздуха;

$A_w(\alpha_w)$  – функция площади парусности от угла направления ветра  $\alpha_w$ ;

$C_w(\alpha_w)$  – функция коэффициента сопротивления от угла направления ветра.

В силу приведенной зависимости далее формируется полный вектор постоянной составляющей ветровой нагрузки по шести степеням свободы.

При расчете динамических нагрузок от порывов ветра используется тот или иной спектр ветра, с помощью которого строится спектр ветровой нагрузки. Далее моделирование осуществляется так же, как и для спектральных составляющих нерегулярного волнения.

При расчете нагрузок на условно неподвижное сооружение от течения, заданного с помощью скорости  $V_c(z)$  и направления  $\alpha_c$ , сила  $F_c$ , действующая на сооружение, находится по известной формуле:

$$F_c=0,5\rho_w \int_z V_c^2 A_c(\alpha_c, z) C_c(\alpha_c, z) dz, \quad (4)$$

где  $A_c(\alpha_c, z)$  и  $C_c(\alpha_c, z)$  – функции эквивалентной площади сечения подводной части и коэффициента сопротивления от угла направления течения и вертикальной координаты. Далее формируется вектор сил и моментов, действующих на сооружение со стороны течения.

Во второй постановке задачи силы от ветра и течения рассчитываются с учетом движения корпуса плавучего объекта. При этом учитывается конечность колебаний сооружения во всех шести степенях свободы.

### **Расчет и аппроксимация жесткостных характеристик якорных, швартовых связей и отбойных устройств**

При моделировании якорных связей последние могут представлять собой стальные и растительные тросы, цепи, гибкие соединения труб или любые их комбинации.

При сравнительно медленном движении сооружения расчет натяжения в якорных связях производится квазистатическим методом, при этом натяжение и траектория линии являются функцией положения клюзовой точки сооружения. При расчете якорных связей должны учитываются их растяжение, наличие массивов и плавучестей, расположенных на связях и предназначенных для изменения траектории провисания и жесткости связей, возможность укладки части связи на дно акватории, которое, в свою очередь, может иметь наклон.

Для расчета жесткостных характеристик якорных связей используются полученные авторами аналитические решения уравнений свободно провисающей гибкой тяжелой и растяжимой связи [9,10], которые являются более точными по сравнению с широко известными уравнениями цепной линии. Разработанная методика позволяет вычислять вертикальные и горизонтальные компоненты натяжения связи при произвольном положении клюзовой точки. Далее, построив жесткостные характеристики всех связей, нетрудно получить общую многомерную кусочно-линейную жесткостную характеристику всей системы удержания в виде:

$$F_R(X_c, L_1) = \sum_{j=1}^N C_j(T_j(B_{jx}(X_c), B_{jz}(X_c), l_{1j})), \quad (5)$$

где  $X_c$  – вектор перемещений сооружения в шести степенях свободы;  
 $B_{jx}(X_c), B_{jz}(X_c)$  – операторы, позволяющие на основании вектора  $X$  рассчитать вертикальные и горизонтальные координаты клюзовых точек произвольной  $j$ -й связи;

$T_j$  – оператор рассчитывающий реакцию каждой связи по ее жесткостной характеристике и координатам клюзовой точки;

$C_j(T_j)$  – оператор, преобразующий реакцию  $j$ -й связи в вектор реакции относительно центра тяжести сооружения;

$L_1$  – вектор длин первых (верхних) участков связей;  
 $N$  – число связей.

Данный метод разработан авторами, прошел широкую апробацию в расчетах якорных систем удержания для разнообразных плавучих сооружений и показал высокую точность и надежность расчетов.

Моделирование работы швартовых и отбойных устройств предполагает наличие не менее двух сооружений (второе также может быть заякоренным плавучим или стационарным). Для расчета реакции швартовых устройств рассчитывается текущее положение сооружений – векторы координат центров тяжести  $X_{c1}$ ,  $X_{c2}$ . Жесткостные характеристики швартовых связей рассчитываются аналогично якорным.

Вектор реакции швартовых связей для  $i$ -го сооружения представляется в виде:

$$F_{Si}(X_{c1}, X_{c2}) = \sum_{j=1}^{N_S} C_{isj}(T_j(b_{js}(X_{c1}, X_{c2}))), \quad (6)$$

где  $b_{js}(X_{c1}, X_{c2})$  – оператор, преобразующий координаты центров тяжести объектов в расстояние между точками крепления  $j$ -й швартовой связи, связывающей объекты;

$C_{isj}(T_j)$  – оператор, преобразующий натяжение  $j$ -й связи в вектор реакции относительно  $i$ -го сооружения;

$N_S$  – число швартовых связей.

Моделирование работы отбойных устройств значительно сложнее и состоит из расчета и кусочно-линейной аппроксимации жесткостной характеристики каждого отбойного устройства, поиска возможных зон контакта каждого отбойного устройства с корпусом сооружения, расчета деформаций отбойных устройства и сил реакции. В результате составляется оператор реакции всех отбойных устройств для  $i$ -го сооружения:

$$F_{Bi}(X_{c1}, X_{c2}) = \sum_{j=1}^{N_B} C_{iBj}(R_{Bj}(X_{c1}, X_{c2})), \quad (7)$$

где  $R_{Bj}(X_{c1}, X_{c2})$  – реакция  $j$ -го отбойного устройства;

$C_{iBj}(R_{Bj})$  – оператор преобразования реакции  $j$ -го отбойного устройства в вектор реакции относительно  $i$ -го сооружения;

$N_B$  – число отбойных устройств.

Таким образом, с помощью сходных методологических приемов удается смоделировать реакцию отбойных устройств, якорных и

швартовых связей при изучении статики и динамики плавучих сооружений.

### Расчет статических задач

При моделировании задач статики производится решение системы шести нелинейных алгебраических уравнений, представляющих собой баланс всех сил, действующих на сооружение:

$$C(X_c)+F_R(X_cL_1)+F_S(X_c)+F_B(X_c)+F_{dr}+F_w+F_c+F_j=0, \quad (8)$$

где  $F_{dr}$ ,  $F_w$ ,  $F_c$ ,  $F_j$  – внешние статические силы волнового дрейфа, от ветра, течения и льда, соответственно;

$X_c$  – вектор перемещений сооружения в шести степенях свободы;

$C(X_c)$  – вектор восстанавливающих сил;

$FR(X_c, L_1)$  – вектор сил реакции системы закореня;

$F_S(X_c)$  – вектор реакции швартовых связей;

$F_B(X_c)$  – вектор реакции отбойных устройств.

Все нелинейные функции, входящие в уравнение равновесия, представляются в виде кусочно-линейных зависимостей от вектора перемещений сооружения. Авторами разработана и реализована [10] неитерационная процедура обращения векторного кусочно-линейного оператора, позволяющая вычислить все компоненты вектора  $X_c$ , при котором обеспечивается искомый баланс сил.

При задании ветровой нагрузки, нагрузки от течения и ледовой равными нулю, в результате решения уравнений можно получить координаты исходного положения объекта.

Путем манипулирования вектором длин связей можно определить необходимую осадку закоренного сооружения при обтяжке связей или добиваться заданных натяжений связей в исходном положении. При произвольной внешней нагрузке изменением длин отдельных связей можно производить позиционирование сооружения в заданную точку акватории или выравнивать натяжения связей.

### Динамический анализ

Среди многочисленных динамических задач, решаемых в процессе проектирования плавучих объектов, следует отметить следующие различные постановки задачи, использованные в ПК.

1. Задача динамики сооружения при малых его колебаниях.

2. Задача нелинейной динамики при постоянных гидродинамических характеристиках.

3. Задача нелинейной динамики с переменными гидродинамическими характеристиками.

4. Задача динамики сооружения с учетом динамики связей [11].

Все эти постановки приводят к системам нелинейных дифференциальных уравнений и решаются во временной области.

Первая из перечисленных динамических задач исходит из предположения, что движение сооружения под действием внешних сил ограничено настолько, что не оказывает влияния на величину этих сил. В этом случае расчет нагрузок от ветра, течения и волнения ведется на условно неподвижное сооружение. При этом следует отметить, что реакции якорной системы и швартовых устройств рассматриваются в данной задаче в квазистатической постановке в силу их жесткостных характеристик (т.е. без учета динамических эффектов в связях). Такая постановка приводит к необходимости решения системы шести нелинейных дифференциальных уравнений для каждого сооружения, полностью описывающих их поведение под действием внешних нагрузок и усилий в связях.

Вторая постановка допускает значительные колебания сооружения, при которых существенно изменяются значения действующих на сооружение внешних сил. В этом случае постановка задачи использует принцип суперпозиции, в рамках которого гидродинамические силы и моменты реакции жидкости на движение сооружения рассчитываются так, как будто оно движется на спокойной воде; возмущающие гидродинамические силы и моменты, действующие на сооружение в результате волнения, рассчитываются с учетом его текущей осадки; силы течения рассчитываются независимо от сил волнения с учетом текущей осадки и угла рыскания, при этом скорость течения рассчитывается относительно движущегося корпуса судна. Ветровые нагрузки также учитывают текущее положение плавучего объекта. Задача сводится также к системе шести нелинейных дифференциальных уравнений, которые необходимо численно интегрировать. Так же, как и в предыдущем случае, выполняется квазистатический расчет реакции связей системы удержания. Данная постановка по сравнению с предыдущей является более трудоемкой, так как большинство сил, действующих на сооружение, становятся нелинейными и на каждом шаге интегрирования необходимо выполнять значительный объем вычислительной работы.

В третьей постановке учитывается переменность гидродинамических характеристик в зависимости от частоты колебаний. В этом случае частотно-зависимые коэффициенты присоединенных масс и гидродинамического сопротивления представляются в виде ретардационных характеристик, а уравнения движения плавучего объекта – в виде интегро-дифференциальных нелинейных уравнений. Численное решение таких уравнений позволяет более точно описать движение объекта с учетом изменения его гидродинамических характеристик.

Четвертая постановка задачи динамики отличается учетом совместной динамики сооружения, якорных связей и райзеров. В этой постановке связи рассматриваются как упругие, тяжелые, гибкие нити, вес которых концентрируется в узловых точках (рис. 1). Таким образом, каждая связь описывается, как гирлянда элементарных масс, соединенных между собой упругими невесомыми нитями. Райзеры представляются в виде гирлянды масс, соединенных двусторонними пружинами, моделирующими упругое удлинение райзера. В каждый узел модели райзера добавляется моментная пружина, моделирующая его изгибную жесткость.

Общая система нелинейных дифференциальных уравнений, описывающих поведение сооружения, включает в себя шесть нелинейных дифференциальных уравнений динамики самого сооружения и  $3NR$  уравнений движения узловых точек каждой связи или райзера (где  $N$  - общее число связей/райзеров, а  $R$  - число элементарных масс в модели каждой связи/райзера). Подобная задача еще более трудоемка для реализации. Частным случаем последней динамической задачи является задача динамики отдельной связи/райзера, которая решается в пакете программ при заданном произвольном движении ключевой точки в трех степенях свободы.

Использование различных постановок задач динамики позволяет проектировщику наиболее гибко осуществлять усовершенствование конструкции сооружения. Действительно, при использовании наиболее трудоемких вариантов расчета динамики сооружения вычислительные ресурсы компьютеров нередко ограничивают возможности поиска наилучших конструктивных параметров. Для первоначальной оптимизации конструкции наиболее целесообразно использовать более

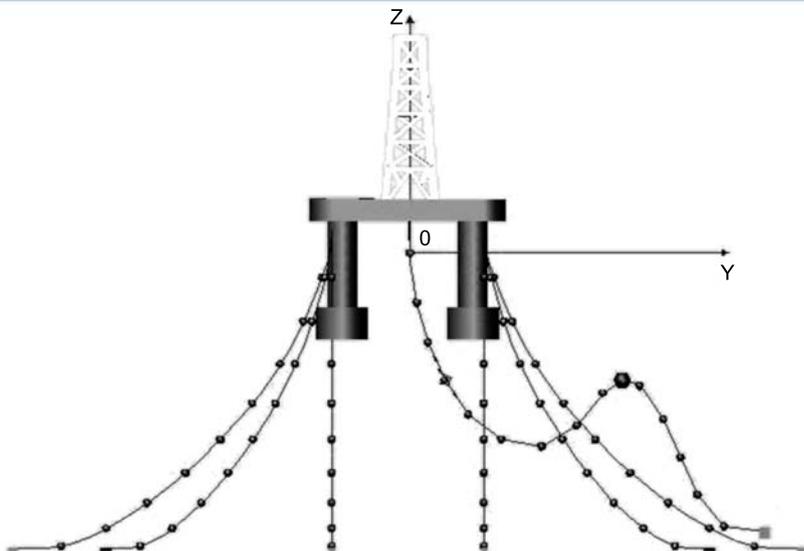


Рис. 1

Моделирование динамики платформы совместно с динамикой связей и райзеров

простые и быстрые методы вычислений. На завершающей стадии - при значительно меньшем числе сопоставляемых вариантов - можно с успехом применять более трудоемкие и более достоверные методы моделирования поведения сооружения под действием динамических нагрузок.

### **Практическое применение разработанных методологий математического моделирования**

Разработанные методологии математического моделирования поведения морских плавучих объектов реализованы в ПК "Anchored Structures", получившим сертификат о типовом одобрении Российского морского регистра судоходства (1997 г., 2002 г., 2007 г., 2012 г.) и использующимся рядом известных научно-исследовательских и проектных организаций: ФГУП «Крыловский государственный научный центр», ФГУП ЦКБ МТ «Рубин», ОАО

«ПО Севмаш», ПАО ЦКБ «Коралл», ООО «ЛУКОЙЛ-ВолгоградНИПИморнефть», ОАО ЦКБ «Монолит» и др.

За последние десять лет большое число значимых проектов реализовано с использованием данного ПК. Несколько примеров реализованных проектов приводятся ниже.

В 2001 г. в рамках комплекса НИОКР по теме "Обеспечение подъема АПК "Курск" СПБГПУ была поручена разработка методики и программных средств для обеспечения расчетов динамики подъема и транспортировки АПК.

План выполнения операции основывался на подготовке специальной баржи, оснащенной системой подъемных домкратов с компенсаторами динамических усилий, и подготовке вырезов в прочном корпусе АПК для заведения туда захватов. Баржа должна была точно встать над АПК и раскрепиться с помощью системы заякорения. Далее захваты должны были быть заведены в подготовленные вырезы, а затем домкраты – создать вертикальное усилие, способное преодолеть силу присоса грунта. Затем планировалось осуществить подъем АПК, прижать его к днищу баржи и в таком виде транспортировать в док. Все названные операции должны были занять сравнительно большой промежуток времени: транспортировка несколько суток; отрыв от грунта и подъем – около 10 – 20 часов. За этот период погодные условия и связанные с ними внешние воздействия обычно заметно изменяются, и поэтому динамические эффекты могли оказать решающее влияние на исход операции.

Основной задачей работы, выполнявшейся СПБГПУ, являлось создание математических моделей совместной динамики системы АПК – транспортная баржа в процессе подъема и транспортировки, а также подготовка программного обеспечения для выполнения комплекса необходимых расчетов. При этом необходимо было учитывать воздействия ветра, течения и волнения на корпуса плавучих сооружений, описать работу якорных, грузонесущих связей, оснащенных специальными компенсаторами, отбойных устройств и, в конечном итоге, обеспечить адекватную оценку динамики подъема и транспортировки АПК при различных гидрометеорологических условиях с учетом принятия тех или иных альтернативных инженерных решений.

При решении поставленной задачи, в рамках изложенной выше методологии, моделирование динамики объектов в процессе

выполнения операций по подъему и транспортировке АПК "Курск" разделялось на несколько самостоятельных подзадач:

моделирование баржи на начальном этапе подъема, когда АПК лежит на грунте, и сила, прикладываемая через грузонесущие связи, еще не способна оторвать его от дна;

моделирование динамики АПК и баржи в момент отрыва АПК от дна;

моделирование динамики АПК и баржи в процессе подъема АПК с помощью домкратов, оснащенных компенсаторами (рис.2);

моделирование динамики АПК и баржи непосредственно перед и после соединения АПК с баржей;

моделирование динамики баржи и АПК в процессе транспортировки.

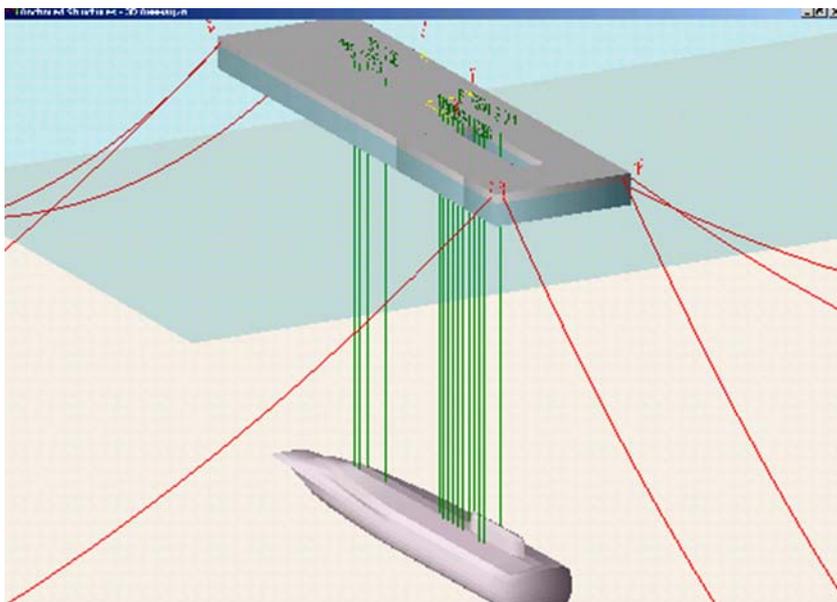


Рис. 2  
Положение системы АПК – баржа на начальной стадии подъема

ПК позволял моделировать все этапы подъема и буксировки АПК: рассчитывать внешние нагрузки от волнения, течения и ветра; учитывать реакцию якорных, грузонесущих и швартовых связей (до 50 одновременно работающих комбинированных связей); рассчитывать реакцию отбойных устройств с нелинейными жесткостными характеристиками (до 20 одновременно работающих устройств); вычислять характеристики движения АПК и баржи (координаты, скорости и ускорения) в шести степенях свободы как функцию времени.

На основе математического моделирования были выполнены конструкторские проработки и определены погодные условия, в которых можно было проводить операцию подъема. Полученные результаты были всесторонне проверены на экспериментальных установках в ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова (ныне - Крыловский государственный научный центр). Как известно, подъем АПК «Курск» был успешно завершён 8 октября 2001 г. Одним из факторов, определивших удачное завершение операции [12], явилось выполнение обширных исследований всех этапов операции теоретическим и экспериментальным путем.

Примером использования рассматриваемой методологии может служить математическое моделирование накатки верхнего строения платформы (ВСП) «Хаттон» на опорное основание платформы, созданной для освоения месторождения «Приразломное» [13].

Суть операции заключалась в предварительной установке опорного кессона, доставке ВСП на барже к кессону и накатке ВСП на кессон. Использование разработанных программных средств позволило одновременно моделировать воздействие ветра, течения и волнения, гидродинамическое взаимодействие корпусов барж и кессона, а также движение ВСП вдоль палубы кессона. При этом осуществлялось моделирование во времени заполнения балластных цистерн баржи для компенсации передачи веса ВСП на кессон, упор баржи в опорное основание и шарнир, обеспечивающий соединение барж с кессоном, движение транспортных тележек и контактные усилия в 25 колесных парах (рис. 3).

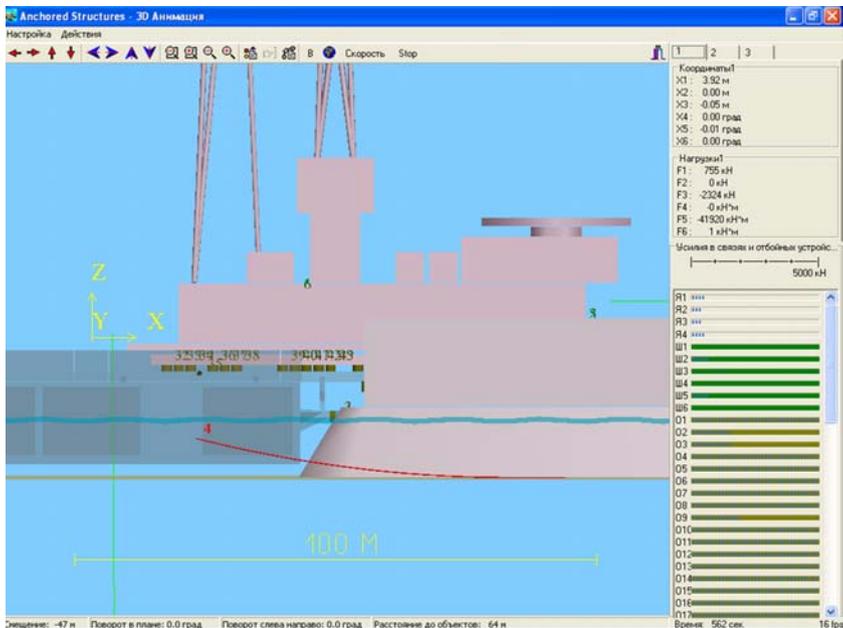


Рис. 3  
Общий вид объектов в процессе накатки ВСП

На основании моделирования (рис. 4) обеспечивалось изучение динамических параметров накатки ВСП «Хаттон» на опорное основание при различных направлениях ветра, течения и волнения, а также на различных фазах накатки.

Результаты математического моделирования использовались для обеспечения необходимого уровня безопасности данной операции. Успешно проведенная в сентябре 2006 г. силами ПО «Севмаш» с участием российских и зарубежных исполнителей операция накатки показала, что принятые основные технические решения, основанные в том числе и на представленных авторами результатах математического моделирования, себя оправдали.

Моделирование морских операций, связанных с погрузкой нефти, выполнялось авторами настоящей статьи совместно с

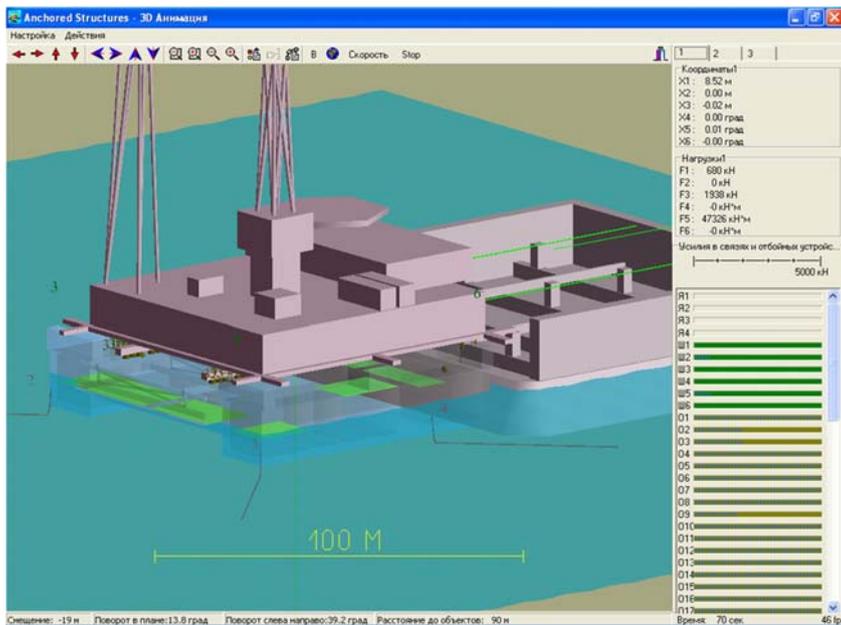


Рис. 4

Изображение объектов при курсовом угле внешних нагрузок  $0^\circ$  (начальная стадия накатки, зеленым цветом показан текущий уровень заполнения балластных цистерн).

инженерами ЦКБ «Коралл» в 2005 г. В процессе реализации этой операции стационарный морской ледостойкий отгрузочный причал (СМЛОП), отгрузочный шланг, танкер и удерживающий его буксир должны были находиться в непрерывном взаимодействии, динамические аспекты которого во многом определяли условия обеспечения допустимого уровня надежности.

Математическое моделирование было направлено на изучение поведения танкеров дедвейтом 70 000 т и 20 000 т при стоянке в ошвартованном состоянии у причала в процессе отгрузки нефтепродуктов [14]. Полагалось, что танкеры могут быть подвержены воздействиям ветра, течения, волнения и льда. Под действием постоянных и переменных во времени сил танкер может совершать колебания в различных степенях свободы. При этом, на

основании математического моделирования и последующих экспериментальных исследований, необходимо было определить условия, при которых возможно обеспечить безопасность выполнения данной операции и найти оптимальные режимы взаимодействия танкера дедвейтом 70000 т и 20000 т, вспомогательного судна, швартовой системы, отгрузочного шланга для максимального расширения погодных условий, при которых гарантируется безопасность отгрузки нефтепродуктов.

При моделировании нагрузки от ветра и течения вычислялись в зависимости от заданных эпюр скорости ветра и течения, известной надводной и подводной площади парусности, а также заданных коэффициентах сопротивления. Волновые нагрузки вычислялись по дифракционной теории с учетом гидродинамического взаимодействия близко расположенных корпусов СМЛОП, танкера и буксира. Реакции швартовых тросов рассчитывались в ПК в квазистатической постановке с учетом нелинейной жесткости швартовых связей.

Для моделирования динамика отгрузочного шланга он представлялся в виде цепочки сосредоточенных масс, соединенных упругими стержнями. В этой постановке динамика шланга описывалась с помощью дифференциальных уравнений движения сосредоточенных масс, решаемых совместно с системой дифференциальных уравнений движения танкера и буксира. В уравнениях движения отгрузочного шланга учитывалось также мгновенное значение скорости движения нефти внутри него и давления, под которым она находится.

Сила упора задавалась в виде внешнего постоянного во времени параметра, ледовая нагрузка - на основании анализа результатов предварительных экспериментальных исследований в виде временных диаграмм, отражающих изменение ледовой нагрузки при взаимодействии торосистого поля с танкером.

На рис. 5 приводится общий вид системы «СМЛОП – танкер – буксир», смоделированной в ПК, на рис. 6 - модель танкера с отгрузочным шлангом, подготовленная в ПК для анализа их совместной динамики.

Для всестороннего анализа поведения системы «СМЛОП – танкер – буксир» было сформировано около 400 расчетных ситуаций, различающихся дедвейтом танкера, его осадкой, режимом нерегулярного волнения, направлением распростра-

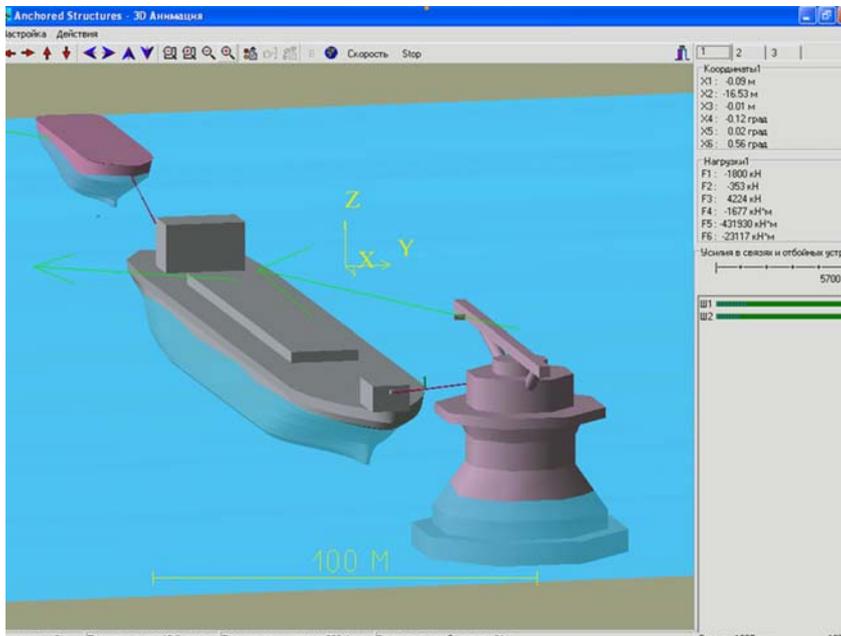


Рис. 5  
Геометрическая модель механической системы «СМЛОП-танкер-буксир»

нения волн, скоростью и направлением ветра и течения, толщиной льда, упором движительного комплекса и тягой буксира. С помощью ПК все расчетные ситуации были последовательно промоделированы, получено общее представление о поведении системы «СМЛОП – танкер – буксир» и сформулированы задачи последующего физического эксперимента.

Кроме того, на основании проведенного теоретического исследования получены результаты, позволяющие определить условия, при которых обеспечивается безопасность выполнения операций по перегрузке нефти со СМЛОП, и определены оптимальные режимы взаимодействия танкера, вспомогательного судна и швартовой системы для максимального расширения погодных условий, при которых гарантируется безопасность отгрузки нефтепродуктов.

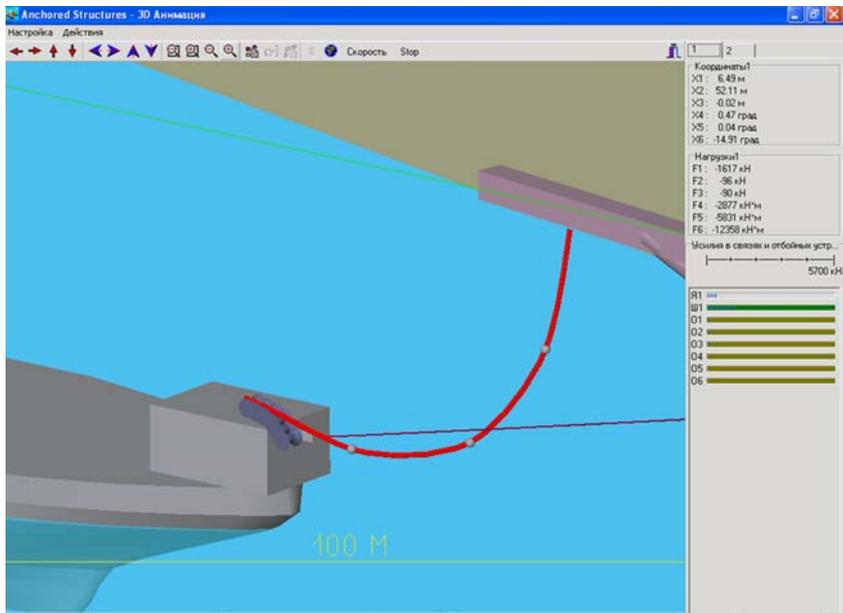


Рис. 6  
 Моделирование совместной динамики танкера дедвейтом 70000 т  
 и отгрузочного шланга

Проведенные в дальнейшем экспериментальные исследования работы системы «СМЛОП – танкер - буксир» в условиях мелководья при воздействии волнения, ветра и течения, выполненные в мореходном волновом бассейне Крыловского государственного научного центра, подтвердили основные выводы по работе данной системы, полученные в результате выполнения математического моделирования с помощью ПК.

В целом согласованное использование методов математического и физического моделирования позволило минимизировать общий объем исследования и обоснованно принять инженерные решения, обеспечивающие безопасность работы системы «СМЛОП – танкер – буксир» в процессе отгрузки нефти. В 2007 г. спроектированный СМЛОП вошел в эксплуатацию и успешно функционирует до настоящего времени.

На платформе разработанного ПК можно создавать сложные модели, синтезирующие возможности описанных выше методологий с результатами, получаемыми из других программных комплексов. Примером такой технологии является разработанный способ решения задачи о динамике двустворчатого плавучего затвора с сегментными батопортами, входящего в состав судопропускного сооружения С-1 Комплекса защитных сооружений Санкт-Петербурга от наводнений.

Как известно, плавучий затвор предназначен для перекрытия, при возникновении угрозы наводнения, судоходного пролета. Входящие в состав створок плавучего затвора батопорты, после вывода их в рабочее положение, должны быть погружены по заданному пространственно-временному закону на порог и находиться в этом положении в устойчивом состоянии, перекрывая собой судопропускной канал С-1. Посадка батопорта на порог должна осуществляться путем заполнения водой балластных цистерн, а всплытие - с помощью удаления из них воды.

Вопросы моделирования заполнения балластных цистерн, моделирования волновых нагрузок, расчета гидродинамических характеристик являются стандартными для ПК "Anchored Structures". На рис.7 представлена геометрическая модель, использованная для определения волновых нагрузок на створки батопорта.

Однако сложность моделирования поведения плавучего затвора в большей степени оказалась связанной с течением жидкости под батопортом. Для адекватного описания его поведения постановка задачи обтекания в идеальной жидкости, свойственная ПК, на наш взгляд, является недостаточной. В этой связи нашими коллегами из Главного информационно-вычислительного комплекса СПбГПУ было выполнено комплексное моделирование процессов обтекания вязкой жидкостью створок батопорта с помощью программного комплекса CFX.

Анализ процессов обтекания позволил объяснить характер поведения батопорта в потоке вязкой жидкости, параметрически описать силы, действующие на батопорт со стороны потока и интегрировать описание этих сил в ПК "Anchored Structures". Дальнейшее моделирование динамики плавучего затвора осуществлялось с учетом этой категории сил.

На основе математического моделирования в ПК, совместно с ЦКБ МТ «Рубин», ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева [15,16] был отработан

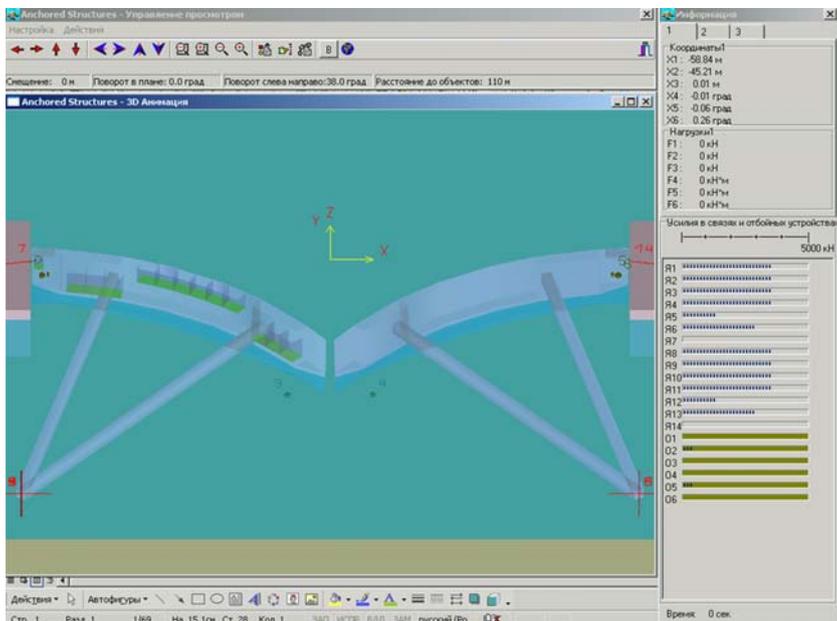


Рис. 7  
 Моделирование посадки створок на порог

алгоритм функционирования плавучего затвора, исследована и оптимизирована система мягкой посадки батопортов на порог. В настоящее время плавучий затвор с сегментными батопортами успешно прошел испытания, введен в эксплуатацию и уже защитил Санкт-Петербург от нескольких наводнений.

Таким образом, на основе использованных методологий и с помощью единого ПК удастся осуществить моделирование поведения самых различных морских плавучих объектов на разных этапах их возведения или эксплуатации, в различных режимах функционирования, при тех или иных внешних воздействиях. На основании анализа широкого перечня моделируемых ситуаций удастся принять наиболее обоснованные проектные решения, оптимизирующие конструкцию плавучего объекта или системы его удержания и обеспечивающие приемлемый уровень безопасности морских сооружений.

## Список литературы

1. Garrison C. J. and P.Y. Chow Wave forces on submerged bodies, Journal of the Waterways, Harbors and Coastal Engineering Division, vol. 98, No. WW3, pp. 375-392, American Society of Civil Engineers, New York, USA.1
2. Большев А.С., Михаленко Е.Б., Фролов С.А. Математическое моделирование поведения морских плавучих сооружений // Труды СПбГПУ, № 502, - 2006. - СПб, изд. СПбГПУ. - С. 252-274.
3. J.D.Fenton и М.М. Rienecker A Fourirrer approximation method for steady water waves, J. Fluid Mech. 1981.
4. Dean R. G. Evolution and development of water wave theories for engineering application, Vols I and II, Special report №1 U.S. Army Coastal Eng.Res. Center.
5. СНиП 2.06.04-82\*. Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов), 1995.
6. Правила классификации, постройки и оборудования плавучих буровых установок и морских стационарных платформ. - СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2012. - 479 с.
7. ISO 19906. Petroleum and natural gas industry. Arctic offshore structures, 2010. - 428 с.
8. Bolshev A. S., Frolov S. A., Shkhinek K. N. Mathematical Modelling of Floating Anchored Objects Behavior under Ice Influence, Proceedings of the Tenth (2012) ISOPE Pacific/Asia Offshore Mechanics Symposium. - Vladivostok, Russia, 2012. - p.68-72
9. Фролов С.А. Статика и динамика плавучих сооружений, закрепленных гибкими упругими связями: реферат диссертации на соискание ученой степени канд. техн. наук. - СПб, СПбГТУ, 1992. - 16 с.
10. Большев А.С., Фролов С.А. Применение векторных кусочно-линейных операторов в нелинейных задачах статики и динамики заякоренных сооружений // Строительная механика и расчет сооружений, Сб.науч.тр. СПбГТУ. - СПб, 1992. - с.137-144.
11. Bolshev A. S. Statics and dynamics of anchored floating structures with nonlinear characteristics of anchored system // Monograph, Gdansk, 1993, 218 с.
12. Баранов И.Л. и др. Математическое моделирование динамики подъема и транспортировки АПК "Курск" // Научно-технические ведомости СПбГПУ, № 1, 2002. - с.107-119.
13. Большев А.С., Торопов Е.Е., Фролов С.А. Математическое моделирование процесса накатки верхнего строения на опорное основание морской платформы Приразломного нефтяного месторождения // Журнал «Гидротехническое строительство», №5, 2007. - С. 70-75.
14. Большев А.С., Благовидова И.Л., Фролов С.А. Математическое моделирование и программное исследование работы системы «Морской отгрузочный причал – Танкер – Буксир» // Сборник трудов конференции "Освоение арктического шельфа России", 2007.
15. Большев А.С., Климович В.И., Чернецов В.А. Исследование и доработка плавучего затвора судопропускного сооружения С-1 Комплекса защиты Санкт-Петербурга от наводнений // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. -2012. - Т. 266. - С. 109-131

16. Большев А.С., Чернецов В.А., Фролов С. А., Филиповская Т.В. Система мягкой посадки плавучего затвора судопропускного сооружения С-1 Комплекса защитных сооружений Санкт-Петербурга от наводнений // Инженерно-строительный журнал. - 2012. - №9. С. 103-112

УДК 625.12:539.4

**С.О. Барышников**, д-р техн. наук, проф., ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова  
**В.Б. Чистов**, д-р техн. наук, проф., ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова

### ПРОБЛЕМЫ ДЕФЕКТАЦИИ И РЕМОНТА КОРПУСОВ СУДОВ СМЕШАННОГО (РЕКА-МОРЕ) ПЛАВАНИЯ

*Ключевые слова:* дефектация, остаточный перегиб, остаточная изогнутая ось корпуса

Грузовые суда смешанного (река – море) плавания (далее – суда смешанного плавания), занимая промежуточное положение между судами внутреннего плавания и морскими, имеют свои конструктивные особенности, которые необходимо учитывать при оценке технического состояния их корпусов во время эксплуатации и восстановления их технического состояния до заданного уровня во время ремонта. Применительно к корпусу судна оценку технического состояния следует рассматривать прежде всего с точки зрения обеспечения его прочности и непроницаемости, а ремонт – как восстановление прочности до заданного уровня на заданный промежуток времени.

Главными конструктивными особенностями грузовых судов смешанного плавания являются:

- малая толщина наружной обшивки (8 – 10 мм);
- малая высота продольного набора ( $\text{PN}10 \div 12$ );
- значительная относительная длина корпуса (отношение длины корпуса  $L$  к высоте борта  $H$  может достигать 25).

Указанные особенности приводят к необходимости:

- 1) повышения требования к измерению остаточных толщин листовых элементов корпуса судна и учета их редуцирования в сжатой зоне при расчете момента сопротивления корпуса;
- 2) учета редуцирования деформированных продольных ребер жесткости как в сжатой, так и в растянутой зоне эквивалентного бруса при расчете его момента сопротивления и ограничения количества деформированных ребер в одном сечении;

3) измерения и оценки появляющегося остаточного перегиба при эксплуатации и ремонте корпуса;

4) исключения потери устойчивости подкреплений при разработке технологических процессов подкреплений для восстановления общей прочности корпуса;

5) разработки технологических процессов устранения остаточного перегиба корпуса.

1. Практикой определения остаточных толщин листовых элементов корпуса судна предусматривается измерение остаточных толщин в трех точках на элементе и использование среднего значения результатов этих измерений в оценке прочности этих элементов и корпуса судна. Если разброс показаний (разность между максимальным значением измерения и минимальным) мал, то среднее значение позволяет вполне адекватно оценить прочность элемента. Нами была выполнена оценка допустимого значения разброса в показаниях измерений, при котором погрешность определения остаточной толщины элемента не приведет к падению характеристик его прочности более чем на 5%. При выполнении такого условия разброс в показаниях измерений должен быть не более:

0,5 мм при толщине элемента  $S \leq 8$  мм;

1,0 мм при толщине элемента  $8 \leq S \leq 12$  мм;

2,0 мм при толщине элемента  $12 \leq S \leq 16$  мм;

3,0 мм при толщине элемента  $S \leq 16$  мм.

Правила Российского морского регистра судоходства (РС) [1] предусматривают уточнение средней остаточной толщины элемента для толщины менее 16 мм, если разброс превышает 2 мм, и для толщин более 16 мм, если разброс превышает 3 мм. Простое увеличение количества измерений на элементе практически не изменяет погрешность в определении его остаточной толщины. Предложенный в правилах РС вариант уточнения остаточной толщины листового элемента корпуса путем увеличения количества измерений позволяет уточнить среднюю толщину элемента, но погрешность определения остаточных толщин листовых элементов, имевших построечную толщину менее 12 мм, может привести к ошибкам в оценке их прочностных характеристик более чем на 5%. Поэтому поправки для определения остаточной толщины листовых элементов менее 12 мм следует вводить как это представлено ранее.

Для определения редуционных коэффициентов пластин при продольной системе набора предлагаются аналитические и графические зависимости, позволяющие рассчитывать их по отношению фактической толщины пластины к толщине пластины, не теряющей устойчивости при сжимающих напряжениях, равных пределу тягучести материала и уровню сжимающих напряжений [2].

$$\left. \begin{aligned} \varphi &= \frac{1,6}{n} \left( \frac{S}{S^*} \right)^2 \text{ при } \frac{S}{S^*} \leq 0,612 \\ \varphi &= \frac{1,63}{n} - \frac{0,63}{n} \frac{S^*}{S} \text{ при } \frac{S}{S^*} \geq 0,612 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $n = \sigma / R_{eH}$  – уровень сжимающих напряжений в пластине;

$S$  – толщина пластины;

$S^* = (a/100) \sqrt{1,6_{eH}/78,5}$  – толщина пластины, не теряющей устойчивости при сжимающих напряжениях, равных пределу тягучести материала;

$R_{eH}$  – предел тягучести материала;

$a$  – короткая сторона пластины.

2. Деформированные продольные ребра жесткости на днище уменьшают работоспособную площадь поперечного сечения днища. Уменьшение площади  $\Delta F_{gH}$  можно определить по формуле

$$\Delta F_{gH} = \sum 1^p (1 - \varphi_p) f_p + \sum 1^{pn} (\varphi_{пл} - \varphi_p) \frac{a}{2} S_1, \quad (2)$$

где  $f_p$  – площадь поперечного сечения ребра с присоединенным пояском;

$\varphi_p$  – редуционный коэффициент ребра с присоединенным пояском, различный при растяжении и сжатии;

$\varphi_{пл}$  – редуционный коэффициент пластины при сжатии (при растяжении равен 1);

$1^p$  – количество деформированных ребер на днище;

$1^{пн}$  – количество пластин, прилегающих к деформированным ребрам;

$a$  – расстояние между продольными ребрами жесткости.

Уменьшение работоспособности площади поперечного сечения приводит к снижению обеспеченности общей прочности корпуса, так как уменьшается момент сопротивления относительно днища, как при прогибе, так и при перегибе.

Уменьшение работоспособной площади тем больше, чем меньше редуционный коэффициент продольных ребер жесткости  $\varphi_p$ , который зависит от отношения стрелки прогиба ребра к пролету ( $f/l$ ) и отношения высоты ребра к пролету ( $h/l$ ). Так как высота ребер на судах смешанного плавания существенно меньше, чем на морских судах, влияние их деформаций на обеспеченность общей прочности больше.

Для правил Российского Речного Регистра (РРР) профессором И.О. Тряниным получены зависимости для определения редуцированных коэффициентов деформированных ребер жесткости, которые представлены в виде номограмм в [2].

Расчеты показывают, что при допускаемых правилами РС значениях стрелки прогиба продольных ребер жесткости редуцированный коэффициент деформированного ребра может понизиться до 0,7, в то время, как у более высоких ребер на морских судах он будет сохраняться близким к 1,0. Правила РС допускают распространение вмятин по поперечному сечению корпуса судна до 40% от ширины судна, что можно интерпретировать как разрешение эксплуатации судна с 40% деформированных продольных ребер жесткости. Это вполне приемлемо для морских судов, так как работоспособная площадь поперечного сечения днища из-за деформации ребер практически не уменьшается. Такого количества деформированных ребер на судах смешанного плавания допускать нельзя, так как момент сопротивления относительно днища может оказаться меньше допускаемого правилами РС значения. Кроме того, такое количество деформированных ребер в одном поперечном сечении корпуса следует рассматривать как признак наметившегося перелома. Правила РРР допускают распространение вмятин на днище только на 25% ширины корпуса судна при существенно меньшей стрелке прогиба вмятин. Для судов смешанного плавания, по-видимому, правильнее придерживаться такого норматива.

3. Остаточный перегиб корпуса может достигать 400-500 мм, он появляется в процессе эксплуатации судна или неправильной технологии ремонта корпуса. Остаточный общий перегиб изменяет обеспеченность общей прочности, так как появляется дополнительный изгибающий момент и остаточные напряжения, уменьшающие коэффициент запаса прочности; увеличивает осадку судна, что заставляет судовладельца уменьшать грузоподъемность судна и осложняет подъем судна на слип или постановку его в док.

Профессором Г.В. Бойцовым была предложена зависимость для проверки предельной прочности судна с деформированным корпусом

$$M_{\text{пр экс}} \geq k_f K_{\text{годн}} (M_p + \Delta M_{\text{ТВ}}), \quad (3)$$

где  $M_{\text{пр экс}}$  – предельный момент корпуса судна в эксплуатации, определенный с учетом остаточных деформаций для прогиба и перегиба по абсолютной величине;

$K_{\text{годн}}$  – нормативное значение коэффициента запаса прочности для годного технического состояния;

$K_f = 1 + 0,1(y_o/y_{oH} - 1) \geq 1$  – коэффициент, увеличивающий нормативное значение коэффициента запаса прочности для судов, имеющих общий остаточный перегиб;

$Y_{oH} = (LR_{eH}/E) \times (L/15H)$  – нормативное значение общего перегиба,

$H, L$  – высота борта и длина судна соответственно;

$E$  – модуль нормальной упругости.

Дополнительный изгибающий момент определяется по формуле

$$\Delta M = \beta k_2 B L^2 y_{\text{max}}^{\text{ост}}, \quad (4)$$

где  $\beta$  – коэффициент, учитывающий влияние упругого изгиба корпуса;

$k_2$  – коэффициент, зависящий только от полноты ватерлинии  $\alpha$ ,  
 $k_2 = 0,005 - 0,020$ ;

$B, L$  – ширина и длина корпуса соответственно;

$y_{\text{max}}$  – максимальная стрелка остаточного перегиба корпуса.

Эту же зависимость можно представить в виде

$$\Delta M = \frac{K_2 K_1}{\delta} \frac{y_{\text{max}}^{\text{ост}}}{T} M_{\text{ТВ}}, \quad (5)$$

где  $\delta$  – коэффициент общей полноты;

$T$  – осадка судна на миделе;

$M_{\text{ТВ}}$  – изгибающий момент на тихой воде при заданной загрузке судна;

$k_1 = \beta D L / M_{\text{ТВ}}$  – коэффициент;

$D$  – водоизмещение при заданной загрузке.

Как видно из формул, дополнительный изгибающий момент прямо пропорционален максимальному остаточному перегибу, нахождение которого довольно проблематично, так как нахождение его традиционным способом должно выполняться по формуле

$$y^{\text{ост}} = y^{\text{общ}} - y^{\text{упр}}, \quad (6)$$

где  $y^{\text{общ}}$  – общий перегиб судна, измеряемый с помощью геодезических приборов;

$y^{\text{упр}}$  – упругий прогиб, рассчитываемый по правилам строительной механики или с использованием приближенной формулы академика Ю.А. Шиманского.

Вычисление упругого прогиба требует знания распределения момента инерции поперечного сечения по длине корпуса, который

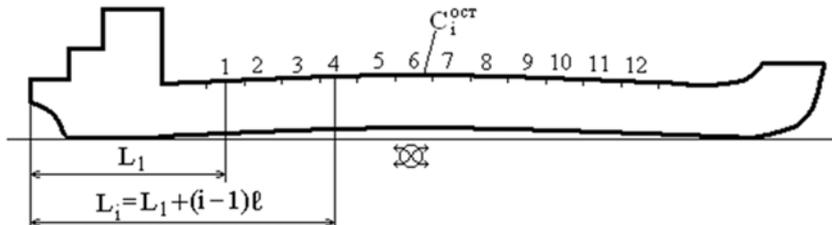
не постоянен даже на новом судне и тем более на корпусе судна с неравномерным износом и замененными участками обшивки, настилов и набора.

Нами предложен и запатентован способ определения остаточного общего перегиба [3] по результатам вычисления кривизны на отдельных участках корпуса, на основе которого разработан соответствующий технологический процесс. Ординаты остаточной изогнутой оси определяются по формуле

$$y_{(x)}^{\text{ост}} = \frac{\sum_1^n C_i^{\text{ост}} l(i-l_i)}{L} x - \sum \left( \frac{C_i^{\text{ост}} \left( x - \left( L_i - \frac{l}{2} \right) \right)^2}{2} \Big|_{x \geq L_i - \frac{l}{2}} - \frac{C_i^{\text{ост}} \left( x - \left( L_i + \frac{l}{2} \right) \right)^2}{2} \Big|_{x \geq L_i + \frac{l}{2}} \right) \quad (7)$$

- где  $y_{(x)}^{\text{ост}}$  – ордината остаточной изогнутой оси корпуса;  
 $C_i^{\text{ост}}$  – кривизна на  $i$ -м участке по длине корпуса;  
 $l$  – длина участка, на котором определяется кривизна;  
 $L$  – длина корпуса между перпендикулярами;  
 $L_i$  – расстояние от кормового перпендикуляра до середины участка с измеренной кривизной;  
 $n$  – количество участков с измеренной кривизной;  
 $x \geq L_i - l/2$  и  $x \geq L_i + l/2$  – показатели, указывающие на то, что слагаемые учитываются только в том случае, когда выражение в скобках, возводимое в квадрат, имеет положительное значение, при этом  $l=5-6$  м.

Такой способ определения ординат остаточной изогнутой оси корпуса позволяет не только находить максимальную стрелку прогиба, но и места с наибольшей остаточной кривизной, необходимые для устранения остаточного перегиба. Ниже приведен эскиз конструкции с деформацией.



4. Для восстановления общей прочности корпусов судов правилами РС рекомендуется эффективный способ ремонта постановкой накладных полос на крайние связи эквивалентного бруса. Чем больше поперечное сечение накладной полосы, устанавливаемой на корпус судна, тем эффективнее ремонт корпуса, так как большая площадь вносится в крайнюю связь эквивалентного бруса при меньших затратах труда и времени. Для морских судов с толщиной обшивки днища и настила палубы более 12 – 16 мм нет необходимости опасаться потери устойчивости пластин обшивки или настила, поэтому ширина накладной полосы определяется расстоянием между продольными ребрами жесткости, а толщина – технологическими соображениями, ограничивающими полосу двукратной толщиной обшивки или настила, на которые она устанавливается.

Толщины обшивки днища и настила палубы меньше указанных ранее с постройки, а тем более с учетом износа в эксплуатации. Поэтому пластины будут терять устойчивость при сжатии, а постановка накладной полосы размерами, рекомендованными правилами РС, не исключит потери устойчивости не только пластин обшивки или настила, но и накладной полосы. Для судов смешанного плавания разработана специальная методика [4], в которой рекомендовано накладные полосы устанавливать на жесткий присоединенный пояс, а толщину их определить по формуле

$$S_{n \text{ п}} \geq \frac{b_{n \text{ п}}}{100} \sqrt{1,6R_{ен} / 78,5}, \quad (8)$$

где  $S_{n \text{ п}}$  и  $b_{n \text{ п}}$  – толщина и ширина полосы подкрепления соответственно.

В этом случае ни полоса, ни пластины обшивки или настила, на которые они устанавливаются, не будут терять устойчивости даже при сжимающих напряжениях, равных пределу тягучести материала.

Количество полос подкрепления для восстановления общей прочности корпуса определяется по формуле

$$n_{\text{пол}} \geq \frac{F_{\text{тр}}^{g(n)} - F_{g(n)}}{b_{\text{пол}} S_{\text{пол}}}, \quad (9)$$

где  $F_{\text{тр}}^{g(n)}$  – требуемая площадь днища (палубы); рассчитывается для судна с износом и деформациями при реализации опасного состояния одновременно в двух крайних связях по специальной методике;

$F_{g(n)}$  – работоспособная площадь днища (палубы) для судна с износом и деформациями.

5. Специфический дефект судов смешанного плавания (общий перегиб корпуса) требует решения вопроса о его нормировании и устранении. Если дефицит прочности, оцениваемый с помощью формулы (9), может быть устранен с помощью накладных полос, то уменьшение грузоподъемности и увеличение осадки в эксплуатации ставит вопрос о разработке технологии устранения самого дефекта.

Технология устранения остаточного перегиба требует решения ряда технических вопросов. При подъеме судна на слип или постановке его в док необходимо знать форму остаточной изогнутой оси корпуса, чтобы нарастить некоторые подвижные платформы подъемных тележек или правильно выставить высоту кильблоков. Также требуется:

определить места с наибольшей кривизной для выбора места и способа правки корпуса;

рассчитать и расставить стапельные тумбы таким образом, чтобы в зоне поперечного разреза изгибающий момент и поперечная сила были равны нулю;

рассчитать места установки стапельных тележек (домкратов) и нагрузку на них и стапельные тумбы из условия, что в зоне правки изгибающий момент обеспечит поворот крайних сечений неразрезанного участка корпуса на заданный угол;

рассчитать изменение высоты стапельных тумб во время правки корпуса.

Способы решения поставленных вопросов даются в типовых технологических процессах (определение остаточной изогнутой оси корпуса судна; подъем на слип судна с деформированным корпусом; устранение остаточного перегиба полным поперечным разрезом; устранение остаточного перегиба частичным поперечным разрезом; устранение остаточного перегиба отделением секций палубы), принятых РРР и опубликованных в [5].

Отличительные особенности дефектации и ремонта корпусов судов смешанного плавания целесообразно учесть при совершенствовании правил РС.

## *Список литературы*

1. Правила классификационных освидетельствований судов в эксплуатации. Приложение 2. Инструкция по определению технического состояния, обновлению и ремонту корпусов морских судов. – СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2013.
2. Барышников С.О. Расчет редуцированных коэффициентов элементов корпуса судна по Правилам Российского Речного Регистра // Журнал университета водных коммуникаций. – 2010. – Вып. III (VII). – С. 110 – 116.
3. Пат. 2435149 Российская Федерация. Способ определения остаточного продольного изгиба корпуса судна / Барышников С.О., Карклина Т.О., Чистов В.Б.
4. Барышников С.О. Ремонт корпусов судов внутреннего плавания подкреплением накладными полосами. – СПб.: СПГУВК, 2011.
5. Барышников С.О. Устранение остаточного перегиба корпусов судов. – СПб.: СПГУВК, 2011.

УДК 669.14.018.41:621.771.23

**В.К. Башаев**, ФАУ «Российский морской регистр судоходства»

**Е.И. Хлусова**, д-р техн. наук, ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей»

**С.А. Голосиенко**, канд. техн. наук, ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей»

# РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ЛИСТОВОГО ПРОКАТА ТОЛЩИНОЙ ДО 50 мм ИЗ ВЫСОКОПРОЧНЫХ СТАЛЕЙ С ИНДЕКСОМ "ARC"

*Ключевые слова:* хладостойкие стали, технология производства листового проката, высокотемпературная термомеханическая обработка, предел текучести

## Введение

Основной тенденцией в создании современных хладостойких сталей для экстремальных условий Арктики и Дальнего Востока является применение процессов прецизионной термомеханической обработки или термического улучшения в сочетании с микролегированием при общем снижении содержания дорогостоящих легирующих элементов [1]. Главной целью при этом является получение мелкодисперсной и ультрамелкодисперсной структуры металла, которая, наряду с высокой хладостойкостью и трещиностойкостью, обеспечивает и более высокие прочностные характеристики. В связи с этим открываются возможности расширения диапазона применения высокопрочных сталей, что обеспечит не только снижение металлоемкости конструкций, но и одновременное повышение эксплуатационной надежности и снижение трудоемкости сварки за счет использования сталей в меньших толщинах.

В 2012 г. Российским морским регистром судоходства введены в действие требования к сталям с индексом «Arc». Этот индекс добавляется к обозначению стали категории F, выдержавшей определенный комплекс испытаний в соответствии с требова-

ниями, предъявляемыми к сталям улучшенной свариваемости. Рядом с символом указывается расчетная (минимальная) температура материала  $T_d$  (без знака «минус»), до которой сталь может быть использована для любых конструктивных элементов без ограничений (например, F36W<sup>Arc40</sup>) [2]. За минимальную расчетную температуру  $T_d$  принимают наиболее высокое из всех значений температур  $T_{кб}$ ,  $NDT$ ,  $DWTT$  и  $CTOD$  для основного металла и сварного соединения.

На основании указанных выше положений могут быть определены максимальные значения температур вязко-хрупкого перехода исходя из условия обеспечения расчетной температуры материала минус 40 °С (табл. 1).

Таблица 1

**Требования к температуре вязко-хрупкого перехода сталей с индексом "Arc40"**

$T_d$ , °С	$T_{кб}$ , °С	$NDT$ , °С				$DWTT$ , °С
		до 20 мм	до 30 мм	до 40 мм	до 50 мм	
-40	-33	-40	-50	-60	-65	-40

Проблема разработки нового поколения экономнолегированных хорошо свариваемых сталей с индексом "Arc" с гарантированными пределом текучести от 500 до 690 МПа и характеристиками работоспособности может быть решена путем снижения содержания в стали дорогостоящих легирующих элементов, применения новейших металлургических процессов и методов получения требуемого структурного состояния высокопрочной стали при специальной термопластической и прецизионной термической обработке. Таким образом, становится возможным достижение в стали экономного легирования и одновременного улучшения основных показателей качества конструкционных сталей – свариваемости, вязкости, прочности, в том числе коррозионно-механической прочности.

### **1. Концепция создания высокопрочных сталей с индексом "Arc" и технологии ее производства**

До последнего времени производство хладостойких сталей высокой прочности в России осуществлялось с применением закалки и высокого отпуска, что требовало достаточно высокого содержания углерода и легирующих элементов [3]. За рубежом

применяется технология термомеханической обработки (ТМО), которая позволяет обеспечить заданный уровень прочности, несмотря на снижение содержания углерода и минимальное легирование.

При этом следует отметить, что при производстве толстолиствого проката (толщиной свыше 20 мм) с использованием ТМО возникает ряд проблем [4]. Наиболее серьезной из них является то, что при определенных режимах ТМО велика вероятность формирования разнородных структуры и свойств по сечению листового проката толщиной до 40 – 50 мм и инициирования расслоений при статическом или динамическом изгибе вследствие неоднородного распределения деформации (а значит, формирования деформированного зерна аустенита различной дисперсности по сечению проката) и скорости охлаждения на поверхности и в середине проката (т.е. различного соотношения структурных составляющих). В то же время, широкое использование высокопрочных сталей после ТМО для столь ответственных конструкций как магистральные трубопроводы позволяет рассчитывать на возможности расширения области их применения.

Высокотемпературная ТМО позволяет одновременно с повышением прочностных характеристик сохранять на высоком уровне пластичность и ударную вязкость. В работах [5, 6] было показано, что в результате высокотемпературной ТМО прочность хромоникельмолибденовой стали может быть повышена на 25 – 30% без изменения ее легирования. Исследованиями установлено, что при высокотемпературной ТМО наилучший комплекс свойств сталей 09ХН2МД и 10ХН3МД обеспечивает окончание горячей пластической деформации аустенита при температуре, которая несколько выше температуры динамической рекристаллизации или несколько ниже этой температуры с последующей выдержкой в течение 5 мин для развития метадинамической рекристаллизации и последующее ускоренное охлаждение для реализации фазовых превращений.

Разработка новых химических составов высокопрочных сталей (с пониженным по сравнению с существующими аналогами содержанием дорогостоящих легирующих элементов) выполнялась исходя из условия обеспечения при закалке листового проката преимущественно бейнитно-мартенситной

структуры с минимальным содержанием (или полным отсутствием) структурно свободного феррита, присутствие которого в структуре улучшаемых сталей высокой прочности оказывает отрицательное влияние на прочность и сопротивляемость хрупкому разрушению [7]. Сравнительный анализ диаграмм распада переохлажденного аустенита стали марки F690W традиционного (рис. 1а) и нового (рис. 1б) составов свидетельствует о том, что при реализуемых в промышленных условиях скоростях охлаждения при закалке листового проката толщиной до 50 мм (не менее 5 с) в сталях обоих составов формируется близкая по морфологическим признакам структура. При этом необходимо принять во внимание, что содержание дорогостоящих легирующих элементов (никель, хром, медь) в сталях нового состава на 20 – 30% ниже по сравнению со сталями традиционных составов. В частности, для стали марки F690W с индексом "Arc" суммарное содержание указанных элементов снижено от 5,2% до 3,9%.

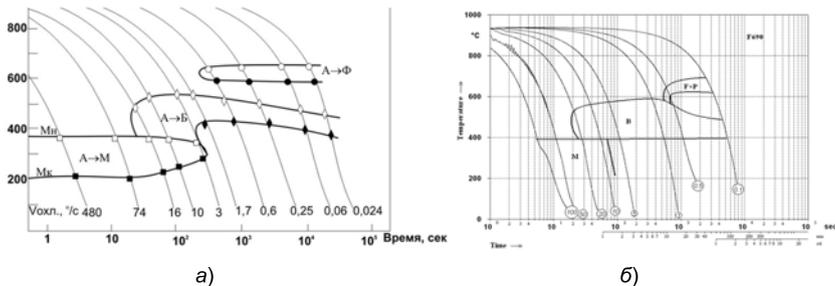


Рис. 1  
Термокинетические диаграммы для стали марки F690W традиционного (а) и нового (б) составов

Формирование мелкодисперсного аустенита и соответственно мелкодисперсной и однородной превращенной мартенситно-бейнитной структуры в промышленных условиях прокатки достигается при протекании рекристаллизации. В работе [8] были проведены исследования кинетики рекристаллизации в хромоникельмолибденовой стали высокой прочности. Следует отметить, что динамическая рекристаллизация не является основным процессом для измельчения зерна в этих сталях при горячей прокатке, а неполное ее протекание приводит к

разнозернистости. По результатам исследований установлено, что для измельчения зерна аустенита необходимо проводить выдержку после деформации для завершения статической рекристаллизации, которая и обеспечивает эффективное измельчение зерна. В промышленных условиях при этом необязательно стремиться к максимальным (>15–20% за проход) обжатиям, регламентируя паузы между последовательными обжатиями с учетом кинетики статической рекристаллизации. На рис.2 представлена схема горячей прокатки с регламентированными паузами между обжатиями.

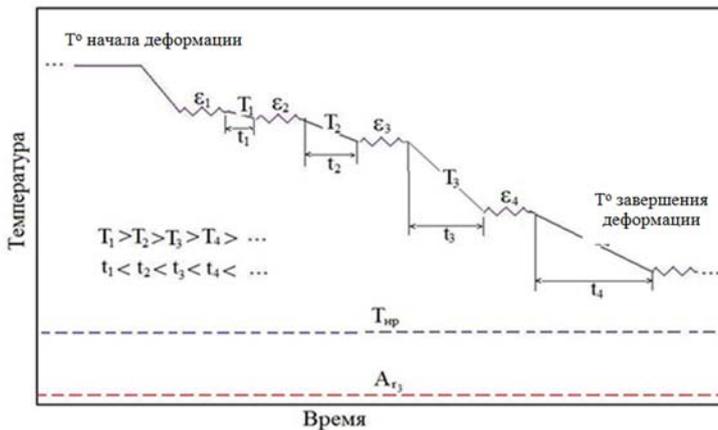


Рис. 2

Схема технологии горячей прокатки с регламентированной длительностью пауз между проходами

На основе проведенных исследований разработаны режимы горячей прокатки новых сталей с индексом "Arc" с пониженным уровнем легирования. Именно прецизионные режимы высокотемпературной ТМО позволяют обеспечить требуемое структурное состояние и высокий комплекс механических свойств в сталях экономного легирования.

## 2. Изготовление опытно-промышленной партии листового проката и оценка его качества

Опробование промышленного производства новых хладостойких сталей высокой прочности с индексом "Arc" выполнялось на ООО «ОМЗ-Спецсталь». Прокатка листов осуществляется в кооперации с Череповецким металлургическим комбинатом (ОАО «Северсталь») на стане «5000».

Цикл производства включает следующие стадии:

- выплавку полупродукта в 120-тонной электродуговой печи;
- доводку металла по химическому составу вакуумированием;
- разливку в кузнечные или листовые слитки;
- прокатку листов на стане «5000» по разработанной схеме;
- ускоренное охлаждение (закалку) непосредственно после прокатки;
- высокий отпуск;
- контроль качества и отделку листов.

Для изготовления опытных партий листового проката были изготовлены три опытно-промышленных плавки с химическим составом, приведенным в табл. 2.

Таблица 2

### Химический состав стали

Марка стали	Массовая доля химических элементов, %								
	C	Si	Mn	P	S	Cr+Ni+Cu	Mo+V+Nb	Al	Pcm
F500W <sup>ARC40</sup>	0,09	0,24	0,65	0,006	0,002	2,37	0,23	0,02	0,22
F620W <sup>ARC40</sup>	0,10	0,28	0,66	0,007	0,003	2,96	0,28	0,03	0,24
F690W <sup>ARC40</sup>	0,09	0,25	0,65	0,005	0,002	3,54	0,29	0,03	0,25

Прокатка листов производилась в две стадии с использованием междеформационных пауз и промежуточного подстуживания, способствующих протеканию процессов статической рекристаллизации аустенита. Непосредственно после прокатки листы подвергали закалке в установке контролируемого охлаждения, после чего проводился отпуск в камерных печах с выкатным подом.

Анализ структуры изготовленного листового проката показал, что в листовом прокате толщиной до 50 мм всех категорий прочности

формируется преимущественно смесь бейнита и мартенсита реечной и нереечной (гранулярной) морфологий (рис. 3 а – в) с мелкодисперсными карбидами цементитного типа и наноразмерными карбидами (карбонитридами) ниобия (рис. 3 г). Средняя величина действительного зерна находится в диапазоне от 10 до 25 мкм, что соответствует номерам зерна 8 – 10 по ГОСТ 5639. В зависимости от толщины проката и категории прочности стали доля мартенситной составляющей в структуре стали находится в диапазоне от ~20% до ~80%. Структурно свободный феррит во всех исследованных образцах стали не выявлен<sup>1</sup>.

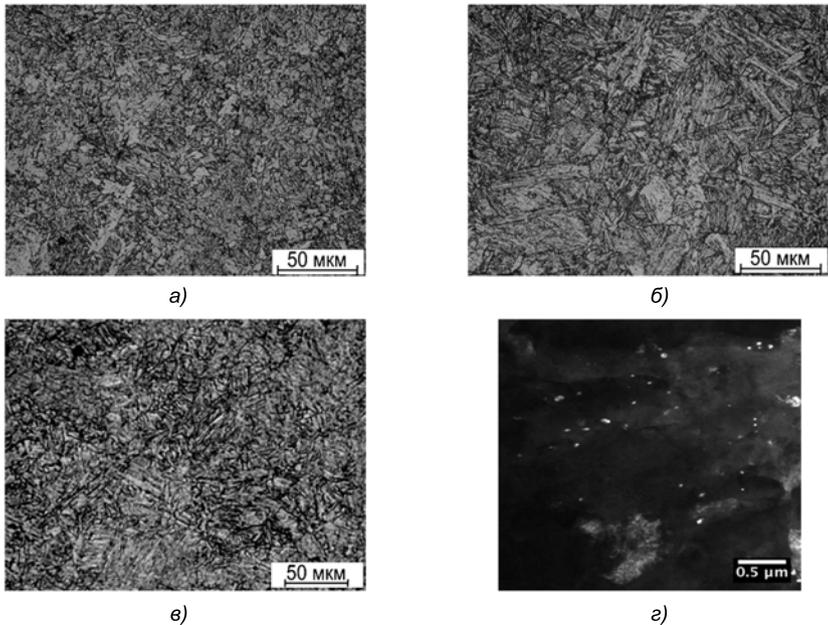
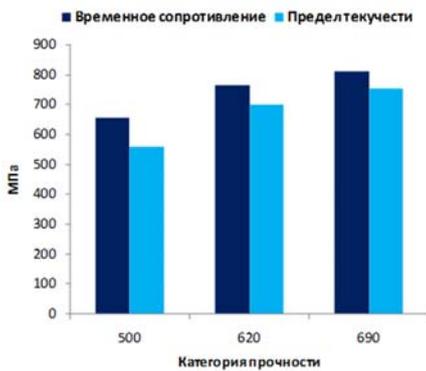


Рис. 3

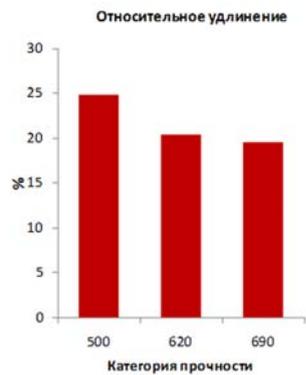
Микроструктура в середине по толщине листов толщиной 35 мм из стали марок F500W<sup>ARC40</sup> (а), F620W<sup>ARC40</sup> (б), F690W<sup>ARC40</sup> (в), наноразмерные карбиды в стали F690W<sup>ARC40</sup> (г).

<sup>1</sup>Исследования выполнены М.С.Михайловым-Смоляняковым.

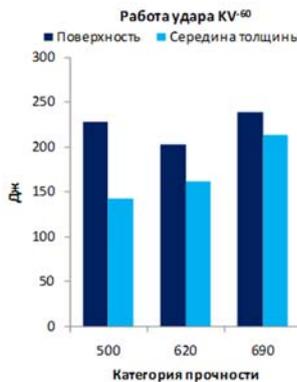
Результаты определения стандартных механических свойств листов толщиной от 20 до 50 мм из сталей с индексом "Arc" категорий прочности 500, 620 и 690 МПа свидетельствуют о достижении высокого сочетания показателей прочности (рис. 4а), пластичности (рис. 4б) и вязкости (рис. 4в): средние значения предела текучести и временного сопротивления на 7-15% превышают требования, при этом значения относительного удлинения превышают требования в 1,3 – 1,5 раз, а ударной вязкости – в 2 – 3 раза, в том числе на образцах, изготовленных из середины по толщине листового проката.



а)



б)



в)

Рис. 4

Механические свойства листового проката толщиной 20 – 50 мм из хладостойких сталей с индексом "Arc"

Анализ зависимостей значений работы удара на образцах с острым надрезом, отобранных от листового проката толщиной 50 мм из разработанных сталей (рис. 5), показывает, что существенное снижение вязкости стали происходит при температурах от  $-60$  до  $-80$  °С, в том числе при испытании образцов из середины толщины листов.

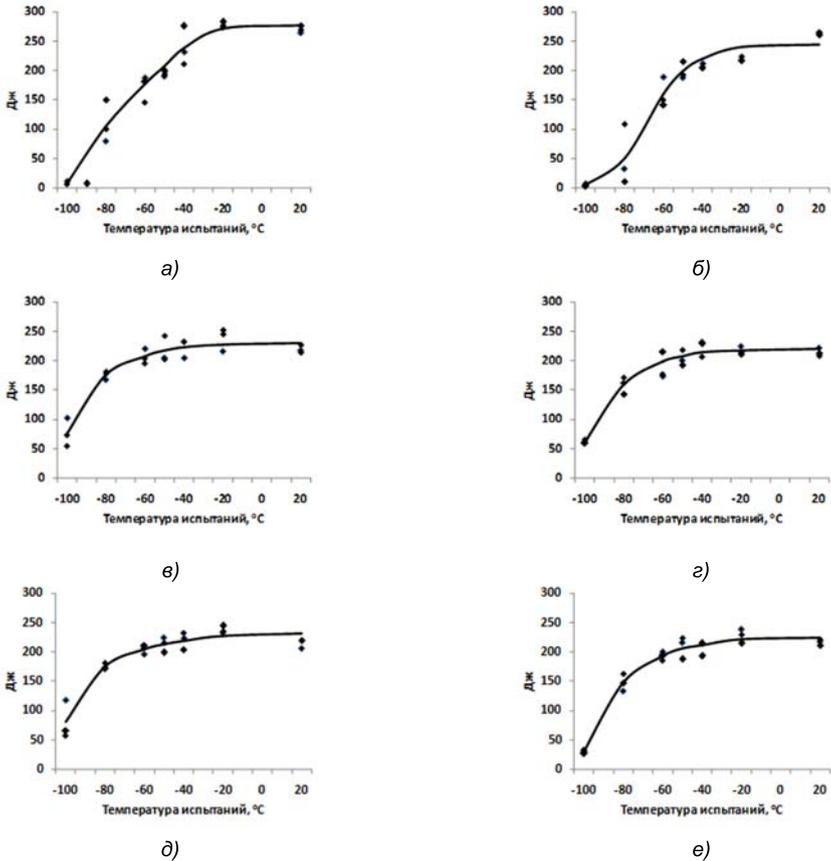


Рис.5

Зависимость значений работы удара от температуры испытания образцов от листового проката толщиной 50 мм из сталей марок F500W<sup>ARC40</sup> (а, б), F620W<sup>ARC40</sup> (в, г), F690W<sup>ARC40</sup> (д, е).

а, в, д – образцы от поверхности по толщине;  
б, г, е – образцы из середины по толщине

Выполнен комплекс испытаний листового проката с целью подтверждения соответствия требованиям правил РС к высокопрочным сталям с индексом "Arc". Полученные результаты (табл. 3) свидетельствуют о высоком качестве проката из новых сталей, позволяющем гарантировать высокую работоспособность при эксплуатации в условиях низких климатических температур (рис. 6).

Таблица 3

**Результаты определения показателей сопротивляемости хрупкому разрушению образцов от проката толщиной 50 мм**

Вид испытаний	Марка стали			Требования
	F500W <sup>ARC40</sup>	F620W <sup>ARC40</sup>	F690W <sup>ARC40</sup>	
$T_{к6}, ^\circ\text{C}$	-40	-55	-72	$\leq -33$
$NDT, ^\circ\text{C}$	-100	-75	-95	$\leq -65$
CTOD при $-40 ^\circ\text{C}$ , мм	1,18	0,68	0,62	$\geq 0,30$



Рис. 6

Вид излома образца  $T_{к6}$  от листового проката толщиной 50 мм из стали марки F620<sup>ARC40</sup> после испытания при температуре  $-50 ^\circ\text{C}$

По результатам опытно-промышленного производства новых высокопрочных сталей с индексом "Arc" с нормируемым пределом текучести 500, 620 и 690 МПа разработаны техническая и технологическая документация на поставку листового проката.

### **Выводы**

1. Разработаны новые высокопрочные стали с индексом "Arc" с нормируемым пределом текучести 500, 620, 690 МПа и пониженным на 20 – 30% содержанием дорогостоящих легирующих элементов по сравнению с существующими отечественными аналогами. Также разработана промышленная технология производства листового проката толщиной до 50 мм из новых сталей.

2. Выполненный комплекс испытаний подтвердил соответствие требованиям правил РС к хладостойким сталям с индексом "Arc" с гарантированным пределом текучести 500, 620 и 690 МПа.

3. Высокая конкурентоспособность новых высокопрочных хладостойких сталей, обусловленная уникальным комплексом свойств, обеспечит их востребованность при строительстве морской техники.

### *Список литературы*

1. Горынин И.В., Хлусова Е.И. Наноструктурированные стали для освоения месторождений шельфа Северного Ледовитого океана // Вестн. РАН. – 2010. – №12. – С. 1069-1075.

2. Правила классификации и постройки морских судов. – Российский морской регистр судоходства, 2012 г.

3. Горынин И.В., Малышевский В.А., Легостаев Ю.Л., Грищенко Л.В. Высокопрочные свариваемые стали // Вопросы материаловедения. – 1999. – №3(20). – С. 21-29.

4. Счастливцев В.М., Табатчикова Т.И., Яковлева И.Л. и др. Влияние термомеханической обработки на хладостойкость низкоуглеродистой низколегированной свариваемой стали // ФММ – 2010. – Том. 109. – С. 314-325.

5. Круглова А.А., Легостаев Ю.Л., Хлусова Е.И. Исследование температурно-деформационных режимов динамической рекристаллизации стали марки АБ-1 // Судостроительная промышленность, сер. «Металловедение и металлургия». – 1988. – №8. – С.12-16.

6. Хлусова Е.И., Мотовилина Г.Д., Голосиенко С.А. Возможности повышения прочностных характеристик экономнолегированных высокопрочных сталей за счет образования наноразмерных карбидов // Вопросы материаловедения. – 2010. – №4 (64). – С. 27-32.

7. Горынин И.В., Рыбин В.В., Малышевский В.А., Семичева Т.Г. Теоретические и экспериментальные основы создания вторичнотвердеющих свариваемых конструкционных сталей // МиТОМ. – 1999. – № 9. – С. 8-13.

8. Зисман А.А., Сошина Т.В., Хлусова Е.И. Исследование рекристаллизации аустенита стали 09ХН2МД в условиях горячей прокатки методом релаксации напряжений // Вопросы материаловедения. – 2012. – №70.

**А.В. Ильин**, ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей»

**В.Ю. Филин**, ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей»

**В.К. Башаев**, ФАУ «Российский морской регистр судоходства»

## **К ВОПРОСУ ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ ХЛАДОСТОЙКОЙ ВЫСОКОПРОЧНОЙ СТАЛИ В ТОЛЩИНЕ ДО 150 ММ**

*Ключевые слова:* хладостойкость, *CTOD*, температура вязко-хрупкого перехода, «энергетический» подход.

### **Введение**

Испытания по определению параметров трещиностойкости (вязкости разрушения) зачастую являются арбитражными в случае неоднозначности определения температур вязко-хрупкого перехода по различным методикам. Однако и для этого вида испытаний не существует общепринятых процедур и критериев для толщин металла свыше 100 мм. В настоящей статье предлагаются некоторые рекомендации, основанные на полученном опыте испытаний.

Широко известным экспериментальным результатом определения параметров трещиностойкости, включая критическое раскрытие трещины *CTOD*, является их зависимость от размеров стандартного образца или его толщины *S* (все остальные размеры по стандартам однозначно определяются величиной *S*), то есть масштабный эффект. Это влечет за собой требование о необходимости проводить сертификационные испытания на трещиностойкость на образцах натурной толщины. При отклонении от этого условия необходимо введение поправок либо в процедуру проведения испытаний (снижение температуры испытаний по отношению к расчетной температуре), либо в критерий применимости материала (регламентируемую величину трещиностойкости).

## 1. Объект и процедура испытаний

Объектом испытаний являлся металл опытной плавки - листовой прокат толщиной 150 мм стали с минимальным гарантированным пределом текучести 690 МПа, разработанной во ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей» в рамках инновационного проекта государственного значения «Магистраль». Было изготовлено два прокатных листа, далее условно обозначаемые лист №1 и №2. Сталь имела однородную мелкозернистую структуру бейнита с размером зерна 10-12 балл и реальный предел текучести 770 МПа. Температурные кривые работы удара и доли волокна в изломах ударных образцов листа №1, показанные на рис. 1, свидетельствуют о высоком качестве

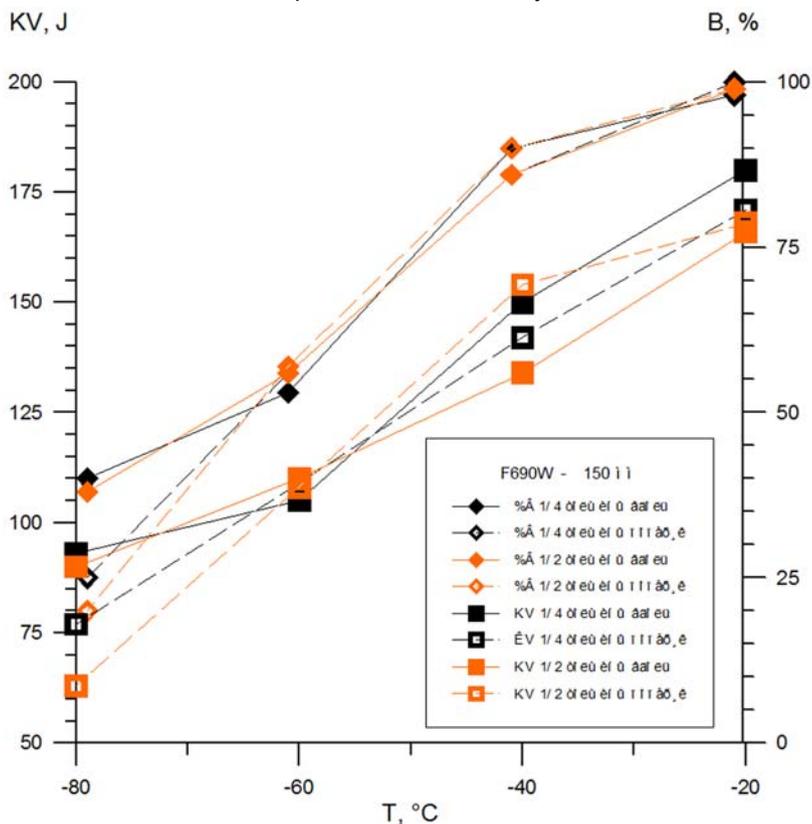


Рис. 1

Работа удара и доля волокнистой составляющей в изломах образцов Шарпи

и изотропии металла. Также выполнены испытания по определению температуры нулевой пластичности *NDT* по ASTM E 208 [5], которая составила  $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$  для листа №1 и  $-125\text{ }^{\circ}\text{C}$  для листа №2.

Испытания на трещиностойкость проводили в аккредитованной Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии и Российским морским регистром судоходства лабораторией «Промтест КМ» ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей» на сервогидравлических машинах с максимальным усилием до 2500 кН по стандарту BS 7448 [6].

Использовались образцы следующих типов: прямоугольного сечения на внецентренное растяжение со ступенчатым надрезом (тип СТ) в половинной и полной толщине, а также образцы квадратного сечения на трехточечный изгиб (тип SEB) в полной толщине. Некоторые образцы, разгруженные после испытания без доламывания, подвергали повторному выращиванию усталостной трещины и повторному испытанию. Соответствие размеров нетто-сечения образцов показано на рис. 2.

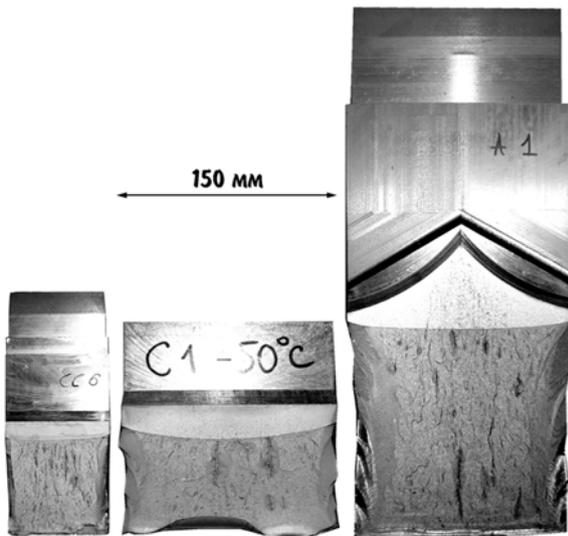


Рис. 2

## **2. Особенности, отмеченные при испытаниях**

1. Испытания образцов толщиной 150 мм в термостатированной криокамере невозможны из-за их габаритов, приходится использовать предварительное переохлаждение.

2. Фронт начальной усталостной трещины достаточно прямой и удовлетворяет требованиям стандарта на испытания [6]; получаемый эффективный модуль упругости, определенный на начальном упругом участке нагружения, хорошо соответствует реальным значениям. Однако подрот трещины при испытании, в основном, имеет место в центральной части ширины образца, и его величина по сравнению с габаритами образца невелика, что приводит к некорректному определению текущей длины трещины по формуле податливости (стабильный подрот не выявляется при использовании метода частичных разгрузок). Таким образом, определение по методу контроля податливости длины трещины, соответствующей критическому событию, затруднено.

3. Замер величины стабильного подроста трещины в изломе также затруднён по следующим причинам:

- технически сложно и трудоемко выполнять тепловое окрашивание образца таких габаритов;

- излом образца, не разрушенного при испытании, успевает покрыться продуктами коррозии в районе вершины трещины из-за скапливающегося конденсата быстрее, чем может быть просушен после испытания;

- циклическое нагружение после испытания недоразрушенного образца, которое должно было установить видимую границу стабильного подроста в изломе, сопровождалось коррозией поверхности излома. Получены ржавые полосы, захватывающие как предыдущий подрот трещины, так и часть последующего усталостного подроста;

- несколько образцов в процессе испытания имели срывы на диаграммах деформирования, связанные с расслоением поперек поверхности излома, под небольшим углом к поверхности проката. Некоторые расслои проходили практически через всю высоту сечения нетто образца. После расслоения фронт трещины становится иррегулярным. Данный факт может иметь чисто геометрическую природу, связанную с размерами образцов. Для исследуемого металла расслои не характерны, что подтверждается испытаниями на излом.

4. Отмечены затруднения в испытании до разрушения образцов, имеющих длину трещины на минимальном уровне, допускаемом стандартами (менее 0,5 высоты сечения нетто), пальцы оснастки деформируются при меньших нагрузках.

5. На примере образца А4 показано, что усталостное нагружение после испытания без разрушения образца, обеспечивающее дальнейший подрост трещины порядка 7 мм, позволяет получить достаточно прямой фронт трещины (при условии отсутствия расслоений) и выполнить повторное испытание образца. На одном образце принципиально возможно получить две и даже три экспериментальные точки при разных нагрузках и длинах трещины, если длина трещины при первом испытании образца составляет 68 мм (45% общей высоты), при втором 75 мм (50% высоты) и при третьем 82 мм (55% высоты).

### **3. Требуемая величина критического раскрытия в вершине трещины**

Определить уровень требований по *CTOD* к металлу в толщине 150 мм можно, экстраполируя данные табл. 3.2.3-1 разд. 3 части XII «Материалы» правил РС [1], но это приводит к недостижимо высоким величинам — порядка 0,65 мм для стали категории прочности 690. Для снижения консерватизма назначения требований к результатам испытаний на трещиностойкость необходимо использовать расчетные оценки прочности по критерию предотвращения хрупких разрушений. Такие оценки могут быть сделаны по алгоритму, разработанному авторами настоящей статьи [7-8]. Снижение консерватизма оценок может быть достигнуто исходя из следующих соображений:

- как правило, рассматриваемые конструктивные элементы не нагружаются до предела текучести по всему сечению;

- размер дефектов основного металла и сварных соединений в большой толщине не должен быть пропорционален толщине  $S$ , его глубина  $a$  не может превышать размеров валика сварного шва (порядка 10 мм).

Условием прочности по отношению к хрупкому разрушению является выполнение неравенства

$$J \leq [J] = J_c/n, \quad (1)$$

где  $J$  — расчетное значение  $J$ -интеграла для дефекта, определяемое уровнем эксплуатационных напряжений с учетом наличия остаточных сварочных напряжений;

$[J]$  — допускаемое значение  $J$ ;

$J_c$  — характеристика трещиностойкости материала;

$n$  — коэффициент безопасности, определяемый категорией ответственности конструктивного элемента и учитывающий разброс экспериментальных данных по трещиностойкости.

Величина  $J$  определяется по формуле

$$J = J_{el}/f_2, \quad (2)$$

где  $J_{el}$  — упругая составляющая  $J$ -интеграла;

$f$  — функция, учитывающая возможность пластического деформирования при достаточно высоком уровне нагрузок на элемент конструкции с дефектом.

Значение  $f$  определяется по формуле

$$f = \sqrt{1 - 0,67L_r^3}, \quad (3)$$

где  $L_r$  — относительная нагрузка на элемент конструкции ( $L_r = 1$  соответствует предельной нагрузке на элемент конструкции с дефектом данного размера).

Дефект рассматривается как полуэллиптическая поверхностная трещина, находящаяся в зоне действия растягивающих остаточных напряжений и ориентированная вдоль шва. Для полуэллиптической трещины величина  $L_r$  определяется по формуле

$$L_r = (1 - \zeta)^{1,58} \sigma_b / 3 + \sqrt{\frac{(1 - \zeta)^{3,16} \sigma_b^2 / 9 + (1 - \zeta)^{3,14} \sigma_t^2}{(1 - \zeta)^2 \sigma_{02}}}, \quad (4)$$

где  $\zeta = a/[S(+2S)]$ ;

$\sigma_b$ ,  $\sigma_t$  — изгибная и мембранная составляющие напряжений соответственно, определенные на поверхности, действующие в направлении, перпендикулярном плоскости трещины.

Расчет параметра  $J_{el}$  производится по формуле, учитывающей частичную релаксацию остаточных напряжений при приложении нагрузки:

$$J_{el} = J_{el}^d + J_{el}^r(1 - 0,67L_r), \quad (5)$$

где  $J_{el}^d$ ,  $J_{el}^r$  — значения упругой составляющей  $J$ -интеграла для дефекта в поле эксплуатационных и остаточных сварочных напряжений, Н/мм соответственно.

Расчет величин  $J_{el}^d$ ,  $J_{el}^r$  производится по формулам:

$$J_{el}^d = 1000(K_1^d)^2(1 - \mu^2)/E, \quad (6)$$

$$J_{el}^r = 1000(K_1^r)^2(1 - \mu^2)/E,$$

где  $K_1^d$ ,  $K_1^r$  — значения коэффициентов интенсивностей напряжений для дефекта в поле эксплуатационных и остаточных сварочных напряжений, МПа $\sqrt{м}$ , соответственно; коэффициент Пуассона  $\mu$  принимается равным 0,3; модуль упругости  $E$  принимается равным  $2 \times 10^5$  МПа.

Для выполнения наиболее консервативных оценок расчет  $K_1^d$  для наиболее глубокой точки контура выполняется по формуле

$$K_1^d = (\sigma_t Y_{3t} + \sigma_b Y_{3b}) \sqrt{0,001 \pi a}, \quad (7)$$

где  $Y_{3t}$ ,  $Y_{3b}$  — поправочные функции для растяжения и изгиба соответственно, учитывающие значения отношений  $a/S$  и  $l/a$ .

Определение величины  $K_1^r$  производится по формуле

$$K_1^r = 0,6 \sigma_{02} \sqrt{0,001 S} [1 - \exp(-9a/S) - (a/S)^2] Y_3^r, \quad (8)$$

где  $Y_3^r$  — поправочная функция, учитывающая значение отношения  $a/l$ :

$$Y_3^r = [1 + 1,464(2a/l)^{1,85}]^{-0,5}. \quad (9)$$

Переход от  $J$ -интеграла к величине  $CTOD$  осуществляется по формуле

$$CTOD = J / (1,7 \sigma_{0,2}). \quad (10)$$

Из соображений наибольшего консерватизма оценок протяженность дефекта  $l$  принимаем равной  $5a$ , дальнейшее увеличение этого размера несущественно влияет на результат расчета и отсутствует необходимость учета подраста трещины в продольном направлении при циклической нагрузке. Уровень эксплуатационных напряжений принимаем равным  $\sigma_b = 0,5 \sigma_{0,2}$ ,  $\sigma_t = 0,2 \sigma_{0,2}$ . При указанных значениях параметров,  $\zeta = 0,0095$ ,  $L_r = 0,573$ , значения функций  $Y_{3t} = 0,94$ ,  $Y_{3b} = 0,86$ . Таким образом, расчётные значения нагруженности  $J_{el} = 39,3$  Н/мм,  $J = 44,7$  Н/мм.

При использовании в качестве параметра трещиностойкости среднего значения, определенного по недостаточно статистически представительному объему данных, коэффициент безопасности  $n$  для наиболее ответственных конструктивных элементов принимается равным 6. Таким образом, требуемая средняя величина трещиностойкости материала  $J_c = 268$  Н/мм,  $CTOD = 0,23$  мм.

Применяя полученное значение к результатам испытания на трещиностойкость полнотолщинных образцов прямоугольного сечения (рис. 3), получаем, что условие прочности по предотвращению хрупких разрушений выполняется до температур порядка  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ , что свидетельствует о достаточно высоком качестве металла.

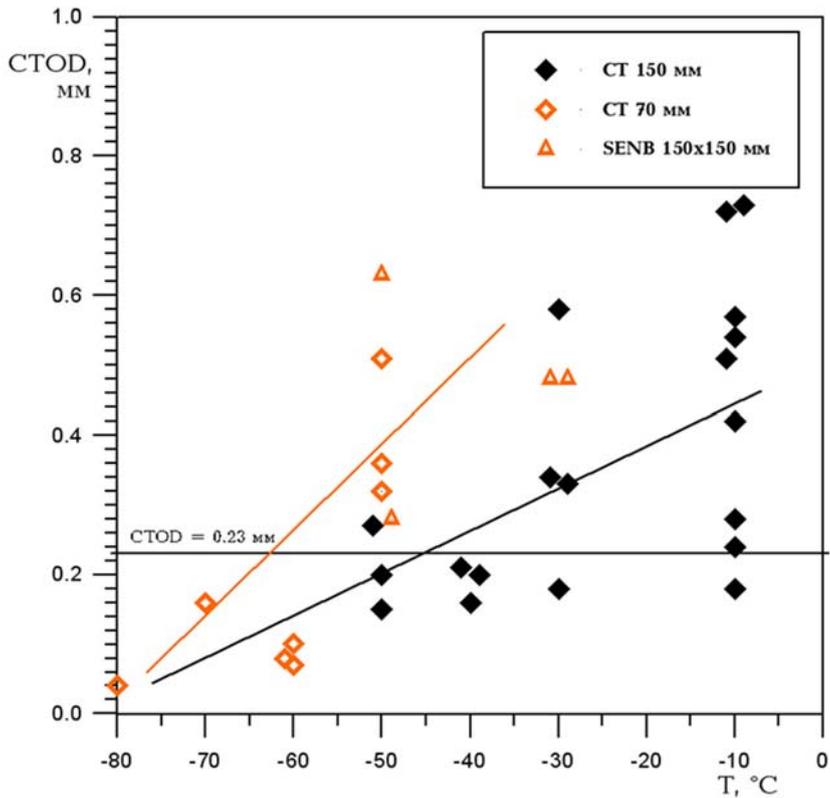


Рис. 3  
Температурные кривые деформационного параметра трещиностойкости  $CTOD$

#### 4. Теоретическое описание масштабного фактора и его экспериментальное подтверждение

Как видно из рис. 3, при испытаниях стали в температурной области вязко-хрупкого перехода наблюдается значительный разброс значений трещиностойкости, что затрудняет оценку качества материала и описание масштабного фактора, наблюдаемого при испытаниях образцов различных типоразмеров.

«Энергетический» подход к описанию масштабного фактора предложен в работах сотрудников ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей», например [9]. Они основаны на следующих экспериментальных результатах, полученных на статистически представительных количествах образцов стали судостроительных марок.

1. Различие результатов определения трещиностойкости при нестабильном хрупком разрушении минимально в случае, когда оба сопоставляемых образца разрушены при незначительной общей пластической деформации (при маломасштабной текучести или близких к ней условиях, когда диаграммы деформирования обоих образцов практически линейны, температуры  $-80$  °С и ниже на рис. 3). Оно существенно возрастает, если при испытаниях реализуется различный уровень номинального пластического деформирования.

2. Максимальные различия параметров трещиностойкости связаны с реализацией только в одном из сопоставляемых образцов (меньших размеров) стабильного вязкого подраста трещины, предшествовавшего разрушению (температуры от  $-50$  до  $-20$  °С на рис. 3).

Указанные особенности масштабного эффекта связываются с детерминированной его причиной — различием интенсивности высвобождаемой при продвижении трещины упругой энергии в сравниваемых образцах при одном и том же значении  $J_c$  или  $CTOD$ .

При разрушении в области больших пластических деформаций условием хрупкого разрушения является равенство

$$\frac{J_{elcr}}{1+J_{elcr}/J_{cr}} = G = R_c, \quad (11)$$

где  $J_{cr}$ ,  $J_{elcr}$  — критическое значение  $J$  и его упругая составляющая;

$G$  — интенсивность высвобождаемой при продвижении трещины упругой энергии;

$R_c$  — удельная работа (энергоёмкость) распространения трещины, которая является характеристикой трещиностойкости материала при данной температуре.

Условие (11) отражает влияние масштабного фактора, поскольку при номинально пластическом деформировании образца одному и тому же значению  $J_{cr}$  для образцов различной геометрии соответствуют различные значения  $J_{ef}$ : большему образцу соответствует большее значение  $J_{ef}$ .

Исходя из данной модели, температурные зависимости образцов различной геометрии не эквидистантны. В температурной области, где разрушения в обоих сопоставляемых образцов происходят при номинально упругом нагружении, температурный сдвиг отсутствует, а максимальное значение  $\Delta T$  имеет место в случае, когда в малом образце хрупкие разрушения полностью отсутствуют, и составляет

$$\Delta T = 26 \text{ }^{\circ}\text{C} \ln (\gamma/\gamma_1), \quad (12)$$

где  $\gamma$  — высота сечения нетто образца полной толщины  $B$ ,  $\gamma_1$  — уменьшенной толщины.

Согласно (12), максимальный температурный сдвиг при испытаниях образцов СТ 70 мм или SENB квадратного сечения вместо образцов СТ 150 мм должен составлять 20 °С для зоны вязко-хрупкого перехода. Этот вывод также подтверждается рис. 4, несмотря на то, что при повышении температуры испытаний в изломах образцов исследуемой стали возникают расслоения.

## **Выводы**

1. Во ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей» освоены испытания на трещиностойкость стали в толщине до 150 мм и разработаны методические приемы, позволяющие повысить информативность таких испытаний.

2. Методика расчетов сопротивления хрупким разрушениям, разработанная авторами, позволяет определить как требования к материалу в больших толщинах, так и работоспособность конструкций при низких климатических температурах.

3. Предложенный авторами и экспериментально подтвержденный «энергетический» подход к описанию масштабного фактора при испытаниях на трещиностойкость позволил обосновать применение образцов уменьшенного сечения при сертификационных испытаниях на трещиностойкость металла толщиной более 70 мм. При этом температура испытаний должна быть снижена по отношению к расчетной температуре конструкции. Темпера-

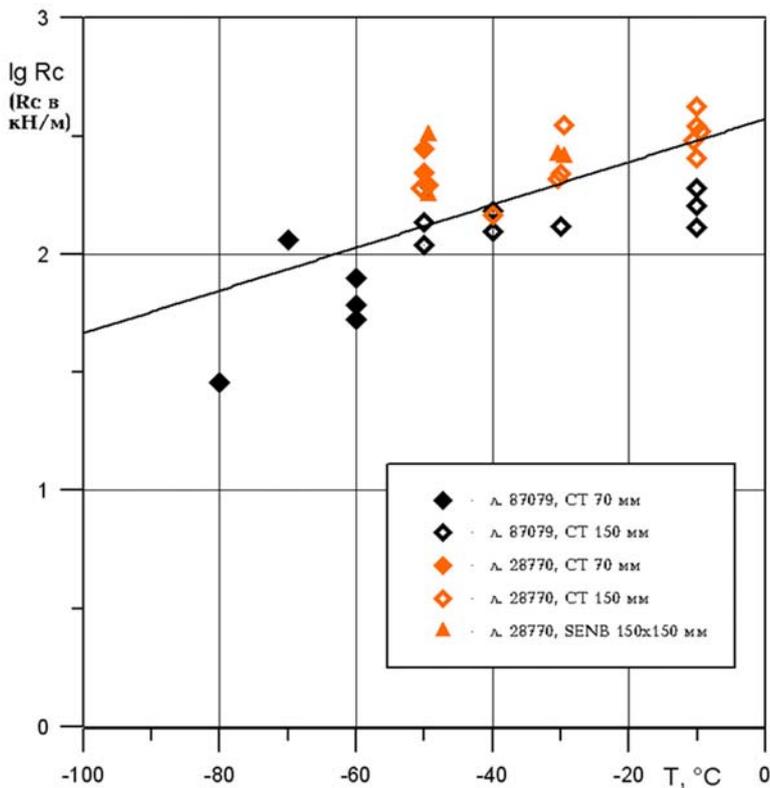


Рис. 4  
Температурная кривая удельной работы распространения трещины  $R_c$

турный сдвиг должен варьироваться от 5 до 20 °C в зависимости от толщины сертифицируемого материала, типа материала (основной, сварное соединение) и предела текучести.

## *Список литературы*

1. Правила классификации, оборудования и постройки плавучих буровых установок и морских стационарных платформ. – СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2012.
2. BS EN 10225:2009. Weldable structural steels for fixed offshore structures. – Technical delivery conditions.
3. DNV-OS-B101. Offshore standard. Metallic materials. October 2012.
4. ISO 19902: 2007. Petroleum and natural gas industries — Fixed steel offshore structures, part 19 “Materials”
5. ASTM E 208-06 (2012). Standard Test Method for Conducting Drop-Weight Test to Determine Nil Ductility Transition Temperature of Ferritic Steels.
6. BS 7448-1: 1991. Fracture mechanics toughness tests. Part 1. Method for determination of  $K_{Ic}$ , critical CTOD and critical J values of metallic materials.
7. Евенко В.И., Башаев В.К., Ильин А.В., Леонов В.П., Филин В.Ю., Щеголева Е.Г. Проблемы аттестации высокопрочных хладостойких материалов для конструкций арктического шельфа России, применение расчетных оценок сопротивления хрупкому разрушению для обоснования требований к сталям и сварным соединениям // Вопросы материаловедения. – 2009. – Вып.3(59). – С. 17 – 37.
8. Ильин А.В., Леонов В.П., Филин В.Ю. Разработка методики оценки сопротивления хрупкому разрушению сварных конструкций для шельфа Арктики // Актуальные проблемы прочности. Сборник трудов XLVIII Международной конференции, 15-18 сентября 2009 г. Тольятти, ТГУ. – 2009. – С. 81-84.
9. Ильин А.В., Мизецкий А.В., Филин В.Ю. К описанию масштабного эффекта при испытаниях на трещиностойкость на основе модифицированного подхода Гриффитса // Вопросы материаловедения. – 2005. – Вып.1(41). – С. 1-21.

УДК 622.276.004

*Н.А. Вальдман, ФГУП «Крыловский государственный научный центр»*

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БАРЬЕРОВ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ РАЗРАБОТКЕ ПРОЕКТОВ МОРСКИХ СООРУЖЕНИЙ НА ШЕЛЬФЕ

*Ключевые слова:* барьеры безопасности, морские транспортно-технологические системы, аварийные ситуации

Повышенные риски при освоении месторождений нефти и газа на арктическом шельфе предъявляют высокие требования к надежности и безопасности эксплуатации объектов морских транспортно-технологических систем (МТТС).

Маршруты движения судов, уникальность объектов МТТС и судов, используемого на них оборудования, многолетний срок эксплуатации объектов, их расположение в районах с суровым климатом на шельфе Баренцева, Карского и Охотского морей, а также значительные объемы транспортирования, перегрузки и хранения жидких углеводородов предъявляют повышенные требования к организации барьеров безопасности.

Под барьером безопасности обычно понимается комплекс технических защитных мероприятий, направленных на снижение рисков чрезвычайных ситуаций [1].

В качестве барьеров безопасности могут выступать:

техническое оборудование и устройства, используемые для предотвращения, локализации и ликвидации аварии и аварийной ситуации (пожарные и газовые датчики, оборудование и средства активной противопожарной защиты, средства и оборудование ликвидации аварийных разливов нефти, системы аварийного останова и аварийного сброса давления, подводное противовыбросовое оборудование и т.д.);

средства покидания, спасения и эвакуации персонала (спасательные шлюпки и плоты, индивидуальные спасательные средства и т.д.);

конструкции и конструктивные элементы, устанавливаемые для обеспечения защиты (конструктивная противопожарная защита), защитные «погодные» конструкции, панели и щиты, туннель аварийного покидания и т.д.).

На рис. 1 приведен перечень барьеров безопасности для предотвращения аварийных ситуаций:

- утечек (разливов);
- возгораний и пожаров;
- потери персонала;
- ущерба имуществу.

Основными функциями барьеров безопасности для буровой, добычной, технологической зон морской установки/платформы, являются:

- сохранение целостности оборудования;
- предотвращение воспламенения;
- уменьшение размеров взрывоопасного облака/разлива;
- предотвращение смертельных случаев.

Для сохранения требуемого уровня характеристик барьеров безопасности на морской установке/платформе необходимо обеспечить соблюдение правил эксплуатации барьера, проведение регулярных испытаний и техобслуживания, обучение персонала.

При эксплуатации морских установок/платформ на шельфе должен быть обеспечен периодический контроль характеристик каждого барьера безопасности, а именно:

надежность/работоспособность (безотказность в течение обозначенного срока эксплуатации);

эффективность (достижение установленного уровня безопасности);

устойчивость (наличие технически-конструктивного «запаса прочности» при превышении допустимых параметров использования).

Все это позволяет обеспечить адекватный уровень безопасности [2, 3], управление и контроль за рисками, а также оперативное реагирование при возникновении аварийной ситуации на объектах МТТС.

При анализе, ранжировании и выявлении рисков при оценке влияния арктических условий рассматриваются барьеры безопасности, выполняющие следующие функции:

локализация и контроль утечек (выбросов): изолирование / сегментация аварийных участков посредством аварийного отключения; аварийный сброс давления;

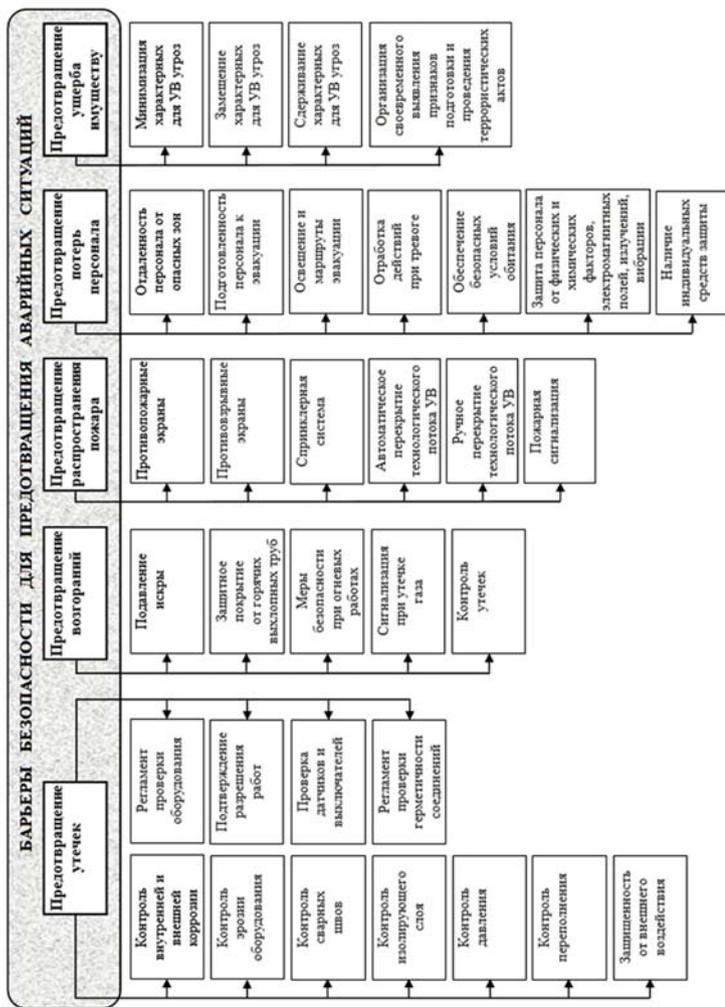


Рис. 1  
Барьеры безопасности

контроль загазованности;  
контроль источников воспламенения;  
пассивная противопожарная защита;  
активная противопожарная защита;  
взрывозащитные барьеры;  
естественная вентиляция и системы принудительной вентиляции, отопления и кондиционирования воздуха.

При формировании барьеров безопасности учитываются современные требования международных стандартов ИСО, ИМО, международных конвенций, норвежских стандартов NORSOK, а также документов Министерства транспорта РФ, Ростехнадзора, Минприроды, МЧС, отраслевых нормативов (ОАО «Газпром», ОАО «Лукойл»), правил российского морского регистра судоходства и др.

Разработка системы барьеров безопасности также подразумевает выполнение новых международных и отечественных требований к энергоэффективности, выбросам и сбросам в атмосферу и морскую среду, очистке балластных вод, шумовому загрязнению морской акватории и т.п. на основе использования преимущественно отечественных технологий и оборудования.

В качестве барьеров безопасности на морских установках/платформах [3,4] могут рассматриваться не только технические объекты, оборудование, но и конкретные мероприятия и действия по реализации нормативных требований и правил, регламентирующих безопасность, положения Планов безопасности (План ликвидации аварийных разливов нефти, План аварийно-спасательного обеспечения, Пожарный план, План действий при ЧС).

Арктические условия и факторы оказывают влияние на функциональность технических барьеров безопасности.

Одним из наиболее существенных аспектов безопасности для морских установок на арктическом шельфе является «винтеризация» (комплекс мероприятий, позволяющий сохранять работоспособность оборудования судна и персонала при низких температурах воздуха и воздействии других арктических условий). Винтеризацию систем и технологического оборудования на морских установках можно рассматривать как организацию создания барьера безопасности. На рис. 2 приведены примеры винтеризации корпусов проектов технологических судов, разработанных по заказу Минпромторга РФ.



Рис. 2  
Примеры винтеризации корпусов оборудования судов

Меры по винтеризации для предотвращения аварийных и чрезвычайных ситуаций, связанных с повреждением конструкций, отказами оборудования и травмами персонала, включают проектирование конструкций и технологического оборудования с учетом:

- низких температур и сильного ветра;
- наличия осадков в виде снега;
- ледовых нагрузок от обледенения поверхностей;
- длительной продолжительности темного времени суток.

Ниже приведено описание винтеризации систем и оборудования на морских сооружениях.

Система / оборудование	Описание методов винтеризации
Конструкции корпуса и технологического оборудования	Учет влияния низких температур при проектировании конструкции корпуса, трубопроводов, вентиляционных шахт, расположенных на верхней палубе. Накрытие технологического оборудования на верхней палубе защитными панелями. Установка дополнительных датчиков-газоанализаторов в технологической зоне
Механизмы и электрооборудование	Нагревание корпусов компрессоров и насосов, клапанов и других подобных механизмов. Регулярное удаление льда с поверхности механизмов. Проектирование электрооборудования в расчете на эксплуатацию при низких температурах
Грузовые системы	Обеспечение беспрепятственного и безопасного доступа персонала на грузовую палубу. Защита грузовой системы, в частности, грузового манифольда, от воздействия снега защитными панелями. Вентиляция грузовой палубы

Система / оборудование	Описание методов винтеризации
Противопожарные системы	Проектирование противопожарных систем с учетом внешних температур.
Системы контроля	Обеспечение систем водяного пожаротушения обогревом и осушающими устройствами. Защита пожарных гидрантов от обледенения
Персонал	Обогрев корпусов приборов, входящих в систему контроля за технологическим процессом. Установка специальной системы контроля над температурой в помещениях, оснащенной сигнализацией, сигналы от которой должны поступать на центральный пульт управления
	Экипировка средствами индивидуальной защиты персонала в соответствии с условиями работы. Обогрев настилов открытых палуб, переходов и мостков. Установка защитных ветровых панелей. Достаточное освещение рабочих зон, выполненное во взрывобезопасном исполнении

В качестве барьеров безопасности могут также рассматриваться:

- организационно-технические меры;
- разработка регламентов безопасного взаимодействия судов;
- разработка руководств по безопасному ведению морских работ.

Примерами разработок Крыловского государственного научного центра в этом направлении являются Регламент безопасного взаимодействия технических и строительных судов во время морских операций по прокладке морского газопровода и Регламент взаимодействия судов при прокладке морского участка газопровода «Джубга-Лазаревское-Сочи».

На рис. 3 представлена схема взаимодействия судов при прокладке морской части газопровода в Байдарачьей губе [5].

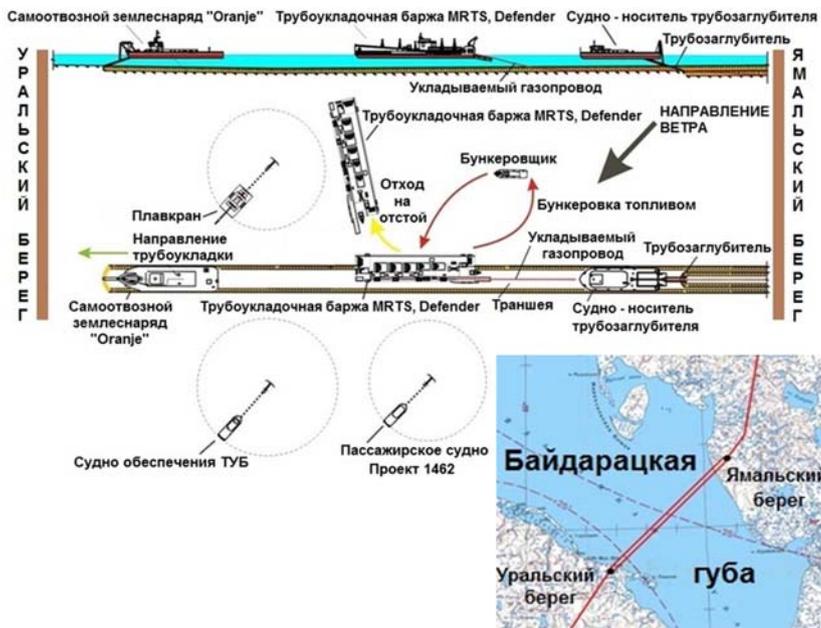


Рис. 3  
Взаимодействие судов при укладке подводного газопровода в Байдарацкой губе

Разработка регламентов, руководств по безопасности морских операций позволяет при использовании значительного количества судов уменьшить риски столкновений, посадок на мель и других морских аварий.

Примерами организационно-технических барьеров могут также служить руководства по безопасному взаимодействию танкера, системы отгрузки нефти с платформы, судов обеспечения при швартовно-грузовых операциях; планы управления рисками для обеспечения безопасности операций танкера у морской платформы и газовева у морского отгрузочного причала.

В качестве еще одного примера выполненных в данном направлении работ является разработка Плана аварийно-спасательного обеспечения для месторождения «Приразломное», на котором работает одноименная морская ледостойкая

стационарная платформа (рис. 4), включающего обеспечение навигационной безопасности, организацию аварийно-спасательных мероприятий, порядок взаимодействия сил и средств для ликвидации последствий аварии на морских объектах месторождения и спасения людей.

Примером создания барьера безопасности может служить разработка мер для уменьшения воздействия на грунт и каменную отсыпку вокруг морских платформ потоков от гребных винтов танкера или судна обеспечения с целью повышения безопасности морских работ и снижения рисков посадки судов на мель.

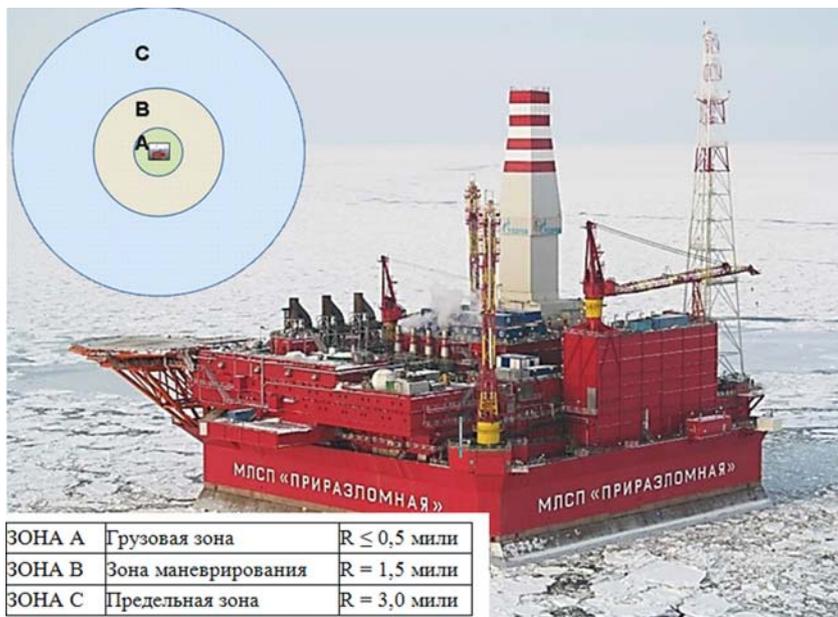


Рис. 4  
Нефтяная платформа Приразломная

Различные типы объектов МТТС, сложные процессы их взаимодействия требуют развития и уточнения подходов к обеспечению безопасности, адаптации барьеров безопасности к конкретным условиям эксплуатации и морским объектам,

транспортным судам, учета специфических особенностей районов проведения морских транспортных операций. Работами в данном направлении активно занимаются специалисты Крыловского государственного научного центра.

### *Список литературы*

1. ГОСТ Р 54141-2010. Менеджмент рисков. Руководство по применению организационных мер безопасности и оценки рисков. Эталонные сценарии инцидентов.

2. M.F.Kujath, P.R.Amyotte, F.I.Khan «A conceptual offshore oil and gas process accident model», Journal of Loss Prevention in the Process Industries 23 (2010), pp. 323-330.

3. Пааске П., Лисанов М.В., Сафонов В.С., Петрулевич А.А. Российско-норвежский проект «Баренц-2020»: гармонизация стандартов в области анализа риска // Безопасность труда в промышленности. 2011. – № 4. – С.11-14.

4. Правила классификации и постройки морских судов: в 3 т. – Т. 3, разд. 7 “Требования по оборудованию судов для обеспечения длительной эксплуатации при низких температурах. – СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2012.

5. Вальдман Н.А., Труб М.С., Грудницкий Г.В. Учет требований промышленной и экологической безопасности при строительстве и эксплуатации морских трубопроводов в арктических условиях // Труды Крыловского государственного научного центра. – 2013. –Вып. 74 (358). – С. 93-106.

*Л.В. Муравьева, ВолгаГАСУ*

## **ОЦЕНКА РИСКА ПОДВОДНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ НА МОРСКОМ ГРУНТЕ ПРИ СЕЙСМИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ**

*Ключевые слова: подводный трубопровод, безопасность, сейсмические нагрузки, динамическая модель, оценка риска, линейный осциллятор*

Морские магистральные трубопроводы должны обладать повышенной надежностью при строительстве и эксплуатации. Основными критериями оптимальности сооружения являются техническая и экологическая безопасность.

Согласно [1], следует выполнять анализ всех возможных колебаний напряжений в трубопроводе по интенсивности и частоте, способных вызвать разрушения при эксплуатации морской трубопроводной системы. К основным причинам возникновения аварий на трубопроводах, связанным с внешними воздействиями природного характера, относятся сейсмические явления, в том числе такие явления, как оседание грунта и его разжижение.

В статье рассмотрен анализ стабильности трубопровода при указанных чрезвычайных гидродинамических условиях для предельных ситуаций.

При построении алгоритмов расчета сооружений с учетом пространственной работы необходимо исходить из нелинейной математической модели, которая наиболее полно отражает характер адаптации сооружения к сильным землетрясениям. Характер действительного поведения сооружения, его устойчивость по отношению к сильным землетрясениям дает возможность проследить поведение сооружения на всех стадиях его работы – от упругой до полного разрушения.

На глубоководье и в удалении от судоходных путей трубопроводы, как правило, прокладываются непосредственно на морском дне, так как нет потребности в защите от орудий рыбной

ловли, ледовой экзарации и необходимости мероприятий, понижающих влияние теплового расширения. При укладке, а также в течение эксплуатации трубопровод обычно погружается в донный грунт на глубину, соизмеримую с диаметром трубопровода.

Сопротивление морского дна  $P(z)$  основано на сопротивлении грунтов сдвигу. Кроме того, должна учитываться сила плавучести, которая действует вертикально вверх в дополнение к сопротивлению  $P(z)$ . При изменении сопротивления грунтового основания и реализации сейсмического события трубопровод может перемещаться как вверх, так и вниз, погружаясь в донный грунт.

Все существующие методики расчета (спектральный, прямой динамический) в конечном итоге сводятся к рассмотрению работы линейного осциллятора. Поэтому учет влияния жидкости рассмотрим на примере одномассовой системы без затухания (линейного консервативного осциллятора).

Уравнение колебаний линейного осциллятора, когда система взаимодействует с жидкостью, имеет следующий вид:

$$m\ddot{y} + ry = -m\ddot{Y}_0 + P_0 + P_e, \quad (1)$$

где  $P_0$  — гидродинамическое давление, связанное с движением основания;  
 $P_e$  — гидродинамическое давление, обусловленное упругим смещением массы  $y(t)$ .

Сейсмическая нагрузка, действующая на  $k$ -ю массу при колебаниях по  $i$ -й форме, складывается из инерционной нагрузки и гидродинамического давления жидкости и записывается в виде:

$$S_k^*(t) = -m_k \sum_{i=1}^n X_{ik} D_i^* \omega_i \int_0^t \ddot{Y}_0(\tau) \sin \omega_i^*(t - \tau) d\tau, \quad (2)$$

$$\text{где } D_i^* = \sum_{v=1}^n (m_v + \mu_v) X_{iv} / \sum_{v=1}^n m_v X_{iv}^2.$$

Рассмотрим перемещение трубопровода при заданной сейсмограмме  $u(t)$  перемещений основания. В данном случае на сооружение через его основание воздействует некоторое ускорение («сейсмический удар» по А.Г. Назарову [2]), сообщаемое системе с любой массой одну и ту же скорость  $v_0$ .

При колебаниях системы в жидкости будем иметь

$$S^*(m + \mu_0) J \omega^* 0 t; \max S^* = (m + \mu_0) J \omega^* 0. \quad (3)$$

Соответствующая сейсмическая нагрузка с учетом жидкости равна

$$S^*(t) = -(m + \mu_0) \frac{\omega_0^2 W_0}{\omega_0^2 - \omega^2} \sin \omega t. \quad (4)$$

Таким образом, наличие жидкости может привести к существенному изменению сейсмической нагрузки на систему за счет уменьшения ее собственной частоты колебаний (и смещения резонансной зоны), а также и в результате «увеличения» массы.

Однако неустойчивость морского дна, сжижение верхнего слоя песка, а также и действие сил плавучести могут привести к отказу подводного трубопровода. На рис. 1 схематично показаны особенности поведения подводного трубопровода при взаимодействии с грунтом морского дна.

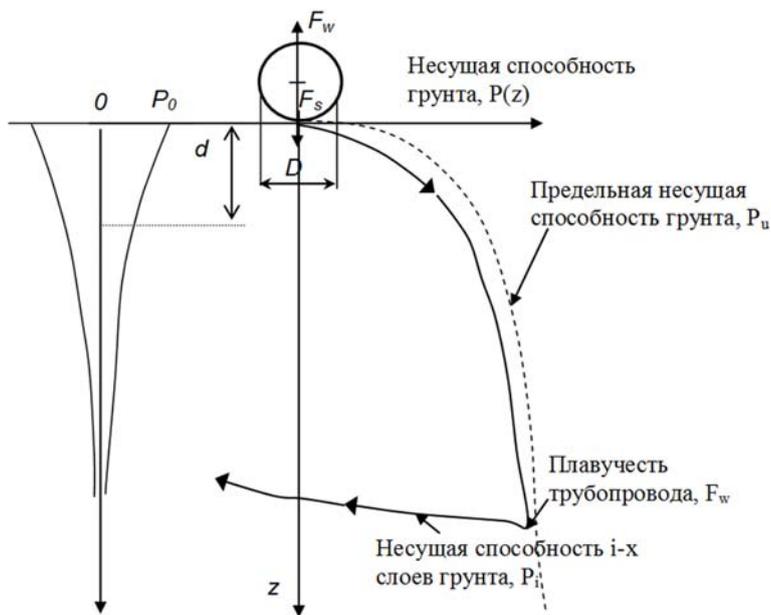


Рис. 1  
 Модель поведения трубопровода:  $F_w$  – плавучесть трубопровода,  $F_s$  – несущая способность слоев грунта,  $P_0$  – поровое давление,  $d$  – глубина разжижения (толщина песчаного слоя)

Первоначальная осадка трубопровода связана с сопротивлением грунта, которое увеличивается, поскольку труба оседает в морское дно, и асимптотически приближается к пределу  $P_u$  несущей способности грунта. При землетрясении происходит разжижение грунтов основания и сопротивление  $P_u$  снижается. Несущая способность разрушенного слоя грунта принимается равной силам плавучести трубопровода в разжиженном грунте. В зависимости от балластировки трубопровода реализуются ситуации всплытия, погружения (всасывания) трубопровода пропорционально уменьшению силы  $P_u$  (рис. 1).

При оценке устойчивости грунтового массива в результате, например, разжижения и связанных с этим осадок песчаного грунта можно пренебречь эффектом воздействия продольных волн. Горизонтальные сдвиговые напряжения, возникающие при распространении поперечных волн, являются основным компонентом напряжений, которые необходимо учитывать при расчете устойчивости грунта с ровной поверхностью в одномерной постановке в условиях землетрясения [4].

Морское дно считают непрочным и включенным в модель в двух формах: плоское морское дно или нерегулярное морское дно. Проведение нелинейного конечно-элементного расчета в условиях неопределенности свойств грунтов выполняется на основании нелинейного динамического расчета. Плоскость морского дна строится, используя «твердую поверхность»; нерегулярное морское дно моделируется нелинейными объемными элементами.

Для решения проблемы динамического расчета конструкции используют два основных метода:

- разложение по собственным формам;
- прямое интегрирование уравнений движения.

При выполнении анализа конструкции на сейсмическое воздействие с помощью стандартных модулей расчетной программы выполняется расчет по квазистатическому методу.

Расчетная динамическая модель незаглубленного подводного трубопровода – дискретная пространственная модель, базирующаяся на методе конечных элементов: основание и окружающая водная среда моделируются объемными элементами, оболочка трубопровода – пластинчатыми элементами, взаимодействие трубопровода и грунта учитывается

с помощью элементов трения в продольном и поперечных направлениях.

Критерии прочности конструкции подводного трубопровода - максимальные суммарные напряжения в трубопроводе  $\sigma_{max}$ , МПа.

Суммарные напряжения в точке сечения трубопровода  $\sigma_{max}$  определяются согласно правил [3]:

$$s_{max} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_{hp}^2 - \sigma_x \sigma_{hp} + 3\tau^2} \leq k_\sigma R_e, \quad (5)$$

где  $\sigma_x$  – суммарные продольные напряжения, МПа;  
 $\sigma_{hp}$  – суммарные кольцевые напряжения, МПа;  
 $\tau$  – тангенциальные (касательные) напряжения, МПа;  
 $k_\sigma$  – коэффициент запаса по суммарным напряжениям.

На рис. 2 представлены пример расчетной схемы динамической модели незаглубленного подводного трубопровода (1), результаты расчета в виде деформаций при разжижении грунтового слоя (2) и эквивалентные напряжения в трубопроводе при действии 8-балльного землетрясения (3). Инженерно геологический разрез в месте прокладки трубопровода принят в соответствии с рис. 3.

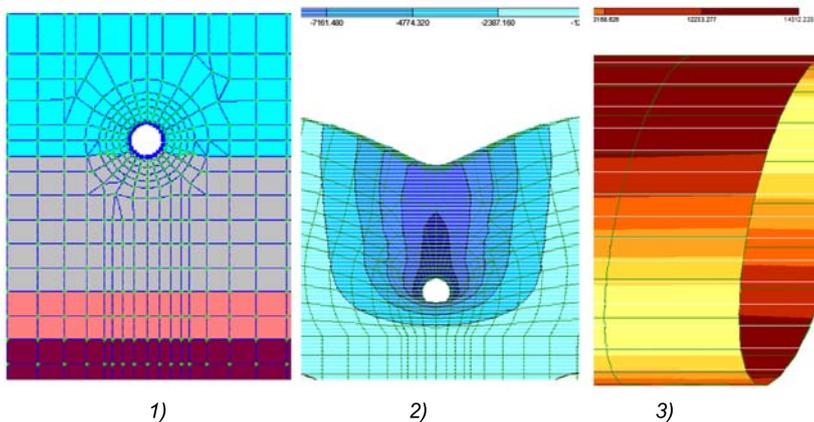


Рис. 2

Конечно-элементная расчетная модель:  
 1 – расчетная схема в соответствии с [3, 7];  
 2 – деформации при разжижении грунтового слоя;  
 3 – эквивалентные напряжения, т/м<sup>2</sup>,  
 при сейсмическом воздействии 257 МПа (26235 т/м<sup>2</sup>)

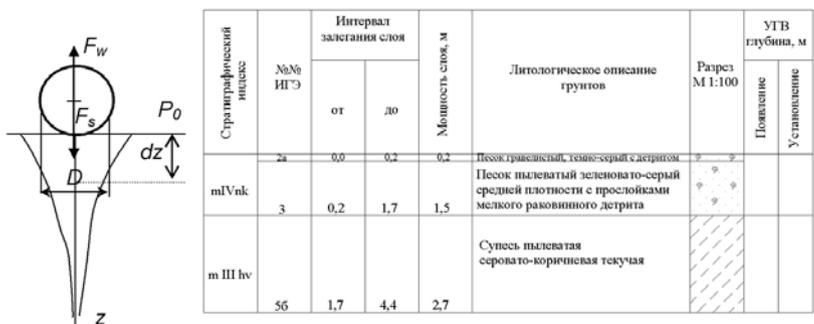


Рис. 3  
Инженерно геологический разрез расчетной модели

Вероятность разжижения грунта зависит от периода времени, прошедшего после укладки трубопровода, и периода повторяемости сейсмической нагрузки. Чем больше период времени, прошедший после укладки трубопровода, тем выше вероятность возникновения условий, приводящих к разжижению грунта, к которым, безусловно, относится землетрясение. Вероятность можно рассчитать по формуле

$$E_p = 1 - (1 - 1/T_R)^L, \tag{6}$$

где  $E_p$  и  $T_R$  - вероятность возникновения и период повторяемости землетрясений;  
 $L$  - время, прошедшее после укладки трубопровода.

Анализ риска является полезным средством, когда имеется намерение выявить существующие опасности, определить уровни рисков выявленных нежелательных событий (по частоте и последствиям) и реализовать меры по уменьшению риска в случае превышения его приемлемого уровня.

Степень риска аварии сложной технической системы, для которой, как правило, присуще наличие множества опасностей, определяется на основе анализа совокупности показателей рисков, выявленных при анализе нежелательных событий, связанных с разгерметизацией оборудования, с проявлением неблагоприятных метеоусловий.

На рис. 4 представлен пример дерева событий, построенного на основании правил [3], для потенциальных аварийных ситуаций подводного трубопровода при 8-балльном землетрясении.

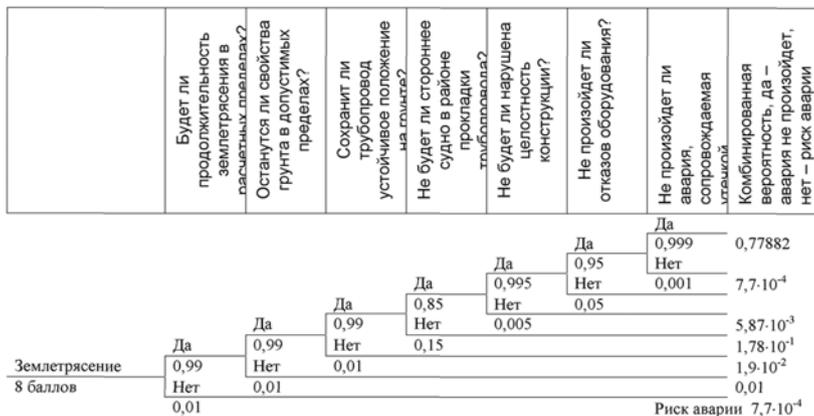


Рис. 4  
Дерево событий потенциальных аварийных ситуаций при землетрясении

При учете сейсмической опасности при сроке эксплуатации конструкции 50 лет вероятность отказа равна  $7,32 \times 10^{-5}$  повреждений на участок в год. Но в данном случае уровень сейсмического риска приравнивается к уровню сейсмической опасности территории. Полученная величина вероятности отказа с учетом сейсмического воздействия входит в пределы подлежащего анализу уровня риска по методике ALARP [3].

После выявления на каждом из  $J$  объектов всех сценариев аварии ( $X_j$ ), расчета полей потенциальной опасности этих аварий ( $R_j(x,y)$ ) и определения вероятности реализации их негативного потенциала ( $X_i$ ) могут быть построены интегральные поля риска на картографической основе:

$$R_{\Sigma}(x,y) = \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^{N_j} \lambda_{ij} R_{ij}(x,y). \quad (7)$$

Суммирование проводится по причине взаимной независимости зон ущерба для рассматриваемых аварийных сценариев. Основными источниками неопределенностей оценки риска на данном опасном объекте является неполнота информации по надежности оборудования.

## *Список литературы*

1. Нормы проектирования и строительства морского газопровода: ВН 39-1.9-005-98.-М.:ИРЦ «Газпром», 1998. - 17с.
2. Завриев К.С. , Назаров А.Г. , Айзенберг Я.М. Основы теории сейсмостойкости зданий и сооружений. – М.: Стройиздат, 1970. - 224 с.
3. Правила классификации и постройки морских подводных трубопроводов.- СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2012. - 283 с.
4. Динамический расчет сооружений на специальные воздействия. Справочник проектировщика. Под ред. Коренева Б.Г. , Рабиновича И.М. - М.: Стройиздат, 1984.- 215 с.
5. "Free Spanning Pipelines" Recommended Practice DNV-RP-F105. Det Norske Veritas. - 2002.-39р.
6. Строительство в сейсмических районах: СП 14.13330.2011. - М.: Минрегион России, 2011. - 82 с.
7. Муравьева Л.В. Проблемы оценки безопасности морского трубопровода / Труды RAO/GIS Offshore 2011. - СПб, 15-18 сентября 2011.

**И.М. Берхин**, канд. техн. наук, ЦКБ «Коралл»

**О.Е. Литонов**, д-р техн. наук, проф., ФГУП «Крыловский государственный научный центр»

## **УСОВЕРШЕНСТВОВАННАЯ МЕТОДИКА РАСЧЕТОВ ПРОЧНОСТИ КОНСТРУКЦИЙ САМОПОДЪЕМНЫХ ПЛАВУЧИХ БУРОВЫХ УСТАНОВОК ПРИ ВЕТРО-ВОЛНОВЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ**

*Ключевые слова:* СПБУ, прочность конструкции, методики расчета, ветро-волновые нагрузки, ветоятностные и детерминистические методы расчета

### **Введение**

В мире не много найдется инженерных сооружений, работающих сразу в трех средах. Одними из них являются самоподъёмные плавучие буровые установки (СПБУ), подвергающиеся воздействию атмо-, гидро- и литосфер. Порой же они при известных условиях «знакомы» и с криосферой.

Сложные в техническом плане сооружения - СПБУ представляют собой дорогостоящие изделия, любые отказы конструкций которых могут привести к пагубным последствиям, вплоть до катастрофических. По данным мировой статистики, СПБУ особенно уязвимы в отношении внешней среды. Проблематичность вопроса, расширение географии использования СПБУ, относительно малый опыт эксплуатации требуют постоянного внесения изменений и уточнений в правила классификационных обществ, что вызывает их регулярное переиздание и переосмысление.

Положение осложняется необходимостью обеспечить высокую надежность СПБУ с учетом экономии материальных затрат и, в частности, снижения металлоемкости их конструкций, ибо неоправданный расход материала чреват значительным удорожанием установок.

СПБУ примерно 90-95% времени эксплуатации расположены на точке бурения. Этот режим служит определяющим для назначения размеров связей. Все другие ситуации: транспорти-

ровка, задавливание опорных колонн в грунт и извлечение их из грунта, силовое воздействие отдельных ледяных полей - рассматриваются как проверочные, и их анализ приводит к системе ограничений на эволюции СПБУ и необходимости выполнения некоторых конструктивно-организационных мероприятий. Для исключения неоправданно жестких ограничений, снижающих эксплуатационные возможности установок, тем более необходимо иметь в наличии адекватную методику расчета прочности конструкций СПБУ в заданных ветро-волновых условиях.

Такая методика (Lit-1) была в свое время создана и послужила основой соответствующего раздела правил РС [1]. Тогда была получена связанная система оценок экстремальных реакций СПБУ при совместной реализации случайных воздействий в виде ветра, волнения, течения. Она позволяла привести в соответствие расчетные величины реакций с их обеспеченностью. Кроме того, разработанная статистическая модель давала основу для оценок усталостной прочности конструкций.

Однако принятие ряда упрощающих допущений в расчетной схеме определенным образом искажали физическую сторону явления и давали основание рассматривать методику Lit-1 как методику 1-го поколения. Настоящая работа посвящена нововведениям в области расчетных оценок реакций СПБУ на ветро-волновые воздействия и перспективам их включения после доработки в правила РС.

Методика 2-го поколения имеет две модификации: Leg-1 и Leg-2.

### **1 Методика Leg-1**

Подобно методике 1-го поколения методика Leg-1 включает два этапа расчета:

1. Определение нагрузок, действующих на СПБУ от волнения, течения и ветра. В этой части используется программа, написанная на языке Visual Basic for Application (Excel).

2. Создание конечно-элементной модели опоры, приложение к ней полученных нагрузок и расчет напряженно-деформированного состояния опоры.

Методика основывается на детерминистическом подходе к описанию волнения. Волновая нагрузка рассматривается как регулярная с заданной высотой волны и с периодом, равным среднему периоду волнения.

В качестве исходных данных для расчета волновой нагрузки применяются:

- высота волны столетнего шторма с обеспеченностью 1%;
- средний период волнения;
- длина волны.

Методика позволяет рассчитать ординаты эпюр скоростей и ускорений орбитального движения частиц воды и возникающие при этом волновые нагрузки с использованием волновых теорий Эри, Стокса 2-го порядка и Стокса 5-го порядка.

Для определения нагрузок на опоры от волнения и течения в программе расчета используется метод численного интегрирования по смоченной длине опоры (глубине воды).

Метод численного интегрирования позволяет учесть ряд важных эффектов, которые невозможно учесть при аналитическом решении.

К ним относятся:

- возможность трансформации эпюры скоростей и ускорений и приведение их от центра к соответствующим точкам орбит движения частиц;
- корректный учет волновых нагрузок в зоне переменной ватерлинии опоры;
- возможность сложения эпюр скоростей волнового воздействия и течения по глубине воды.

Общая волновая нагрузка на СБПУ в каждый момент времени определяется как сумма нагрузок на каждую опору. Эти нагрузки определяются с учетом сдвига фаз волнового воздействия на каждую опору по лучу распространения волны.

В программе осуществляется поиск максимального значения по следующим критериям:

- общей суммарной нагрузки от волнения, течения и ветра;
- опрокидывающего момента на СБПУ от волнения, течения и ветра;
- дополнительной вертикальной реакции на опору от действия опрокидывающего момента от внешних сил.

Поиск максимального значения осуществляется путем перебора по направлению действия ветра, бега волн и начальному сдвигу фазы.

Учитывая малую вероятность совпадения максимальных значений ветровой и волновой нагрузки как по величине, так и по направлению, понижающий коэффициент 0,8 вводится на

волновую или на ветровую нагрузку, в зависимости от того, которая из них меньше.

Помимо поиска максимального значения, программа позволяет определить значения вышеперечисленных нагрузок для выбранных пользователем конкретных значений угла и сдвига фазы.

Основываясь на теории расчета рам, принимается, что внутренние усилия в расчетной раме от ветро-волновой нагрузки, действующей на СПБУ (поперечные усилия и изгибающие моменты), распределяются между опорами равномерно. При этом с учетом коэффициента заделки опоры в грунт на основании формул, приведенных в [1], определяется момент в заделке рамы и момент на пяте опоры.

Далее, на 2-м этапе расчета, аналогично предыдущей методике эти нагрузки прикладываются к конечно-элементной модели опоры, и производится расчет ее напряженно деформированного состояния. Учитывая, что направление действия ветра и волнения является переменным, расчет выполняется для нескольких (обычно, для шести) направлений вектора горизонтальной нагрузки.

## **2 Методика Leg-2**

Методика основывается на использовании программного комплекса (ПК) Ansys. В ПК Ansys имеется конечный элемент Pipe 288, который на основании заданных внешних условий (высоты и периода волны, скорости течения и ряда других параметров) позволяет определить нагрузки от волнения и течения, действующие на отдельный трубчатый элемент и на трубчатую конструкцию в целом.

При разработке конечно-элементной модели СПБУ принято во внимание следующее.

1. В случае, если хорда опоры имеет форму, отличную от трубы, то в зоне действия волновых нагрузок она заменяется эквивалентным по прочности и гидродинамическим характеристикам сечением трубчатой формы. В наиболее нагруженных зонах опоры (верхняя часть опоры в зоне взаимодействия с корпусом и нижняя часть в зоне соединения с башмаком) должны моделироваться исходя из реальных сечений хорд.

2. Корпус может моделироваться достаточно схематично, (палуба и основные переборки) с тем, чтобы обеспечить реалистическую жесткость корпуса на изгиб и кручение.

3. Необходимо реалистично смоделировать взаимодействие опоры и корпуса (портала). Как правило, этого можно достигнуть за счет введения специальных элементов связи, моделирующих направление передачи реакций и жесткость горизонтальных и вертикальных связей (например, упругое закрепление опоры в корпусе с помощью амортизаторов или жесткое закрепление устройствами типа "rack chock").

4. Необходимо реалистично смоделировать взаимодействие башмака опоры с грунтом.

В качестве основных исходных данных для расчета нагрузок от волнения и течения задаются:

- высота, период, направление, фаза и длина волны. Может задаваться одновременное действие до 10 гармоник;

- скорость и направление течения. Может задаваться рельеф из 8 ярусов течения по глубине;

- характер взаимодействия волнения и течения (сжатие, растяжение или постоянство профиля течения в районе гребня волны);

- волновая теория, в качестве которой может быть выбрана:
  - теория волн малой амплитуды с эмпирической модификацией;
  - теория волн малой амплитуды Эри без эмпирической модификации;

- теория волн Стокса 5-го порядка;

- теория волн функции тока (stream function);

- ряд других современных волновых теорий.

Для определения максимального значения действующих напряжений в опорных колоннах расчет выполняется методом перебора по направлению волны и начальному сдвигу фазы. Перебор и выбор максимального значения напряжений, реакций, усилий в соединительных элементах осуществляется в цикле с помощью специально разработанного макроса. Предусмотрена возможность введения «весовых коэффициентов» для основных составляющих общей нагрузки: волновой, ветровой, весовой. В общем случае, учитывая малую вероятность совпадения максимальных значений ветровой и волновой нагрузки как по величине, так и по направлению, понижающий коэффициент 0,8 вводится на волновую или на ветровую нагрузку, в зависимости от того, которая из них меньше.

### 3 Анализ взаимосвязи результатов на основании вероятностного и детерминистического подходов на примере ветровой нагрузки

Авторы не ставили целью в краткой статье представить методики во всех их конкретных приложениях. В то же время, они считали необходимым продемонстрировать, несмотря на ряд отличий, прежде всего преемственность результатов и их соотношение с методиками, применяемыми другими ведущими классификационными обществами.

Покажем на конкретном примере, а именно ветровой нагрузки, взаимосвязь вероятностной и детерминистической постановок. Ветровая нагрузка сама по себе может быть соизмеримой для СПБУ с волновой, а опрокидывающий момент, создаваемый ею благодаря существенно большему плечу, тем более должен быть объектом пристального внимания.

Любопытно, что правила DNV, являющиеся реперной точкой для верификации методик Leg-1 и Leg-2, содержат две альтернативные рекомендации по определению ветровых нагрузок: детерминистическую и вероятностную. Поэтому вкратце рассмотрим весь ансамбль, связанный с оценкой именно ветровых нагрузок на СПБУ.

Известно, что ветровая нагрузка состоит из статического напора и пульсационной составляющей. Статический напор ветра ( $\bar{Q}_w$ ) определяется по традиционной формуле

$$\bar{Q}_w = \frac{1}{2} \rho \bar{W}^2 C_w S_n,$$

где  $S_n$  - площадь парусности установки;

$C_w$  - обобщенный коэффициент, зависящий от  $w$  - средней скорости ветра на высоте анемометра.

Динамическая составляющая нагрузки от ветра может достичь значимой величины, равной статической составляющей. Согласно правилам Регистра [1], амплитуда пульсационной составляющей ветровой нагрузки распределена в соответствии с экспоненциальным законом с параметром масштаба

$$a_w = 0,85 \sigma_Q,$$

где  $\sigma_Q$  - стандартное отклонение ординат ветровой нагрузки,

$$\sigma_Q = 2K_w \eta \vartheta_w \bar{Q},$$

здесь  $K_w$  - коэффициент динамичности ветровых пульсаций, для нашего случая

$$K_w \approx 2,2;$$

$\eta$  - коэффициент несинхронности ветровых пульсаций;  
 $\vartheta_w$  - коэффициент изменчивости ветровых пульсаций,  $\vartheta_w = 2,45\sqrt{K_{лс}}$ ,  
 $K_{лс}$  - коэффициент лобового сопротивления подстилающей поверхности,  
 $K_{лс} \approx 3,5 \times 10^{-3}$  для скорости  $w \approx 30$  м/с.

Небезынтересно отметить, что в правилах DNV также рассматривается пульсационная составляющая ветровой нагрузки. Согласно правилам DNV [2], эта составляющая определяется на базе следующей записи ветровых давлений:

$$q = \frac{1}{2} \rho |V_z + U - \dot{x}| (V_z + U - \dot{x}),$$

где  $V_z$  - средняя скорость ветра;  
 $U$  - скорость порывов;  
 $\dot{x}$  - мгновенная скорость конструктивного элемента.

В правилах DNV подчеркивается, что при расчетах в частотном диапазоне допустима статистическая линеаризация предыдущего выражения, что приводит при пренебрежимо малых значениях  $\dot{x}$  к записи

$$q = \frac{1}{2} \rho V_z^2 + \rho V_z U.$$

Общая ветровая нагрузка (статическая плюс динамическая) определяется как

$$Q_w = \bar{Q}_w + \gamma \sigma_Q(f),$$

где  $\bar{Q}_w$  - статическая реакция, вызванная расчетной средней скоростью ветра;  
 $\sigma_Q(f)$  - стандартное отклонение динамической реакции;  
 $\gamma$  - коэффициент амплитуды ветровой реакции (число стандартов ветровой реакции).

Несколько проливает свет на определение величины, точнее, на ее сходимость с рекомендацией Регистра, анализ исходного спектра, принятого в тех или иных методиках. Напомним, в правилах Регистра [1] рекомендуется использовать спектр продольных пульсаций Давенпорта:

$$S(f) = \frac{4K_{лс} \bar{w}_{10}^2 n^2}{f(1+n^2)^{4/3}},$$

где  $f$  - частота, Гц;  
 $n = 1200f/\bar{w}_{10}$ ;  
 $K_{лс}$  - коэффициент лобового сопротивления подстилающей поверхности.

DNV в [2] рекомендует спектр ветровых пульсаций в форме

$$fS(f) = 4K_{лс}w^2 \frac{\tilde{f}}{(2+\tilde{f}^2)^{5/6}}, \quad (1)$$

где  $f$  - частота, Гц;  
 $\tilde{f}$  - безразмерная частота,  $\tilde{f} = f \cdot 1800/w$ ;  
 $L$  - масштабный размер, м;  
 $K_{лс}$  - коэффициент лобового сопротивления;  
 $w$  - средняя скорость ветра, м/с.

Преобразование спектра Давенпорта к форме спектра Гарриса

$$fS(f) = \frac{4K_{лс}w^2\tilde{f}}{(2+\tilde{f}^2)^{5/6}}$$

позволяет заметить практическое совпадение спектров в осях  $fS(f)/4K_{лс}w^2$  и  $\tilde{f}$ . Это совпадение оказывается более чем удобным при практических приложениях. Дело в том, что «норвежский» интеграл не берется в квадратурах, а «регистровский» позволяет это делать, причем все необходимые действия уже произведены и результаты представлены в правилах Регистра. Это касается, прежде всего, дисперсии пульсаций скоростей ветра, коэффициентов динамичности ветровых нагрузок и др.

Так, максимум спектра Давенпорта приходится на круговую частоту

$$\omega_{max} = 4 \times 10^{-3} \bar{w}_{10},$$

где  $\bar{w}_{10}$  измеряется в м/с.

Дисперсия ординат пульсаций ветра равна

$$\sigma_{ww}^2 = 6K_{лс}w_{10}^2.$$

Несмотря на все сходство спектров Давенпорта и Гарриса, определенное различие все же имеется. Дело в том, что приведенный параметр спектра  $\tilde{f}$  содержит в своем составе величину  $L$  - масштабный размер. В спектре Давенпорта величина  $L$  принята равной 1200 м, в спектре Гарриса величина  $L$  соответствует 1800 м.

Из выходных характеристик от величины  $L$  зависит значение  $\omega_{max}$ , что означает зависимость от  $L$  коэффициента динамичности.

В принципе,  $\omega_{max} = \frac{4,8}{L} \bar{w}_{10}$ .

Таким образом, при пересчете со спектра Давенпорта

$$(\omega_{max})_{DNV} \approx 2,67 \times 10^{-3} \cdot \bar{w}_{10}.$$

С другой стороны, прямое нахождение максимума спектра Гарриса, записанного в форме (1), дает следующий результат:

$$\tilde{f} = 1800f / \bar{w}_{10} = \sqrt{3}.$$

(К сожалению, аналитически получить более нужное нам среднее значение не представляется возможным).

Отсюда и определяется частота  $f_{max} = \sqrt{3} \cdot \bar{w}_{10} / 1800$ , которую, в конце концов, и можно использовать в усталостных расчетах.

Известно, что сравнение результатов расчетов с использованием вероятностных методов и на детерминистической основе является неблагодарной задачей, поскольку не существует однозначных критериев. Тем не менее, предпримем такую попытку.

Поскольку в качестве расчетной скорости ветра в методиках Leg-1 и Leg-2 принимается скорость ветра с осреднением 1 минута без учета динамичности его действия, при наличии статистической модели ветрового воздействия можно было бы адекватно определить точность попадания этой рекомендации в вероятностную схему. В правилах Регистра [1] (часть II «Корпус», разд. 2, 2.2.2.3) связь между максимальной  $w_{max}$  и средней  $\bar{w}$  скоростями ветра задается с помощью коэффициента порывистости  $G$ :

$$w_{max} = G\bar{w} = (1 + \gamma \vartheta_w) \bar{w}.$$

Здесь  $\vartheta_w$  - коэффициент изменчивости скорости ветра,  $\vartheta_w = 2,45 \sqrt{K_{лс}}$ , который в этих условиях равен ( $\gamma = 2,58$  согласно табл. 2.2.2.3 в указанном выше пункте правил [1] при рекомендации продолжительности максимального порыва  $n=3$ ;  $K_{лс} = 3,5 \times 10^{-3}$  согласно табл. 2.2.4-1 там же);

$$G = 1 + 2,58 \cdot 2,45 \sqrt{3,5 \times 10^{-3}} = 1,38,$$

что можно считать определенной рекомендацией при переходе от вероятностной к детерминистической модели.

Учитывая малую вероятность совпадения максимальных значений ветровой и волновой нагрузки как по величине, так и по направлению, вводится понижающий коэффициент 0,8 (является верхней оценкой при такого рода презентации результатов) на волновую или на ветровую нагрузку, в зависимости от того, какая из них меньше.

### **Выводы**

Возможное неполное совпадение уровня результатов по методикам Lit-1, Leg-1 и Leg-2 можно объяснить вышеприведенными рассуждениями относительно взаимосвязи вероятностных и детерминистических методов расчета. Запрос

сегодняшнего дня на второе дыхание детерминистических методов, дающих возможность более подробно изучить реакции СПБУ на ветро-волновые воздействия, позволяет говорить о гипотетическом внедрении в качестве альтернативы детерминистической методики (когда существуют так называемые волна и ветер заказчика) в правила Регистра. В связи с этим целесообразно поставить вопрос о развитии соответствующих разделов правил РС в части внешних условий, внешних сил, воздействующих на СПБУ, внутренних усилий, допускаемых напряжений, устойчивости на грунте.

### *Список литературы*

1. Правила классификации, постройки и оборудования плавучих буровых установок и морских стационарных платформ. – СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2012.
2. Classification Notes No.30.5 Environmental Conditions and Environmental Loads. Det Norske Veritas, March 2000.

## Защита окружающей среды

---

УДК – 629.543

**В.Г. Макаров**, д-р техн. наук., проф., СПбГМТУ

**В.С. Никитин**, д-р техн. наук., проф., СевмашВТУЗ

**И.А. Жмойда**, ОАО «ЦКБМТ «Рубин»

## ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ И ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ЭКСПЛУАТАЦИИ ТАНКЕРОВ

*Ключевые слова:* танкер, защита окружающей среды, аварийные разливы нефти, экологическая безопасность, столкновения, пожары, разлом корпуса, посадка на мель, статистика аварий

### Введение

В настоящее время все большее влияние на развитие танкерного флота оказывают весьма жесткие требования безопасности судоходства и защиты окружающей среды. Они сформулированы в виде международных конвенций, кодексов, резолюций, правил, руководств, дополнений и поправок к ним [10] и продиктованы многочисленными случаями загрязнений окружающей среды, тяжелыми последствиями аварий и катастроф при эксплуатации танкеров.

Количество потребляемых на одного человека энергоресурсов является одним из основных критериев оценки развитости государства и социального благополучия его населения. Последнее десятилетие характеризуется неуклонным ростом потребления энергоресурсов. В промышленно развитых странах Европы прирост потребления энергии за этот период составил 13%, а в Японии достиг 20%. Основную роль в энергетическом балансе промышленно развитых стран играет нефть. В странах Западной Европы ее доля составляет 50-60%, а в Японии доходит до 70%. Ожидается, что в обозримом будущем роль нефти как основного источника энергии сохранится.

Неравномерность распределения нефтяных месторождений на поверхности земли, удаленность их расположения от

непосредственных потребителей требуют развития транспортных средств для перевозки нефти. В настоящее время около 50% всей добываемой нефти перевозится морским путем с использованием танкеров. Развитию танкерного флота способствует широкое освоение добычи нефти на шельфах морей, интенсивность которого в пять раз превышает темпы разработки сухопутных месторождений. Ряд стран, например, Норвегия, Великобритания, Нидерланды полностью удовлетворяют свои потребности в нефти за счет морских промыслов. Россия по добыче нефти занимает второе место в мире (после Саудовской Аравии). Промышленная нефтедобыча освоена на шельфе Сахалина, в ближайшем будущем войдут в эксплуатацию месторождения на шельфе арктических морей. В перспективе ожидается рост перевозок нефти и нефтепродуктов из России в Западную Европу, США и Японию.

Танкеры являются судами повышенной экологической опасности. В то же время нефтяные терминалы в различных портах мира размещаются, как правило, в густонаселенных районах с хорошо развитой береговой инфраструктурой. Поэтому при эксплуатации танкеров необходимо обеспечить все возможные мероприятия по предупреждению экологического ущерба, наносимого как морской среде, так и прибрежной полосе.

## **1 Основные источники и виды загрязнений окружающей среды при эксплуатации танкеров**

Основными источниками загрязнения окружающей среды при эксплуатации танкеров являются перевозимые нефтегрузы, судовые энергетические установки (СЭУ) и вспомогательные механизмы, а также люди, находящиеся на борту судна (рис. 1).

Из рис.1 видно, что танкеру, как и любому другому судну, свойственны загрязнения окружающей среды, вызванные эксплуатацией главной СЭУ и вспомогательных механизмов, а также загрязнения, образующиеся в процессе жизнедеятельности членов экипажа.

СЭУ и вспомогательные механизмы служат источником образования нефтесодержащих вод, нефтеостатков, паров и газов, оказывающих воздействие на морскую (гидросфера) и воздушную (атмосфера) среды. Борьба с этими видами загрязнений на танкерах ведется теми же методами, что и на

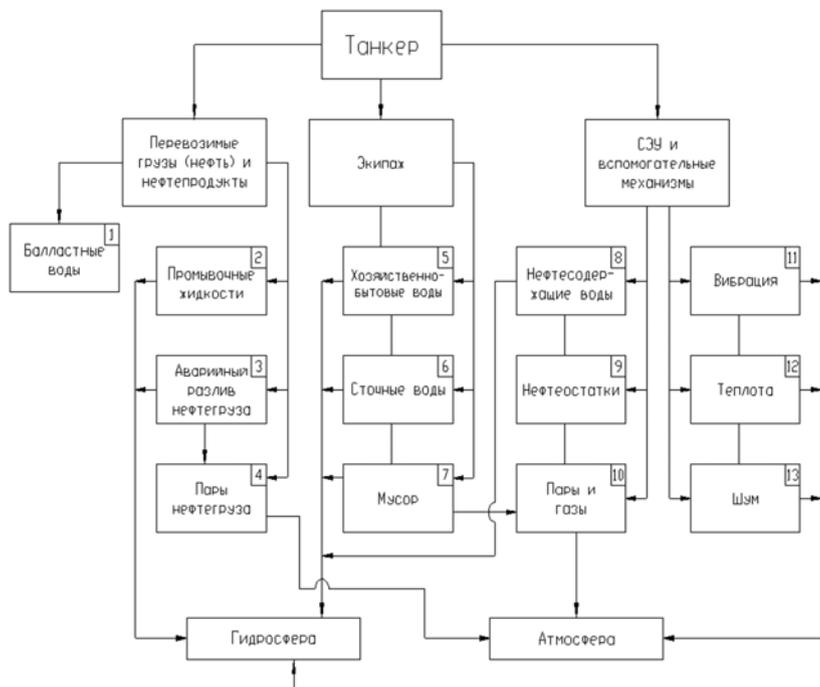


Рис. 1

Связь между источниками и видами загрязнений и объектами воздействия на окружающую среду при эксплуатации танкеров

обычных судах. Например, для очистки нефтесодержащих вод используются сепарационные установки гравитационного, физико-химического (флотация, коалесценция, адсорбция) и химического (озонирование) [2, 9], а также биохимического принципов действия или их комбинации. При этом более высокая степень очистки требует использования более сложных и дорогостоящих установок [6, 11]. Нефтеостатки сдаются в плавучие или береговые сборщики, а после обезвоживания могут использоваться в качестве вторичного топлива, например, в инсинераторах.

Основным типом СЭУ на танкерах является дизель. Выхлопные (отработавшие) газы дизелей являются весьма существенным

видом загрязнения атмосферы. Они имеют достаточно сложный состав, и вредное воздействие отдельных их компонентов весьма различно. Наиболее токсичными являются окислы азота и серы, окись углерода, бензопирен и альдегиды. Подробное рассмотрение факторов, влияющих на состав выхлопных газов, а также мероприятий, направленных на снижение содержания вредных веществ в отработавших газах дизелей отражено в [5]. Допустимые нормы выброса окислов в атмосферу установлены приложением VI к Международной конвенции по предотвращению загрязнения с судов (МК МАРПОЛ 73/78). Согласно этим нормам, в последние годы изменены правила ведущих классификационных обществ в части требований к судовым двигателям. Они должны иметь сертификат классификационного общества на соответствие этим требованиям.

Основной проблемой для морского дизелестроения является обеспечение требований низкого содержания окислов азота и серы в выхлопных газах, так как во многих зарубежных портах уже сейчас осуществляется жесткий анализ состава отработавших газов и определение концентрации содержащихся в них вредных веществ.

В настоящее время для снижения загрязнения атмосферы перспективным направлением в судовом двигателестроении является использование в качестве топлива природного газа. Такие двигатели можно разделить на две основные группы: дизели с высоким давлением впрыска газа и двигатели Отто. Газовые дизельные двигатели разрабатываются для высоких и средних эффективных давлений и для двигателей с диаметром цилиндра 300 мм и более. Нечувствительность к составу газа является большим преимуществом таких двигателей. В мире существует уже более 150 судов, не являющихся газовозами, с газовыми двигателями и, как предполагается, их количество в ближайшие годы будет расти. Российский морской регистр судоходства разрабатывает сейчас требования к постройке судов с газовыми двигателями, которые будут включены в правила Регистра. Одним из перспективных типов таких судов считаются танкеры.

В процессе жизнедеятельности членов экипажа танкера, при обеспечении их санитарно-гигиенических потребностей образуется определенное количество сточных и хозяйственно-бытовых вод, а

также некоторое количество твердого мусора (см. рис. 1), которые не должны попадать в окружающую среду без предварительной обработки. На отечественных танкерах сточные и хозяйственно-бытовые воды перед сбросом за борт подвергаются обработке в судовых установках биологического (биохимического) или физико-химического (электрохимического) принципов действия [3, 9]. Следует отметить, что санитарные нормы ряда зарубежных стран требуют очистки только лишь сточных вод, а хозяйственно-бытовые воды сбрасываются за борт без обработки. Твердый мусор сжигается на борту судна в инсинераторах.

Однако самым главным источником загрязнения окружающей среды при эксплуатации танкеров является перевозимый груз: сырая нефть и продукты ее переработки (см. рис. 1). В процессе погрузо-разгрузочных операций и непосредственно при транспортировке часть нефтегруза испаряется и удаляется с помощью системы газоотвода. После выгрузки нефти или нефтепродуктов на внутренних поверхностях корпусных конструкций остается некоторое количество затвердевших остатков груза, которые удаляются системой мойки танков; в результате образуется промывочные воды с большим нефтесодержанием. Тяжелые пары углеводородов могут опускаться на внешние конструкции танкера и при плохой вентиляции набегаящими потоками ветра расстилаться по верхней палубе, надстройкам, рубкам, проникать через отверстия, иллюминаторы, воздухозаборники во внутренние помещения и создавать взрывоопасные концентрации газовой смеси.

Наиболее опасны аварии танкеров, сопровождающиеся разрушением корпусных конструкций и выливом нефтегруза, что способно вызывать настоящие экологические катастрофы. Количество возможного вылива нефтегруза увеличивается с ростом дедвейта танкеров. Согласно мировой практике типы танкеров по дедвейту подразделяются следующим образом [7]:

- Supertanker – 30 – 70 тыс. т,
- Aframax – 40 – 80 тыс. т,
- Panamax – 80 тыс. т,
- Mammathtanker – 70 – 150 тыс. т,
- Suezmax – 80 – 160 тыс. т,
- VLCC – 150 – 300 тыс. т,

ULCC – 300 – 800 тыс. т,

Megatanker – 1 млн. т

(VLCC – very large crude carrier – очень большой перевозчик сырья; ULCC – ultra large crude carrier – ультра большой перевозчик сырья).

В 1972 г. был построен танкер «Ниссеки Мару» дедвейтом 373 тыс. т, а в феврале 1973 г. вступил в строй танкер «Глобтик Токио» дедвейтом 483 тыс. т. Серия танкеров дедвейтом около 550 тыс. т типа «Батиллус» была построена во второй половине 70-х годов XX века во Франции. В эти же годы японская компания «Глобтик Танкер» вела переговоры о постройке танкеров дедвейтом 600 тыс.т с атомной энергетической установкой и 700 тыс. т с паротурбинной установкой. Был разработан проект танкера дедвейтом 1 млн.т [8]. В связи с кризисом танкеры дедвейтом 300 тыс. т и более начиная с 1981 г. перестали строить.

В настоящее время наибольшую востребованность имеют танкеры типа "Aframax" и "Suezmax". В первом десятилетии XXI века ОАО «Совкомфлот» заказало строительство серии танкеров типа "Aframax". ОАО «Приморское морское пароходство» активно эксплуатирует и продолжает заказывать судостроительной верфи "Hyundai Heavy Industries" (Южная Корея) танкеры – стотысячники. Китайская верфь "Bohai Shipbuilding Heavy Industry" построила в эти годы серию танкеров дедвейтом 150 тыс. т. Южная Корея получила заказы на танкеры типа VLCC дедвейтом 200 – 300 тыс. т.

## **2 Статистика аварий танкеров**

### **2.1 Причины аварий**

Согласно статистике, основными причинами аварий и катастроф танкеров являются последствия штормов, столкновения, взрывы и пожары, посадки на мель, проведение ремонтных работ в районе грузовых зон, неполадки в машинном помещении и др. (рис. 2). Аварии и катастрофы танкеров по сравнению с другими типами судов имеют значительно более тяжелые последствия, связанные с гибелью судна, человеческими жертвами, разливами нефтегрузов. Приоритетный ряд опасностей для танкеров может быть представлен следующим образом: взрыв – пожар – разламывание корпуса – потери остойчивости или плавучести (затопление). Чем больше размеры танкеров, тем левее в этом ряду смещается разламывание корпуса.

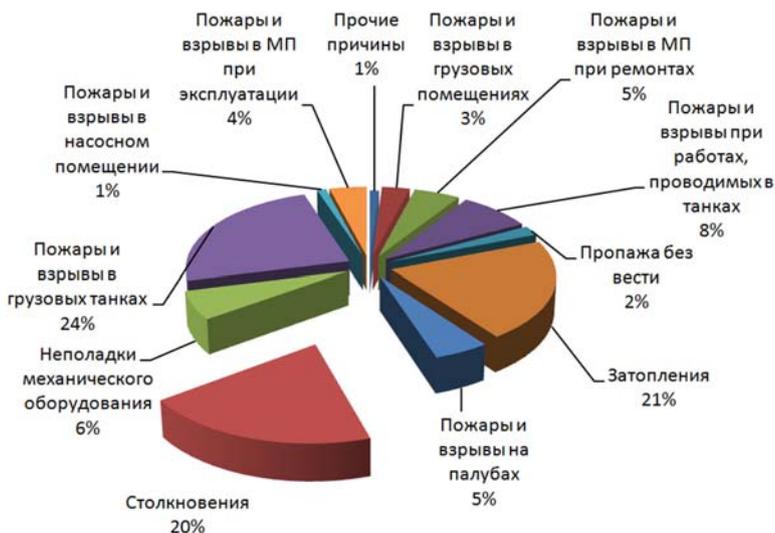


Рис. 2  
Причины аварий танкеров, последствиями которых явился вывод их из эксплуатации

Существующая статистика аварий не знает случаев опрокидывания танкеров из-за потери остойчивости, что обусловлено особенностями их конструкции, соотношением главных размерений и условиями эксплуатации. Танкер – наливное судно, предназначенное для перевозки жидких грузов, имеющих так называемую свободную поверхность, значительно влияющую на остойчивость судна, что выражается известными из теории корабля зависимостями:

$$Sh = -i_x/V; i_x = k \times l \times b^3,$$

где  $i_x$  – момент инерции площади свободной поверхности жидкости в отсеке,  $m^4$ ;  
 $V$  – объемное водоизмещение судна,  $m^3$ ;  
 $k$  – коэффициент формы площади свободной поверхности жидкости в отсеке;  
 $l$  – длина отсека, м;  
 $b$  – ширина отсека, м.

Если площадь свободной поверхности жидкости в отсеке достигает 80–90% от площади действующей ватерлинии, то танкер неминуемо опрокинется из-за потери остойчивости. Чтобы избежать этого, в танках устанавливаются продольные водонепроницаемые переборки, квадратично уменьшающие влияние свободной поверхности жидкого груза. Тогда потеря остойчивости от наличия свободной поверхности будет:

$$Sh = -i_x / (V \times (n - 1)^2),$$

где  $n$  – количество продольных водонепроницаемых переборок.

Расчеты показывают, что вероятность гибели танкера из-за потери остойчивости весьма незначительна при любых повреждениях корпуса. Теоретически танкер может погибнуть (затонуть) из-за потери плавучести при затоплении машинного помещения. Однако статистический анализ повреждений корпуса танкера позволил установить закономерность распределения местоположения пробоин по длине судна в результате аварий, которая показывает, что при кормовом расположении машинного помещения вероятность получения пробоины в его районе в 5 – 6 раз меньше, чем в носовой части при столкновениях и в 3 – 4 раза меньше при посадках на грунт. Поэтому конечные значения вероятностей получения пробоины в районе машинного помещения весьма незначительны, отсюда происходит и назначение величины минимального надводного борта танкера. Таким образом, конструктивной защитой от затопления машинного помещения танкера при столкновениях является смещение его в корму и уменьшение размеров до минимально допустимых, а при посадках на грунт или другие препятствия роль защиты принимает на себя двойное дно, которое, согласно МК МАРПОЛ–73/78 должно проходить по всей длине судна. При эксплуатации танкеров подавляющее большинство пробоин появляется при столкновении или посадке на мель, что часто сопровождается разливами нефтегруза.

## 2.2 Посадка на мель

Первым серьезным предупреждением об опасности для экологии при эксплуатации танкеров послужила авария и гибель танкера «Торри Каньон» ("Torrey Canyon") дедвейтом 120 тыс. т у берегов Великобритании. Следуя с грузом сырой нефти через Ла-Манш, танкер в марте 1967 г. наскочил на подводную скалу. Из

18 грузовых танков судна 14 были разорваны подводными камнями. В днище танкера скала вонзилась на глубину 5 с лишним метров. Из чрева танкера полуметровым слоем растеклось по морю 119 тыс. т нефти. На площади более одного квадратного километра пылало море. Двухсоткилометровый пляж Британской Ривьеры и 65 км побережья Бретани были отравлены нефтью. Ущерб составил 5 млн фунтов стерлингов.

Катастрофой века называют аварию танкера «Амоко Кадис» ("Amoco Cadiz") в 1978 г., вызвавшего гигантское загрязнение морской среды: около 230 тыс. т вылившейся нефти образовали пятно площадью 3,5 тыс. км<sup>2</sup>. Причиной аварии послужило вышедшее из строя рулевое управление. Судно стало дрейфовать, а штормовая погода мешала проведению спасательных операций. Танкер был выброшен на скалы о. Уэссан и переломился на две части. Эффективных средств, ограничивающих разлив нефти, не было, и судно уничтожили, проведя две бомбардировки с вертолетов ВМС и взорвав с помощью водолазов танки. При этом примерно 1/3 нефти испарилась, около 1/3 рассеялось в море, а около 70 тыс. т нефти было выброшено на побережье Франции, загрязнив его на протяжении 363 км.

В 1981 г. при выходе из порта Клайпеда во время шторма сел на камни у Северного мола английский танкер «Глоуб Ассими» с грузом мазута 16,5 тыс. т и запасом топлива (моторного 180 т и дизельного – 50 т). Весь груз и топливо вылились в воду, загрязнив акваторию порта на площади около 140 тыс. км<sup>2</sup>, воды Куршского залива на протяжении 60 км, а позднее побережье севернее порта Клайпеда протяженностью более 130 км.

К наиболее значительным экологическим последствиям за всю историю США привела посадка на мель у берегов Аляски танкера "Exxon Valdez" в 1989 г. (вылилось около 37 тыс. т нефти). В 1993 г. у побережья Шотландии из-за потери хода сел на мель танкер "Baer" (вылилось более 86 тыс. т нефти).

Но не только выход из строя оборудования и сложные погодные условия могут стать причиной аварий и катастроф. Так, 1 января 2003 г. турецкий танкер "Viky" врезался в верхнюю часть почти полностью скрытого под водой норвежского паромы «Трикопор», затонувшего в Ла-Манше близ французского порта Дюнкерк. Танкер получил повреждения, через которые стало разливаться

дизельное топливо. На борту танкера имелся груз – 70 тыс. т очень огнеопасного керосина. Благодаря двойному корпусу груз не пострадал, и танкер, хоть с большой осадкой, остался на плаву. «Триколор» был обозначен специальной сигнализацией, а французское патрульное судно подавало предупредительные сигналы турецкому танкеру, но по неизвестным причинам "Viky" не сумел избежать столкновения. Причина инцидента была объяснена человеческим фактором.

### 2.3 Столкновения, пожары и взрывы

Повышение интенсивности судоходства, высокие скорости судов, ограниченность портовых акваторий способствуют увеличению количества столкновений танкеров. Так, 15 июля 2010 г. произошло столкновение танкеров Мурманского морского пароходства «Варзуга» и «Индига», перевозивших по Северному морскому пути под проводкой атомных ледоколов «Россия» и «Таймыр» около 80 тыс.т нефтепродуктов из Мурманска на Чукотку в рамках северного завоза. «Индига» получила повреждение в кормовой части, правда, разлива нефтепродуктов не произошло [13].

Однако чаще всего столкновения танкеров приводят к образованию пробоин, выливу нефтегруза, пожарам и взрывам. В 2007 г. танкер «Хэбей Спирит» ("Hebei Spirit") потерпел аварию в Желтом море, столкнувшись с плавучим краном в десяти километрах от берега Южной Кореи к северо-западу от порта Малипхо. Танкер, способный перевозить до 146 тыс.т нефти, получил пробоины в трех танках, и из него вылилось в море порядка 15 тыс.т сырой нефти. Через сутки нефтяное пятно достигло берега. Для сдерживания распространения нефти по границе пятна были установлены специальные боновые ограждения, в месте разлива разбрызгивались реагенты, однако остановить расползание пятна мешали высокие волны и сильный ветер. Ущерб от вылившейся нефти составил несколько сот миллионов долларов. Ранее, в 1995 г., в этом же районе потерпел аварию танкер «Морской принц» ("Sea Prince"), из которого вылилось более 5 тыс.т нефти. Ущерб - почти 100 млн. долларов, около 27 млн. ушло на устранение последствий аварии.

Особую опасность представляет возгорание вылившейся нефти. Растекаясь по поверхности воды, она продолжает гореть. Так, в результате столкновения нефтегазовоза «Yuco Mary № 10» валовой вместимостью 43,7 тыс. рег. т с либерийским балкером

"Pasific Arears" дедвейтом 16 тыс. т возникли пожар и взрыв в носовой части японского судна. Взрыв сопровождался выбросом дыма и пламени на высоту до 400 м. Погибли 30 человек.

Трагедией обернулось столкновение у мыса Берген вблизи нью-йоркской гавани американского танкера «Техако Массачусетс» дедвейтом 16,5 тыс. т и английского – «Альва Кэйп» дедвейтом 11,3 тыс. т. Первый танкер вел дизельный буксир «Латин Америкэн», а второй – сопровождал дизельный буксир «Эхо Вермонт». Носовая оконечность «Техако Массачусетс» ударила в танк №1 правого борта «Альва Кэйп» и вошла в него на 3,5 м. Из пробоины английского танкера хлынула нефть и растеклась по поверхности воды, над которой образовалась смесь водяных паров, паров нефти и воздуха. Работающий дизель буксира «Латин Америкэн» начал засасывать вместе с воздухом пары нефти, что привело к взрыву в его машинном помещении, от которого воспламенилась нефть за бортом. Вслед за этим произошел взрыв на танкере «Альва Кэйп». На акватории образовался огромный костер из четырех горящих судов и разлившейся нефти. Погибло 27 человек, 14 получили тяжелые травмы.

В июле 1979 г. в Карибском море у берегов о. Табаго столкнулись два супертанкера – либерийский «Эйджен Кэптен» ("Aegean Captain") и греческий «Атлантик Эмпресс» ("Atlantic Empress"). Наполненные нефтью суда загорелись. Вылилось 287 тыс. т сырой нефти. Горящее пятно нефти растеклось на десятки квадратных километров, а всего же нефть разлилась по поверхности 120 км<sup>2</sup>, угрожая нанести непоправимый ущерб богатому рыбой району. Погибли 26 моряков. В ноябре того же года в Босфоре на акватории порта Стамбул столкновение румынского танкера «Индепенденц» с греческим сухогрузом «Эльвира» не только явилось катастрофой для самих судов, акватории и территории турецкого порта, но и нанесло ущерб международному судоходству, прервав на длительный срок перевозки по Босфору. Погибли 43 румынских моряка. Борьба с пожаром длилась почти месяц.

Следует отметить, что ущерб от аварий и катастроф не всегда зависит напрямую от количества вылившейся нефти или нефтепродуктов. При аварии танкера "Еххон Valder" в море попало около 37 тыс. т нефти, но она выплеснулась на берег, загрязнив 2000 км побережья. Затраты корпорации "Еххон" на сбор

нефти, восстановление последствий, сказавшихся на окружающей среде, и штрафы достигли астрономической суммы в 1,9 млрд. долларов. При катастрофе танкера «Erika» в 1996 г. у берегов Бретани в море вылилось лишь 12 тыс.т нефти, но за это правительству Франции пришлось выделить для очистки побережья кредиты почти на 2 млрд.долларов.

Считается, что именно эта авария способствовала тому, что Европейский Союз принял решение списать все однокорпусные танкеры, построенные до 1982 г., а к 2015 г. вообще вывести их из оборота.

Существует мнение, что российский танкерный флот не внес значительного вклада в загрязнение морской среды, хотя большинство отечественных танкеров представляют собой старые однокорпусные суда. Тем не менее, нельзя не упомянуть катастрофу танкера «Находка» (январь 1997 г.) у берегов Японии. Из корпуса танкера вылилось около 6 тыс.т нефти, часть которой покрыла западное побережье о.Хонсю. Компенсация, востребованная у России, превысила 200 млн.долларов.

Сводные данные по крупным авариям и катастрофам танкеров приведены в таблице.

#### Крупнейшие аварии и катастрофы танкеров

Название судна	Год аварии/катастрофы	Место аварии/катастрофы	Разлив нефти или нефтепродуктов (тыс. т)
1. TechacoMassachuets	1966	Возле мыса Берген у побережья США	
2. TorreyCanyon	1967	Острова Сцилли, Англия	119
3. Errou	1970	Восточное побережье Канады	6-12
4. Wafra	1971	Вблизи мыса Агульхас, Южная Африка	40
5. Metula	1974	Магелланов пролив, Чили	50
6. JakobMaersk	1975	Опорто, Португалия	88
7. Urquiola	1976	Ла Коруна, Испания	100
8. HawaiianPatriot	1977	В 300 милях от Гонолулу, Гавайские о-ва	95
9. Evoikos	1977	Сингапурский пролив	29
10. Venoyl	1977	Побережье Южной Африки	15-26
11.Hawaiian Patriot	1977	Тихий океан, 300 морских миль к западу от Гонолулу (Гавайи)	95

Название судна	Год аварии/катастрофы	Место аварии/катастрофы	Разлив нефти или нефтепродуктов (тыс. т)
12. AmocoCadiz	1978	Вблизи Бретани, Франция	223
13. Independenta	1979	Пролив Босфор, Турция	95
14. Atlantic Empress	1979	Тобаго	287
15. Betelgeuse	1979	Залив Бантры, Ирландия, порт	10-40
16. Tanio	1980	Вблизи берегов Бретани, Франция	1-10
17. GloubAssimi	1981	У берегов Клайпеды	16
18. Katina	1982	Порт Роттердам	100
19. Assimi	1983	В 55 милях от Мускат, Оман	53
20. CastillodeBellver	1983	Вблизи бухты Салдана, Южная Африка	252
21. Odyssey	1988	В 700 милях от Нова Скотия, Канада	132
22. Khard 5	1989	В 120 милях от атлантического побережья Марокко	80
23. ExxonValdez	1989	Отмель Принц Уильям, Аляска, США	37
24. ABT Summer	1991	В 700 милях от Анголы	260
25. Haven	1991	Генуя, Италия	144
26. AegeanSea	1992	Ла Корона, Испания	74
27. Katina P.	1992	Вблизи Мапуто, Мозамбик	72
28. Braer	1993	Шетландские острова, Англия	85
29. Nassia	1994	Босфор, Турция	20
30. Sea Prince	1995	Желтое море	5
31. SeaEmpress	1996	Милфорд Хэйвен, Англия	72
32. Находка	1997	Японское море	5
33. Erika	1999	Брест, Франция	20
34. Nakhodka	1999	Остров Оки, префектура Шимане, Япония	17,5
35. Prestige	2002	Ла Корона, Испания	77
36. TasmanSpirit	2003	Карачи, Пакистан	28
37. Волгонефть-139	2007	Азовское море	1,2 мазута
38. Hebei Spirit	2007	Желтое море	11-15
39. Название неизвестно	2009	Красное море	0,06 мазута
40. Григорий Бугров	2011	Каспийское море	-
41. Хаммарупи	2011	Красное море	Несколько тонн
42. Doola№3	Январь 2012	Желтое море	Неизвестно

Учитывая катастрофический ущерб от загрязнения окружающей среды при эксплуатации танкеров, Россия и

основные развитые зарубежные страны при создании танкеров пошли по пути проектирования и постройки судов «экологически чистого класса». Для этого разработаны основные международные и российские правовые документы, а также требования конструктивной защиты танкеров с учетом МК МАРПОЛ-73/78 [10].

Конструктивные мероприятия привели к созданию двойных бортов и дна танкеров, ограничению объемов и длины грузовых танков, введению в состав корпуса танков изолированного и чистого балласта. Были созданы предпосылки для прогнозирования возможного вылива нефтегруза через пробоины по результатам расчета гипотетического вылива нефти. Применение на танкерах двойного корпуса позволило значительно снизить вероятность вылива нефтегруза через пробоины при посадке на мель и столкновениях, улучшить процессы проведения грузовых операций и мойки танков. В то же время это привело к увеличению массы металлического корпуса на 10–12 %, что значительно повысило стоимость постройки судов. Кроме того, двойной корпус лишь снижает вероятность вылива нефтегруза, а не предотвращает его полностью. Так, расчеты показывают, что в случае аварии с танкером «Торри Каньон» наличие двойного дна не изменило бы характера катастрофы, так же, как и при столкновении танкеров «Техако Массачусетс» и «Альва Кэйп».

Введение в состав корпуса танков изолированного балласта исключает загрязнение окружающей среды нефтесодержащими водами, но при этом уменьшает полезные объемы танкера. Ограничение объемов и длины грузовых танков, наряду с двойным корпусом танкеров, обеспечивает значительно меньшее количество вылившегося нефтегруза в аварийных ситуациях. Согласно основному требованию МК МАРПОЛ-73/78, расположение грузовых танков и их размеры должны быть такими, чтобы рассчитанный гипотетический вылив груза при повреждении борта или днища в любом месте по длине судна не превышал 30 тыс.м<sup>3</sup> для танкеров дедвейтом до 421 тыс.т, а при дедвейте более 421 тыс.т был бы менее 40 тыс. м<sup>3</sup>. Поэтому для них приняты прямые ограничения длин и объемов грузовых танков. В соответствии с этим объем любого центрального грузового танка не должен превышать 75% гипотетического вылива нефти. Длина любого грузового танка не может превышать 10 м или величин, определяемых по зависимостям, приведенным в правилах Регистра и МК МАРПОЛ-73/78. В 2000 г.

ГУП «Адмиралтейские верфи» сдала компании «Лукойл» два танкера ледового плавания пр. 20070 «Астрахань» и «Магас» дедвейтом около 20 тыс.т. Опыт эксплуатации этих танкеров выявил существенный недостаток – большой объем грузовых танков (танки № 2 – 7 имеют объем от 3007 до 3194 м<sup>3</sup>), что является не характерным для столь относительно небольшого водоизмещения танкера. Модернизация этого проекта по пр. 20071 с установкой продольной гофрированной переборки в диаметральной плоскости позволила значительно улучшить эксплуатационные характеристики и повысить экологическую безопасность. При этом вдвое уменьшилась площадь свободной поверхности жидкого груза, повысился уровень электростатической защиты, а масса корпуса практически не изменилась [1].

Существующая методика расчета гипотетического вылива нефти уже не отвечает современным требованиям к перспективному прогнозированию. Она не позволяет рассчитать изменившиеся координаты центров тяжести и величины, определить новые параметры остойчивости. Уже давно назрела необходимость разработать корректные и достаточно точные математические модели аварийных разливов нефтегруза, но дальше постановочных задач дела в этом направлении пока не продвинулись.

#### 2.4 Разламывание корпуса танкера

Как известно, танкеры представляют собой суда с минимальным надводным бортом – это одна из основных их архитектурно-конструктивных особенностей. Минимальный надводный борт характеризует не только их запас плавучести, но и общую продольную прочность. Если танкер загружен по грузовую марку, запас его общей продольной прочности приближается к около предельному значению. Поэтому большие динамические нагрузки при большой высоте волн в штормовую погоду могут привести к нарушению прочности и разрушению корпуса, особенно если это судно старой постройки, имеющее значительный износ корпусных конструкций [12], да еще получившее повреждение.

Примером тому служит катастрофа (ноябрь 2002 г.) танкера «Престиж» ("Prestige"), построенного в 1976 г. Танкер, следовавший из латвийского порта Вентспилс в Гибралтар, в Бискайском заливе у берегов Галисии (Испания) попал в жестокий шторм и получил пробоину, напорвшись на риф или, со слов капитана,

столкнувшись с потерянным плавающим контейнером. На борту танкера находилось от 73 до 80 тыс. т мазута. В пробоину хлынула вода, а из нее стал вытекать мазут. Из 27 членов экипажа 24 были эвакуированы. Капитан и двое помощников остались на борту, помогая спасателям, которые пытались стабилизировать частично затопленное и все более кренящееся судно. Испанские, а затем и португальские власти отказались подпустить терпящий бедствие танкер ближе к берегу, что облегчило бы работу спасателей. В итоге «Престиж» разломился надвое в 250 км от испанского побережья (рис. 3) и затонул. К этому времени из пробоины по подсчетам специалистов вытекло около 5 тыс.т. мазута. Уже через сутки мазутное пятно достигло берегов Испании, покрыло около 200 км побережья, нанеся огромный ущерб фауне и фактически уничтожив местный рыбный промысел. Позднее мазутное пятно достигло северных районов Франции.

«Престиж» лежит на дне Атлантики на глубине около 4 тыс. м. В его танках находится до 66 тыс.т нефтегруза. Французский батискаф сумел заделать 20 обнаруженных им разломов на обломках танкера, из которых вытекал мазут. Надежда на то, что мазут, находящийся в закрытых танках, загустеет и отвердеет под действием холодной воды, мало обоснована. Рано или поздно мазут все равно просочится в море.

Эта катастрофа стала возможной как по техническим причинам, так и из-за стремления к наживе. Танкер принадлежал греческой судоходной компании "Universe Maritime", плавал под «удобным» багамским флагом, имел азиатский экипаж и перевозил российский мазут, принадлежащий компании "Crown Resources", являющейся дочерней по отношению к торгующей нефтью и нефтепродуктами «Тюменской нефтяной компании» (ТНК). Достаточно либеральные стандарты безопасности сначала позволили применить «Престиж» в качестве судна-накопителя, долго стоявшего на рейде порта Санкт-Петербург и собиравшего мазут из речных танкеров, а затем после дозагрузки в Вентспилсе использовать его для перевозки на большие расстояния. Однокорпусный «Престиж» следовал мимо берегов многих европейских стран, и теоретически авария могла произойти в любой момент. Европейский Союз к этому времени уже запретил использовать однокорпусные суда, построенные до 1982 г.



Рис. 3  
Катастрофа танкера «Престиж»

До недавнего времени случаев разламывания корпуса отечественных танкеров не было. Однако 11 ноября 2007 г. при сильном волнении в Керченском проливе переломился на две части в районе танков №5, 6 танкер класса «река-море» «Волгонефть-139» с 4077 т мазута на борту. Около 1200 т вылилось и устремилось в воды Черного моря. Наиболее загрязненными оказались побережья косы Чушка и в меньшей степени – косы Тузла.

Если описанные выше случаи разламывания корпусов танкеров связаны с их старением, низкими прочностными характеристиками, желанием сэкономить на стоимости фрахта и безопасности перевозок, проявлением человеческого фактора, то существуют и причины стихийного характера, к которым, например, относятся так называемые волны-убийцы. Они могут образовываться без известных причин, практически на любом участке моря, даже при слабом ветре и относительно небольшом волнении. Но обычно волны-убийцы возникают во время шторма. Высота обычных штормовых гребней в среднем составляет 4-6 м или 10-15 м при урагане, а внезапно возникающая волна-убийца может достигать 25-30 м. Она часто выглядит как «вертикальная

стена», которая не раскачивает судно, а разрушает его. За рубежом такие волны стали называть "freak waves" – ненормальные волны (рис. 4).

Волны-убийцы стали причиной гибели от разламывания корпуса нескольких супертанкеров в районе мыса Доброй Надежды, когда (1967-1975 гг.) в результате израильской агрессии против Египта Суэцкий канал был закрыт, что дало толчок к активизации строительства супертанкеров, вынужденных ходить вокруг Африки. Волны-убийцы оказывались резонансными для этих судов, и их корпуса не выдерживали динамических нагрузок.

Мыс Доброй Надежды, открытый португальскими мореплавателями в 1448 г., был назван тогда мысом Бурь. В этом районе иногда погибали целые эскадры. Так, во время сильного шторма в бухте Столовой в 1716 г. затонуло сразу 42 голландских фрегата и с ними груз, оцениваемый в 40 млрд. франков. В настоящее время этот район между мысами Дёрнфорд и Ресифе также считается опасным для мореплавания, но не только из-за сильных штормов, а и из-за необычных одиночных волн-убийц. Кроме области к югу от Африки волны-убийцы наблюдаются в районах Гольфстрима, Куроисио и других океанских течений, а также в узкостях и проливах с сильными течениями [4].

Крупная авария произошла в июне 1968 г. с первым в мире супертанкером "Word Glory" («Всемирная слава»). Судно было построено в США в 1954 г. и следовало под либерийским флагом из кувейтского порта Мена-эль-Ахмади в испанский порт Уэльва, имея 49 тыс. т сырой нефти на борту. Перед выходом в море танкер, согласно документам, отвечал всем требованиям безопасности. Судно попало в шторм, и 13 июня в 14 ч 55 мин гигантская волна высотой более 20 метров подняла середину танкера. Его нос и корма повисли в воздухе, корпус прогнулся, и на палубе около передней надстройки образовалась трещина. Вскоре еще одна волна задрала нос судна вверх, днище переломилось, и две половины танкера стали расходиться, выливая нефть на поверхность океана. К 19 часам обе половины судна затонули. При аварии погибло 22 человека. После случая с "Word Glory" в этом районе ежегодно происходили аварии, в результате которых суда получали различные повреждения.



Рис. 4  
Волна-убийца накатывается на танкер «Эссо Лангедок»

В период с 1969 по 1994 гг. в Тихом и Атлантическом океанах при встрече с волнами-убийцами затонули или получили серьезные повреждения 22 супертанкера и погибли 525 человек. В Индийском океане произошли за это время еще 12 подобных трагедий.

Особенностью эксплуатации танкеров является то, что большинство присущих им экологических опасностей может проявляться одновременно под воздействием различных причин. Так, столкновение или посадка на мель могут привести к пробоине, разрушению несущих связей и ослаблению общей продольной прочности, затоплению части внутреннего объема, выливу нефтегруза, к чрезмерной загазованности, искрообразованию и, как следствие, к пожару и взрыву. Сам по себе взрыв может

привести к пожару, пробоине, разрушению корпусных конструкций, разламыванию корпуса, разливу нефтегруза. Разлившаяся на акватории нефть, даже если она не горит, существенно осложняет использование спасательных средств.

### **Выводы**

Из приведенного выше материала следует, что основные направления повышения экологической безопасности танкеров – это совершенствование конструктивных решений, закладываемых еще на стадии проектирования, навигационного оборудования, а также системы подготовки персонала.

Снижению вероятности аварий служит появившаяся концепция высокой степени резервирования оборудования. На соответствие ей южнокорейский концерн "Samsung Heavy Industries" предложил разработать проект двухвинтового двухскегового танкера категории VLCC максимальным дедвейтом 304 тыс. т. Исходя из концепции полного резервирования на нем предусмотрены: два машинных отделения (МО), разделенных продольной переборкой типа А60; три дизель-генератора (два в МО правого и один в МО левого бортов); центральный пост управления и главный распределительный щит, также разделенные переборкой; два гребных винта и два руля, что увеличивает маневренность и живучесть судна. Подобные танкеры были заказаны компанией "ARCO" американской верфи "Avondale Industries". Эти танкеры имеют двойной корпус с завышенным по сравнению с требованиями МК МАРПОЛ-73/78 до 3 м расстоянием между внутренним и внешним корпусами. Танкер имеет двухвальную установку с двумя винтами регулируемого шага и двумя двигателями. Преимуществом такого класса танкеров являются повышенная безопасность плавания и защита окружающей среды [14].

Для эффективной борьбы с аварийными разливами нефти необходимо развивать математические методы моделирования этих процессов, создавать учебные тренажеры для отработки мероприятий по ликвидации разливов нефти. Для танкеров следует устанавливать повышенные стандарты безопасности, основанные на оценке возможных рисков [15].

В правила Регистра необходимо включить концепцию безопасности для танкеров, как это уже частично применено в Правилах классификации, постройки и оборудования ПБУ и МСП и Правилах классификации и постройки морских подводных трубопроводов.

Большое внимание в новых нормативных документах следует уделять проблемам человеческого фактора, на долю которого приходится от 85 до 90% аварий и катастроф танкеров. Влияние человеческого фактора на экологическую безопасность танкеров может быть существенно уменьшено путем успешного внедрения новой системы подготовки экипажей в соответствие с Международной конвенцией о подготовке и дипломировании персонала судов и несении вахты (ПДНВ-95). Такая подготовка, например, для командного, рядового состава и иных лиц, ранее не работавших на танкерах, хорошо налажена в морском учебно-тренажерном центре в Государственном университете морского и речного флота им. адм. С.О. Макарова.

Анализ аварий показывает, что в экстремальных ситуациях, особенно в стрессовых, судоводителю трудно принять обоснованное решение. В последние годы на вновь построенных танкерах находят все большее использование интеллектуальные системы (ИС) различного назначения. Применение на танкерах ИС объясняется недостаточной эффективностью полностью автоматизированных информационных систем, которые по мере усложнения решаемых задач все труднее становится понимать и контролировать. Эффективность функционирования этих систем и призваны повысить ИС.

### *Список литературы*

1. Александров В.Л., Глозман М.К. Совершенствование конструкций корпуса танкера ледового плавания пр.20071 для компании «Лукойл» // Сб. НТО им. акад. А.Н. Крылова: Совершенствование проектирования и постройки судов. Ч. IV. – СПб. – 2001. – Вып. №31. С. 12-20.
2. Борисов Р.В., Макаров В.Г., Никитин В.С. и др. Морские инженерные сооружения. 4.1 Морские буровые установки: Учебник – СПб.: Судостроение, 2003.- 535 с.
3. Гуськов М.Г., Макаров В.Г., Ситченко Л.С. Санитарные системы морских судов: Учебн. пособие – Л.: Изд. ЛКИ, 1989. –112 с.
4. Давидан И.Н., Лопатухин Л.И. На встречу со штормами. – Л.: Гидрометеиздат, 1982. – 136 с.
5. Зубрилов С.П., Ищук Ю.Г., Косовский В.И. Охрана окружающей среды при эксплуатации судов. – Л.: Изд. ЛКИ, 1989. – 112 с.
6. Истомин В.И. Комплексная очистка судовых нефтесодержащих вод – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2004. – 202 с.

7. Костылев И.И., Денисенко Н.И., Петухов В.А. Безопасность эксплуатации технологического комплекса танкера. – СПб.: «Элмор», 2001. – 192 с.
8. Макаров В.г., Ситченко Л.С. Основы проектирования грузовых и обеспечивающих систем танкеров: Учебн. пособие. – Л: Изд. ЛКИ, 1984. – 104 с.
9. Макаров В.Г. Специальные системы судов-газовозов: Учебник – СПб.: Изд. центр СПбГМТУ, 1997. – 472 с.
10. Михрин Л.М. Предотвращение загрязнения морской среды с судов и морских сооружений. Кн.1. Основные международные, региональные, национальные и российские документы в области предотвращения загрязнения морской среды с судов и морских сооружений. – СПб.: 2005. – 368 с.
11. Михрин Л.М. Предотвращение загрязнения морской среды с судов и морских сооружений. Кн.2. Технология и оборудование для предотвращения загрязнения окружающей среды с судов и морских сооружений. – СПб.: 2005. – 368 с.
12. Петрова Н.Е., Баева Л.С. Вероятностная оценка технического состояния корпуса судна. – Мурманск: Изд-во МГТУ, 2009. – 100с.
13. Путников А. Тесно во льдах Арктики. // Вечерний Северодвинск, № 28 (658), 22 июля 2010. – С.6.
14. Решетов Н.А. Нормативная база для судостроения XXI века // Судостроение. – № 6. – 2001. – С.16-20.
15. Яковлев В.В. Экологическая безопасность, оценка риска. – СПб.: Изд-во НП «Строения будущего», 2006. – 476 с.

# Судовые механические установки, валопроводы и движители

---

УДК 621.181.016

*И.И. Костылев, д-р техн. наук, проф., ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова*

*В.А. Петухов, д-р техн. наук, проф., ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова*

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНИЧЕСКОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ СУДОВЫХ СИСТЕМ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ С ОРГАНИЧЕСКИМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ

*Ключевые слова: органический теплоноситель, неисправности котельных установок, эффективность; системы: циркуляции термомасла, автоматического управления, контроля и диагностики*

### **Особенности применения органических теплоносителей в судовых системах обогрева**

Котлы и котельные установки в целом на любом судне, за исключением паротурбинных, могут быть отнесены к основной части механизмов, обеспечивающих как технологические процессы, так и нормальные бытовые условия.

Надежность конструкций, многолетний опыт эксплуатации, всеобъемлющие требования правил Регистра формируют мнение, что с этими агрегатами все вопросы решены и проблемы могут возникать только как следствие человеческого фактора.

При рассмотрении исторического пути развития котельной техники на судах становится понятно, что более «молодые» – это котлы с органическими теплоносителями (термомаслом). Авторы данной публикации являются свидетелями эволюционного развития и внедрения на судах отечественного флота термомасляных котлов. Опыт первых лет эксплуатации серии газозовов типа «Юрмала», на которых в системе теплоснабжения использовался только органический теплоноситель (ОТ), показал, что требуют доработки в этом направлении как правила Регистра,

так и правила технической эксплуатации. Возгорание в районе утилизационного котла на одном из судов этой серии явилось серьезным аргументом для анализа причины и предупреждения подобных случаев.

Значительная часть работы выполнялась коллективом кафедры Теплотехника, судовых котлов и вспомогательных установок ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова.

Российский морской регистр судоходства оперативно внес дополнения в нормативную документацию по техническому наблюдению, и термомасло как теплоноситель получает сегодня все большее распространение. Справедливости ради следует подчеркнуть, что отечественные разработки в данном направлении нуждаются в стимуляции. В контексте развития российского судостроения это было бы весьма уместным, особенно с учетом освоения северных широт как транспортных коридоров.

Таким образом, применение ОТ в судовых системах обогрева является альтернативой паровым системам обогрева и эффективным решением за счет использования повышенных температур термомасла в пределах 150 – 350 °С при низком рабочем давлении, что позволяет широко применять его для разных потребителей тепла в судовой энергетике. Обычные паровые системы на судах работают в основном при давлении до 1,2 МПа при температуре насыщенного пара до 190 °С. В термомасляных нагревательных системах ОТ циркулирует в замкнутых контурах обогрева с использованием циркуляционных насосов. Свойства термомасел сохраняются в течение многих лет работы практически без потерь (при условии соблюдения температурного режима его эксплуатации). Это приводит к низкой стоимости обслуживания и меньшим расходам на эксплуатацию всей термомаслянной системы.

Для сравнения, в судовых паровых котлах безвозвратные потери пара и воды (в качестве теплоносителя) даже при надлежащем соблюдении всех норм и правил составляют свыше 5%. Имеются ввиду:

- потери водяного теплоносителя при продувках (часть выпаров уходит в атмосферу через теплый ящик);
- потери с выпарами из деаэратора;
- потери через неплотности в арматуре и насосах (например, через сальники и уплотнения).

Для повышения общего КПД паровых котельных установок применяют различные технические решения, в том числе установку частотных преобразователей на электроприводы тягодутьевых вентиляторов, питательных и циркуляционных насосов. Следует также отметить, что судовые паровые котельные установки по металлоемкости оборудования значительно уступают термомасляным котельным агрегатам.

Исторически сложилось так, что традиционно на транспортном флоте в качестве систем обогрева применялись и применяются главным образом паровые системы обогрева с паровыми котлами. Широко известная технология применения пара в котлостроении насчитывает более 100 лет, что хорошо объяснимо (низкая стоимость воды, простота процесса).

Однако паровые системы имеют и существенные недостатки:

- с повышением требуемой температуры необходимо увеличивать давление пара в котле;
- требуются системы водоподготовки;
- наличие коррозионно-активной среды;
- необходима система размораживания трубопроводов при низких температурах.

Использование ОТ на основе минеральных масел в береговых установках известно с 30-х годов XX века. Это были установки в химической промышленности, где требовался подвод тепла для химических и технологических процессов с температурой выше 100 °С без повышенного давления в системе. Кроме этого, применению термомасел отдавалось предпочтение в связи с возможностью осуществления более равномерного и точно регулируемого температурного режима.

В судовой энергетике ОТ на основе минеральных масел нашли применение значительно позже. В 60-х годах прошлого столетия термомасла начали использоваться на судах Дании, Финляндии, Франции, Норвегии, Швеции, а позже их стали применять в Испании и Японии.

В настоящее время в связи с освоением арктического шельфа и увеличением потребностей в судах, надежно работающих при пониженных температурах, все чаще применяются системы обогрева с ОТ.

Предопределяющими факторами в пользу таких систем являются:

- замкнутый контур циркуляции термомасла;
- более высокая температура теплоносителя при атмосферном давлении. Рабочая температура достигает до 300°C; перепад температуры между начальной и конечной температурой термомасла около 40°C. Возможны системы с повышенным давлением теплоносителя, зависящим от гидравлического сопротивления системы и количества подключаемых потребителей;

- повышенное значение КПД котла за счет снижения тепловых потерь на деаэрацию и потери при продувках;

- простота эксплуатации и обслуживания (полная автоматизация системы, не требующая постоянного присутствия обслуживающего персонала);

- отсутствие необходимости в химической подготовке теплоносителя;

- отсутствие опасности замерзания при длительных остановках в зимний период;

- возможность производства пара с помощью включенного в установку парогенератора с подогревом от ОТ;

- меньший срок окупаемости за счет исключения недостатков (потерь), присущих схемам с паровыми котлами;

- отсутствие коррозионных разрушений внутри системы.

КПД термомасляного котла в стандартной конфигурации составляет около 89 % - без экономайзера, воздухоподогревателя. Оснастив котел встроенным или отдельно стоящим воздухоподогревателем, можно повысить КПД на 3 – 5%.

На рис. 1 показаны зависимости давления от температуры для двух теплоносителей (вода-пар и термомасло), применяемых в судовых системах обогрева.

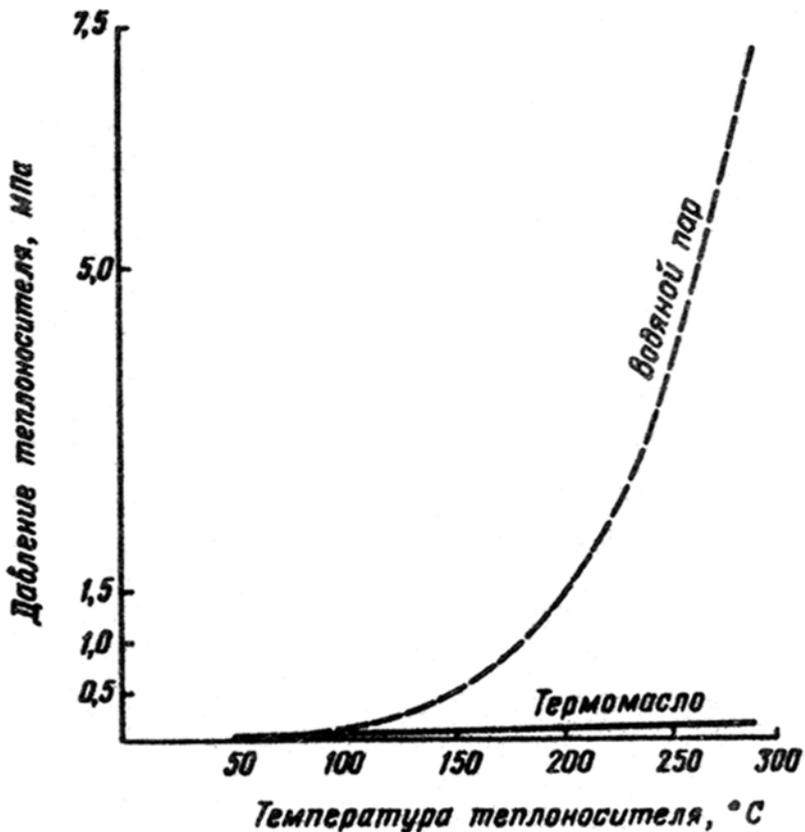


Рис. 1  
Зависимости давления термомасла и водяного пара от температуры

### Основные свойства и характеристики органических теплоносителей

В качестве ОТ могут применяться масла разных марок и производителей, но следует учитывать, что каждая марка масла имеет свое узкое назначение и присущие этому назначению свойства. Например, масла с одинаковой рабочей температурой могут значительно отличаться по вязкости и теплоемкости.

Вязкость масла влияет на выбор мощности насоса. При «холодном» запуске котла неправильно выбранная мощность насоса может вызвать перегрев теплоносителя в трубах котла вследствие низкой скорости потока. Перегрев приводит к выпадению твердых фракций, закоксовыванию поверхностей. Термомасло является экологически чистым теплоносителем, так как весь технологический цикл является закрытым, отсутствуют выбросы в окружающую среду. Комбинированное использование в термомасленных системах парогенераторов представляет собой один из простых способов получения насыщенного пара низких параметров, иногда необходимого для судовых нужд.

Наиболее распространенными органическими теплоносителями являются дифенильные смеси, дитоллилметан и теплоносители на основе минеральных масел. Последние применяются зарубежными судостроительными фирмами и в установках теплоснабжения.

Минеральные масла состоят из высокомолекулярных углеводородов (парафинового, ароматического и нафтеноароматического рядов), которые получают из нефти,

Химический состав масла, получаемого из нефти различных месторождений, колеблется в широких пределах, а именно: 2,7 – 12,9 % ароматических, 26 – 35,8% нафтеновых и 51 – 71% парафиновых колец. Парафиновые углеводороды, имеющие высокую температуру плавления, присутствуют в маслах в малых количествах, так как при очистке их обычно удаляют. Выпускаемые товарные масла в основном состоят из нафтеноароматических соединений.

Чтобы выбрать масло в качестве теплоносителя, необходимо знать все его эксплуатационные свойства как теплопередающей жидкости.

К числу этих свойств прежде всего относятся:

- максимально допустимая температура применения;
- интенсивность теплообмена в нагревательных установках;
- максимально допустимые удельные тепловые потоки при эксплуатации.

Несмотря на то, что минеральные масла применяются как теплоносители уже десятки лет, в настоящее время нет конкретных рекомендаций, до какой температуры и как долго можно эксплуатировать то или иное масло в качестве теплоносителя.

Теплоносители на основе минеральных масел обладают низкой термической стойкостью. Мерой термической стойкости является температура, при которой начинается разложение теплоносителя, а показателями относительной стойкости обычно служат скорости образования газообразных, низкокипящих и высококипящих продуктов. Процесс разложения теплоносителя (крекинг) под воздействием температуры приводит к образованию твердых углеродистых и газообразных продуктов. Твердые продукты выпадают в осадок, образуя на горячих поверхностях плотные пленки кокса. В процессе термического крекинга вязкость масляных теплоносителей вначале уменьшается, а затем возрастает.

Одним из основных критериев при выборе теплоносителя для судовых систем является температура вспышки. Ее величина определяет степень безопасности, что для судовых условий очень важно. Пока еще нет такого отечественного теплоносителя на основе минеральных масел, который удовлетворял бы этому требованию полностью. Диапазон рабочих температур для термомасла определяется верхними и нижними пределами температуры. Ограничение максимальной рабочей температуры определяют температура разложения и температура дистилляции.

Температура разложения практически не зависит от давления. Структурное разрушение масла происходит для обычного термомасла при температуре около 360 °С. Для хорошей работы установки и для предотвращения разрушения масла максимальная рабочая температура масла должна быть всегда на 30 °С ниже, чем его температура разложения.

Температура дистилляции - температура, при которой происходит разделение многокомпонентных жидких смесей на отличающиеся по составу фракции путем частичного испарения смеси и конденсации образующихся паров. Она значительно зависит от давления и увеличивается по мере его повышения. Например, если температура дистилляции термомасла составляет 310 °С при атмосферном давлении, то она повышается до 340 °С при давлении 3 бара. Кроме этого, для того чтобы избежать чрезмерного образования масляных паров, которые увеличивают проблемы циркуляции теплоносителя в котле (образованием паровых карманов, перегревом трубопроводов блока и т.д.), рабочая температура масла должна быть несколько ниже, чем температура дистилляции.

Таким образом, рабочая температура масла в герметичном котле может повышаться до значений, по крайней мере, на 30 °С ниже, чем температура разложения, т.е. ограничительным фактором является, скорее, температура разложения, а не температура дистилляции.

Необходимо подчеркнуть, что температура воспламенения масла не является таким важным фактором для выбора максимальной рабочей температуры, так как в котле используется масло, имеющее рабочую температуру выше его температуры воспламенения. ОТ обязательно имеют высокую сопротивляемость на разложение и, следовательно, обеспечивают высокую тепловую устойчивость. Кроме этого, они имеют высокую сопротивляемость факторам старения. Хорошее масло может эксплуатироваться в течение длительного времени (более 3 лет).

Для примера основные физико-химические характеристики масла типа MobilTherm 594, 603, 605 и фирмы Shell Thermia B, Thermia A приведены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

**Основные физико-химические характеристики масла MobilTherm 594, 603, 605**

Характеристика	Значение для масла		
	594	603	605
Вязкость, сСт при 40 °С	4,8	20	29
Вязкость, сСт при 100 °С	-	4,0	5,1
Плотность, г/см <sup>3</sup>	0,845	0,865	0,872
Температура вспышки, °С	120	160	210
Температура застывания, °С	- 42	-15	-15
Макс. допустимая температура масла, °С	205	290	320

Таблица 2

**Основные физико-химические характеристики термомасел фирмы Shell**

Характеристика	Значение для масла	
	Thermia B	Thermia A
Кинематическая вязкость, мм <sup>2</sup> /с при		
0 °С	230	48
40 °С	25	8,5
100 °С	4,7	2,2
200 °С	1,2	0,7
Плотность при 15 °С, г/см <sup>3</sup>	0,868	0,893
Температура вспышки в закрытом тигле, °С	220	140
Температура вспышки в открытом тигле, °С	230	150
Температура воспламенения, °С	255	175
Температура застывания, °С	-12	-60
Температура начала кипения, °С	>355	285
Температура самовоспламенения, °С	360	240
Число нейтрализации, мг КОН/г	<0,05	<0,05
Содержание влаги, % масс.	<0,1	<0,1
Зольность (оксидная), %	<0,01	<0,01
Коксующийся остаток (по Конрадсону), % масс.	0,02	<0,02
Коэффициент теплового расширения, 1/°С	0,0008	0,0008

### **Особенности эксплуатации систем теплоснабжения с ОТ**

При эксплуатации систем теплоснабжения с ОТ необходимо регулярно контролировать состояние масла, так как скорости изменения физико-химических показателей имеют более важное значение, чем их абсолютные величины. Контролируемыми характеристиками масла являются: вязкость, кислотное число, температура вспышки (в открытом и закрытом тигле) и содержание нерастворимых веществ.

Потенциальным источником ухудшения качества для масла является его нагрев в термомасляном котле. Для того, чтобы избежать возможных осложнений, используемый в системе циркуляционный насос должен обладать способностью создавать турбулентное течение масла через нагреватель со скоростью 2,00–3,55 м/с в зависимости от геометрии поверхности нагревателя.

Котел должен содержать в своей конструкции теплопередающие поверхности с минимальным термическим сопротивлением стенок и тепловой инерцией огнеупорного

материала топки с тем, чтобы в случае остановки насоса не произошел перегрев масла под действием накопленного тепла.

Топка котла должна быть так сконструирована, чтобы отсутствовал прямой контакт пламени с экранными теплопередающими трубами, по которым циркулирует масло, для предотвращения местных перегревов и избыточных температур масляной пленки. Учитывая изменение объема жидкости при нагревании или охлаждении, необходимо иметь расширительную емкость. Например, объем минерального масла при 300 °С почти на 20% больше, чем при комнатной температуре. Емкость должна быть достаточно большой, чтобы учесть общее тепловое расширение органического теплоносителя в пределах объемов системы. Расширительная цистерна должна находиться в самой высокой точке циркуляционной системы теплоносителя и быть соединенной с основной системой через всасывающую линию циркуляционного насоса для обеспечения соответствующего статического напора для устойчивой работы насоса.

В качестве одной из мер для предотвращения циркуляции теплоносителя через расширительную цистерну может быть использовано U-образное колено, установленное ниже того места, где она соединяется с основной циркуляционной системой. В основной системе трубопроводов должна быть предусмотрена возможность вентиляции для уменьшения опасности возникновения паровых и воздушных пробок во время первоначального запуска системы.

При необходимости создания повышенного давления следует избегать использования воды (например, при опрессовке систем), так как удаление ее из системы перед вводом в эксплуатацию является длительным и трудным процессом. Если даже незначительное количество влаги остается в системе, новое масло следует медленно нагреть до 110 °С при постоянном вентилировании. Затем температуру медленно поднимают до рабочей температуры при периодическом выпуске паров. Вся система в целом должна быть оснащена приборами для контроля за температурой масла и его расходом в критических точках, таких как боковые стенки котла.

Иногда требуется горячий воздух, например в сушилках. Надежным и эффективным способом обогрева является использование воздухонагревателей с применением термомасла.



Для удаления воздуха из масляной системы имеется дегазатор, который конструктивно может быть объединен с расширительной цистерной. В термомасляных котлах применяются хорошо испытанные решения с несколькими параллельными змеевиками, которые используются в водотрубных котлах и парогенераторах.

Отсутствует риск возникновения застойных зон, в которых не происходит циркуляция теплоносителя, так как внутри параллельно работающих змеевиков одинакового диаметра теплоноситель протекает с постоянной скоростью. Вертикальная конструкция котла обеспечивает хорошее распределение пламени (сверху вниз с возвратом между змеевиками), таким образом достигается компенсация теплового расширения (змеевик ведет себя как пружина). На рис. 3 и 4 представлен вертикальный термомасляный котел серии TPC фирмы "Babcock Wanson".

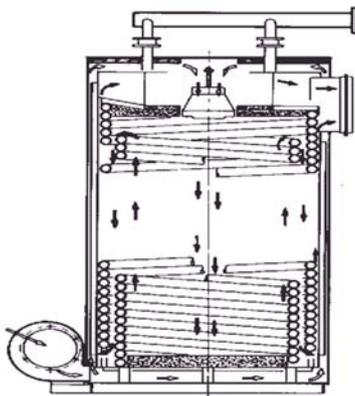


Рис. 3  
Внешний вид и разрез вертикального термомасляного котла

Материалы, применяемые для изготовления змеевиков и трубопроводов в пределах котла, должны соответствовать требованиям Регистра к котлам с органическими теплоносителями. Соединения труб между собой сварные либо фланцевые. Физические свойства термомасла при высоких температурах изменяются, в частности, снижается вязкость и увеличивается проникающая способность.

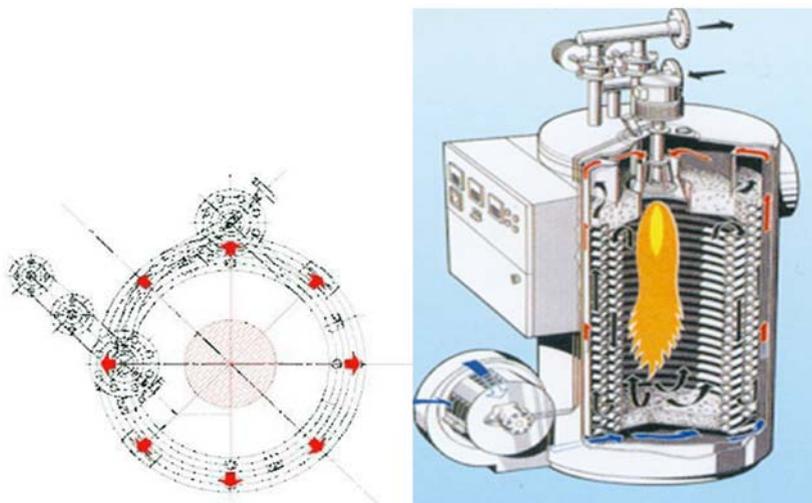


Рис. 4  
 Поперечный разрез и вид сверху трубной системы  
 вертикального термомасляного котла

#### Характеристики котла:

Полезная мощность, кВт/ч*1000	12500
Вес пустого котла, кг	9000
Содержание масла, л	1496
Подача масла циркуляционным насосом, м <sup>3</sup> /ч	150
Разность температуры масла между входом и выходом, °С	40
Давление масла, мм в.ст.	31
Ширина В, мм	2,770
Длина А, мм	3,900
Высота Н, мм	3,335
Тепловой КПД, %	87

Термомасляные котлы имеют преимущественно трехходовую компоновку в топочном пространстве, как и большинство традиционных огнетрубных котлов. Большим преимуществом является использование форсунки двухблочного типа, что означает разделение воздуха, подаваемого вентилятором для горения топлива на два потока. Такая конструкция позволяет использовать поток воздуха для дополнительного предварительного его нагрева для горения, который перед горелкой проходит в рубашке корпуса котла

вокруг внутренней оболочки, что обеспечивает повышение эффективности котла до 90%.

На рис. 5 показан котел с ОТ горизонтальной компоновки, установленный на единой раме с группой насосов.



Рис. 5

Внешний вид термомасляного котла с оборудованием в горизонтальном исполнении

### **Анализ опыта эксплуатации систем обогрева с ОТ**

Действительное преимущество термомасляных котлов заключается в возможности получения теплоносителя с более высокой температурой практически при атмосферном давлении, что позволяет повысить тепловой напор в подогревателях и одновременно повысить надежность всех элементов термомасляных систем (соединительных фланцев, сальников, прокладок и т.п.). Особенно это актуально для судов, работающих в районах с пониженной температурой атмосферного воздуха, чем исключается обмерзание систем, а также и коррозионно-кавитационный износ элементов судовых систем.

Повышенный температурный напор позволяет уменьшить поверхность термомасляных подогревателей, а также получать насыщенный пар в парогенераторах низкого давления для всех

судовых нужд при большем коэффициенте теплопередачи и меньших энергетических затратах.

Анализ опыта эксплуатации применения термомасел в судовых котлах выявил некоторые недостатки, связанные, в основном, с низким качеством монтажных работ (протечки в уплотнениях соединительных устройств, загрязнения оребренных поверхностей, неисправности в системах автоматического управления котлом). Причины возникновения и способы предотвращения и устранения характерных неисправностей термомасляных котлов приведены в табл. 3.

Таблица 3

**Основные неисправности котлов с ОТ**

Неисправность	Признаки	Причины возникновения	Последствия	Способ устранения неисправностей
Вода в термомасле	Повышается температура в расширительной цистерне масла, из дыхательного гуська идет пар, насосы начинают срывать подачу	Вода в термомасло может попасть вследствие нарушения работы в теплообменнике, например, в водяном подогревателе. Вода начинает поступать в контур с термомаслом при появлении неплотностей	Термомасло начинает вскипать, и происходят выбросы его в атмосферу, на палубу (в случае на судне). Термомасло уйдет из расширительной цистерны. Насосы работают с перебоями	Необходимо перекрыть поступление термомасла в теплообменник. Проверить уровень термомасла в расширительной цистерне. Если уровень низкий, то заполнить цистерну маслом. Устранить неплотности или заменить поврежденную часть труб
Форсунка котла включается и останавливается через несколько секунд	Неисправность фотоэлемента. Установка электродов не отрегулирована	Фотоэлемент загрязнен. Питание на него не подсоединено. Расстояние между кончиками электродов не отрегулировано	Не запускается котел, фотоэлемент не распознает наличие искры на электродах. Необходимость в неоднократном демонтаже форсунки котла	Почистить фотоэлемент. Проверить подвод питания на щите управления. Проверить зазоры в электродах

Неисправность	Признаки	Причины возникновения	Последствия	Способ устранения неисправностей
	Недостаточное количество топлива	Закрит клапан на линии, низкое давление в системе	Поступление топлива прекратиться	Проверить, открыты ли клапаны на топливной системе, разобрать редукционный клапан и проверить его исправность
Пламя с сажей и дымом	Черный дым. Не стабильное пламя	Д и ф ф у з о р прохода воздуха засорен. Нарушено соотношение «топливо-воздух». К р ы л а т к а вентилятора загрязнена	Нестабильное горение и плохое качество сгорания топлива. Для устранения данной причины необходимо длительное время. Загрязнение проточной части воздухоудувки	Снять, и прочистить диффузор. Проверить настройку форсунки. Почистить вентилятор воздухоудувки
Не стабильное пламя	Пульсирующее пламя	У в е л и ч е н а подача воздуха. Сопло распылителя засорено. Непостоянное давление подачи топлива	Через какое-то время котел остановится. Топливо перестает непрерывно подаваться. Перебой в работе котла	Отрегулировать положение воздушной заслонки горелки. Почистить сопло, заменить распылитель. Отрегулировать давление топлива перед форсункой

Дальнейшее исследование термомасляных систем необходимо проводить в области определения оптимальных параметров систем и совершенствования систем автоматического управления их технической эксплуатацией с целью повышения надежности.

Преимущественное применение термомасляных котлов на судах ледового класса в последние годы обусловлено

увеличением активности судоходства в районах Арктики и северного шельфа, что повышает их актуальность и заставляет более глубоко их изучать и повышать эффективность их технической эксплуатации. В связи с этим важным направлением повышения эффективности этих котлов является широкое внедрение двухтопливных (газ, мазут) топочных устройств. В таких котлах КПД может достигать 92–93 %. Он представляет собой совокупность параллельных змеевиков, соединенных входным и выходным коллектором, камеру сгорания большого объема с низкой удельной тепловой нагрузкой, с оптимизацией потерь напора и скорости масла в масляной системе и конвективного теплообмена в конвективном пространстве.

Своевременная сажеобдувка конвективных змеевиков и оптимальное регулирование температуры ОТ на входе и выходе из котла смогут дополнительно повысить КПД на 3–4%.

Для повышения эффективности котел необходимо оборудовать автоматическим воздушным байпасом, включающим воздухоподогреватель, использующим энергию выпускных газов, и две заслонки, приводимые в действие сервоприводом с микропроцессорным управлением с датчиками контроля температуры точки росы и содержания серы в топливе (чтобы предотвратить выпадение конденсата и исключения возможности возникновения коррозии).

Предлагаемые технические решения будут способствовать улучшению автоматики и диагностирования котельного оборудования, а в эксплуатации такая модернизация приведет к устойчивой и надежной работе судовых котлов с ОТ и снижению затрат на их техническое обслуживание.

## **Выводы**

1. Неоспоримые преимущества термомасляных теплоносителей позволяют судостроителям все шире применять их в судовых котельных установках и системах обогрева.

2. Основное преимущество заключается в возможности получения более высокой температуры теплоносителя в термомасляных котлах практически при атмосферном давлении, что позволяет повысить тепловой напор в подогревателях и одновременно повысить надежность всех элементов термомасляных систем (соединительных фланцев, сальников,

прокладок и т.п.), значительно уменьшить размеры теплопередающих аппаратов в системе обогрева.

3. Повышенный температурный напор позволяет уменьшить поверхность нагрева подогревателей, что снижает массогабаритные показатели оборудования.

4. Анализ опыта эксплуатации применения термомасел в судовых котлах выявил некоторые недостатки, связанные, в основном, с низким качеством монтажных работ (протечки в уплотнениях соединительных устройств систем). Это указывает на необходимость дальнейшего совершенствования конструктивных решений агрегатов.

5. Дальнейшее исследование термомасляных систем необходимо проводить в области термодинамического обоснования выбора оптимального типа теплоносителя и совершенствования систем автоматического управления.

### *Список литературы*

1. Костылев И.И. Применение термомасел в судовых системах теплоснабжения. – М, 1995.
2. Костылев И.И., Овсянников М.К. Техническая термодинамика и теплотехника. Учебное пособие. – ГМА им. адм. С.О. Макарова, – СПб, 2000.
3. Костылев И.И., Петухов В.А. Судовые системы. Учебное пособие. – ГМА им. адм. С.О. Макарова. – СПб, 2010.
4. Руководство по техническому использованию судового термомасляного котла типа «ТН» итальянской фирмы «GARIONI NAVAL», 2004.
5. Инструкция, описание котельных установок типа «ТН/V, ТН/AR, ТН/СР, ТН/V, ТНМ/V», 2009.
6. Инструкция, описание котельных установок серии «TRC» фирмы «Babcock Wanson», 2011 г.
7. Описание и разновидности органических теплоносителей разных фирм изготовителей. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www.rus-tt.ru](http://www.rus-tt.ru).
8. Правила классификации и постройки морских судов. – СПб.: Российский морской регистр судоходства. – 2012.

**В.К. Шурпяк**, канд. техн. наук, ФАУ «Российский морской регистр судоходства»

**В.В. Гришкин**, ФАУ «Российский морской регистр судоходства»

## О КОНСТРУКТИВНОМ КОЭФФИЦИЕНТЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ СУДОВ ЛЕДОВОГО ПЛАВАНИЯ

*Ключевые слова:* энергетическая эффективность, суда ледового плавания

Как известно, в настоящее время в ИМО разрабатывается Международный Полярный Кодекс (МПК). Работа над ним еще далека от завершения, но уже сейчас можно подвести некоторые итоги. В частности, все суда ледового плавания предполагается разделить на три категории – А, В и С. При этом в категорию А войдут суда, предназначенные для плавания в многолетних льдах со знаками полярных классов МАКО РС1 – РС5 и категориями ледовых усилений **Arc9 – Arc6** в классе РС. В категорию В войдут суда, предназначенные для плавания в однолетних льдах с классом МАКО РС6 – РС7, категориями ледовых усилений **Arc5 – Arc4** в классе РС и классами IASuper и IA согласно Финско-Шведским ледовым правилам. В категорию С должны войти все прочие суда.

Одновременно с разработкой МПК уже приняты требования к Коэффициенту Конструктивной Энергетической Эффективности (Energy Efficiency Design Index - EEDI) судов [1–3], которые сейчас применимы ко всем новым судам, определение которых дано в Правиле 2.23 Приложения VI к Международной конвенции по предотвращению загрязнения с судов 1973 г. и Протоколу 1978 г. к ней (МК МАРПОЛ 73/78). Настоящая статья посвящена ответу на вопрос: насколько возможно выполнение требований к EEDI для судов ледового плавания категорий А и В согласно предполагаемого в МПК деления судов?

В 2007 г. на 56-й сессии Комитета по защите морской среды ИМО были определены основные направления деятельности в области сокращения выбросов парниковых газов [1]. Впервые представлена расчетная формула для определения величины конструктивного индекса CO<sub>2</sub>, который имеет размерность: г CO<sub>2</sub>/т·милю:

$$\text{Attained design CO}_2 \text{ index} = \frac{CF \cdot SFC \cdot P}{\text{Capacity} \cdot V_{ref}} \quad (1)$$

В числителе этой формулы – величина номинальной мощности главного двигателя  $P$ , кВт, умноженная на удельный расход топлива этого двигателя  $SFC$ , г/кВт·ч и на безразмерный переводной коэффициент  $CF$ , г  $\text{CO}_2$ , г топлива, между расходом топлива в двигателе, г, и выбросами  $\text{CO}_2$ , г, определенными по содержанию углерода в конкретном топливе. В знаменателе формулы – произведение величины вместимости судна (в качестве вместимости предполагалось принимать дедвейт)  $\text{Capacity}$ , т, и максимальной скорости судна  $V_{ref}$ , уз.

Согласно Руководству по методу расчета EEDI для новых судов, вступившему в силу с 01.01.2013 г. (резолюция МЕРС.212 (63) с поправками в резолюции МЕРС.224(64)) [2], необходимо пользоваться формулой (2).

Настоящая формула применима к судам с дизельной энергетической установкой с механической передачей мощности на винт. В числителе этой формулы присутствуют четыре составляющих, из которых:

$$\frac{\left( \prod_{j=1}^n f_j \right) \left( \sum_{i=1}^{ME} P_{ME(i)} C_{FME(i)} SFC_{ME(i)} \right) + \left( P_{AE} C_{FAE} SFC_{AE} \right) + \left( \prod_{j=1}^n f_j \cdot \sum_{i=1}^{nPTI} P_{PTI(i)} - \sum_{i=1}^{neff} f_{eff(i)} P_{AEeff(i)} \right) C_{FAE} SFC_{AE} - \left( \sum_{i=1}^{neff} f_{eff(i)} P_{eff(i)} C_{FME} SFC_{ME} \right)}{f_i \cdot f_c \cdot \text{Capacity} \cdot f_w \cdot V_{ref}} \quad (2)$$

- первая (выделена голубым цветом) отражает расход топлива главной пропульсивной установкой и повторяет числитель формулы (1) с дополнительным коэффициентом  $f_j$ , учитывающим увеличение мощности главной пропульсивной установки, необходимое для судов ледового плавания;

- вторая (выделена коричневым цветом) учитывает расход топлива на производство электроэнергии вспомогательными генераторами на ходу судна;

- третья (выделена зеленым цветом) учитывает мощность, потребляемую валогенератором, и мощность, высвобождающуюся в результате применения на судне инновационных технологий для выработки электроэнергии на ходу судна (при наличии);

- четвертая (выделена серым цветом) учитывает мощность инновационной технологии, использующуюся для приведения судна в движение (при наличии).

Для судов без валогенератора и без использования энергоэффективных технологий формула приобретает более простой вид:

$$EEDI = \frac{f_j P_{ME} C_{FME} SFC_{ME} + P_{AE} C_{FAE} SFC_{AE}}{f_i DWT_{ref}} \quad (3)$$

В знаменателе формулы предусмотрены специальные коэффициенты  $f_j$  и  $f_i$ , учитывающие необходимость подкреплений корпуса и наличия дополнительной мощности главного двигателя для судов ледового класса. В [2] даются формулы для определения коэффициентов  $f_j$  и  $f_i$  для судов с Финско-Шведским ледовым классом и для других ледовых классов, эквивалентных согласно рекомендации 25/7 [4] Хельсинской комиссии (HELCOM), выдержка из которой приведена в табл. 1 (с учетом изменений классов Регистра).

Таблица 1

Classification Society	Ice Class				
	IA Super	IA	IB	IC	Category II
Finnish-Swedish Ice Class Rules					
Russian Maritime Register of Shipping (Rules 1995)	<b>UL</b>	<b>L1</b>	<b>L2</b>	<b>L3</b>	<b>L4</b>
Russian Maritime Register of Shipping (Rules 1999)	<b>LU5</b>	<b>LU4</b>	<b>LU3</b>	<b>LU2</b>	<b>LU1</b>
Russian Maritime Register of Shipping (Rules 2013)	<b>Arc5</b>	<b>Arc4</b>	<b>Ice3</b>	<b>Ice2</b>	<b>Ice1</b>

Как видно из табл. 1, в ней отсутствуют классы судов с ледовым классом МАКО РС1 – РС7 и с категориями ледовых усилений **Arc9** – **Arc6** в классе РС, то есть все классы, предназначенные для эксплуатации в арктических морях.

Поправочные коэффициенты  $f_j$  и  $f_i$  для судов ледового плавания с ледовыми усилениями **Arc5**, **Arc4**, **Ice3** и **Ice2** могут быть определены согласно резолюции МЕРС.212(63). Коэффициент грузоподъемности  $f_i$  (в знаменателе) учитывает необходимость соответствия каким-либо техническим или нормативным требованиям, выполнение которых влияет на грузоподъемность судна, то есть если судно имеет ледовые подкрепления, то связанное с этим увеличение веса конструкций

корпуса и, как следствие, уменьшение дедвейта должно учитываться этим коэффициентом. Если судно не имеет ледового класса, то  $f_j$  принимается равным 1,0:

$$f_{j\min}=1 \leq f_{j0} \leq f_{j\max}.$$

Значения  $f_{j0}$  и  $f_{j\max}$  вычисляются в соответствии с резолюцией МЕРС.212(63) в зависимости от назначения судна и ледового класса. Для судов ледового класса

$$f_{j0} = \frac{k_5 L_{PP}^{k_6}}{DWT}, f_{j\max} = k_7 L_{PP}^{k_8}, \quad (4)$$

где  $k_5, k_6, k_7, k_8$  – коэффициенты, приведенные в табл. 2;  
 $L_{PP}$  и  $DWT$  – длина и дедвейт судна.

Коэффициент конструктивных особенностей  $f_j$  (в числителе), учитывает необходимость соответствия каким-либо техническим или нормативным требованиям, выполнение которых влияет на мощность пропульсивной установки судна. Если судно имеет ледовый класс, то согласно правилам РС мощность главного двигателя должна быть увеличена, и при расчете EEDI это должно быть учтено коэффициентом  $f_j$ . Если судно не имеет ледового класса, то  $f_j$  принимается равным 1,0:

$$f_{j\min}=1 \leq f_j \leq f_{j\max}.$$

Значения  $f_{j0}$  и  $f_{j\max}$  вычисляются в соответствии с резолюцией МЕРС.212(63) в зависимости от назначения судна и ледового класса. Для судов ледового класса

$$f_{j0} = \frac{k_1 L_{PP}^{k_2}}{\sum_{i=1}^{nME} P_{ME(i)}}, f_{j\max} = k_3 L_{PP}^{k_4} \quad (5)$$

где  $k_1, k_2, k_3, k_4$  – коэффициенты, приведенные в табл. 3;  
 $L_{PP}$  – длина судна;  
 $P_{ME(i)}$  – мощность главных двигателей.

В результате рассмотрения документов ИМО, применимых для судов ледового плавания, возникают следующие вопросы, ответы на которые мы попытались изложить в рамках данной статьи:

1. Допустимо ли применение поправочных коэффициентов, разработанных для Финско-Шведских классов (т.е. для Балтийского моря), к судам, предназначенным в эксплуатации в

Арктике в аналогичных ледовых условиях? Или, другими словами, достаточно ли адекватно применение коэффициентов  $f_j$  и  $f_i$ , взятых из таблицы в [ 3], для категорий ледовых усилений **Ice1 – Ice3** и **Arc4 – Arc5** в классе PC?

2. Будет ли правомерно применение указанных коэффициентов для судов с категориями ледовых усилений **Arc6 – Arc9** в классе PC? И если нет, то можно ли предложить другие поправочные коэффициенты?

3. На сколько реально одновременное выполнение требований правил Регистра к мощности судов ледового класса и к энергоэффективности?

### **Постановка задачи**

Для получения ответов на поставленные вопросы было решено:

провести расчет EEDI всех существующих судов в классе PC, к которым применимы требования [ 3];

применить к судам с классом PC поправочные коэффициенты  $f_j$  и  $f_i$ , взятые для судов ледового плавания согласно Финско-Шведским ледовым правилам и проверить соответствие полученных результатов значениям базовых линий и адекватность их применения для судов с классом PC;

оценить возможность разработки поправочных коэффициентов для судов, класс которых входит в категорию A (по проекту МПК).

Подсчитанный по формуле (2) EEDI судна не должен превышать допустимого значения, которое принято называть требуемым EEDI. Для получения базовой линии в ИМО использовались данные по существующим судам на основе базы данных Lloyd's Register. Пример такого построения показан на рис. 1. Соответственно и адекватность применения предложенных коэффициентов можно проверить аналогичным путем.

Резолюцией MEPC.203(62) [2] принята базовая кривая, предназначенная для расчета значения требуемого EEDI (6) грузовых судов, тип которых указан в табл. 2:

$$REF = a \times b^{-c}, \quad (6)$$

где  $a$  и  $c$  – постоянные величины, зависящие от типа судна,  $b$  характеризует вместимость судна.

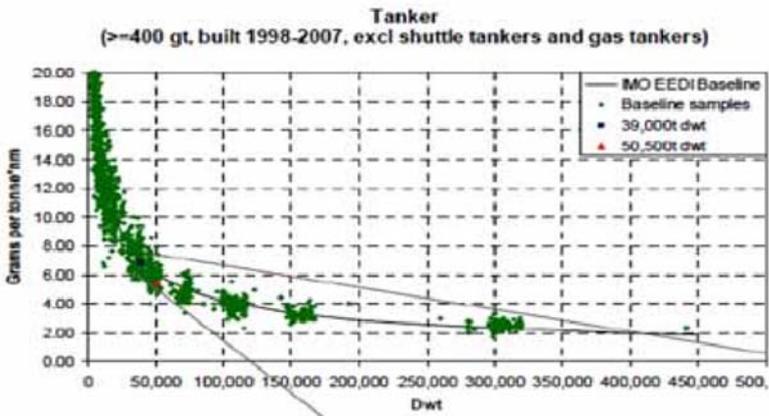


Рис. 1

Пример создания базовой линии для нефтеналивных судов валовой вместимостью более 400, построенных за период с 1998 по 2007 г., на основе базы данных Lloyd's Register

Таблица 2

Тип судна	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
Балкер	961,79	DWT судна	0,477
Газовоз	1120,00	DWT судна	0,456
Танкер	1218,80	DWT судна	0,488
Контейнеровоз	174,22	DWT судна	0,201
Судно для генгруза	107,48	DWT судна	0,216
Рефрижератор	227,01	DWT судна	0,244
Комбинированное судно	1219,00	DWT судна	0,488

Согласно правилу 21 Приложения VI к МК МАРПОЛ 73/78 достигнутый EEDI нового судна должен быть не более требуемого EEDI, который определяется как

$$\text{Требуемый EEDI} = (1 - X/100)\text{Ref}, \quad (7)$$

где *X* – понижающий коэффициент, отражающий требование по уменьшению расхода топлива на милю и тонну перевозимого груза для новых судов на период до 2025 г.;

*Ref* – значение базовой линии в зависимости от типа судна и дедвейта.

На рис. 2 – 10 для различных типов судов в нижней части показаны требуемый EEDI и базовые линии, построенные согласно

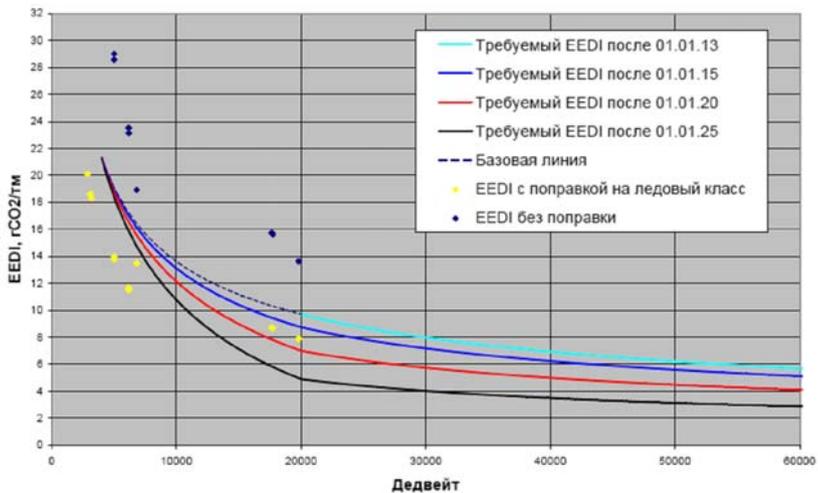


Рис. 2  
EEDI существующих танкеров дедвейтом более 4000 с категориями ледовых усиления **Arc5** и **UL** в классе PC

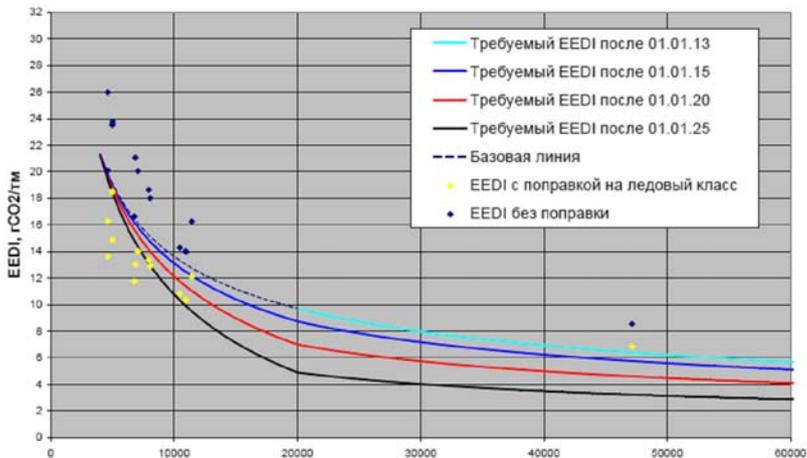


Рис. 3  
EEDI существующих танкеров дедвейтом более 4000 т с категориями ледовых усиления **Arc4** и **L1** в классе PC

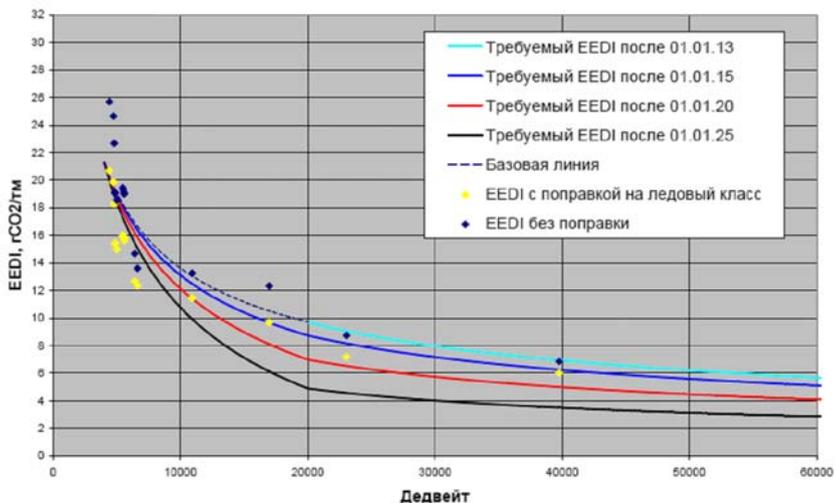


Рис. 4  
EEDI существующих танкеров дедвейтом более 4000 т с категориями ледовых усилений **Ice3** и **L2** в классе PC

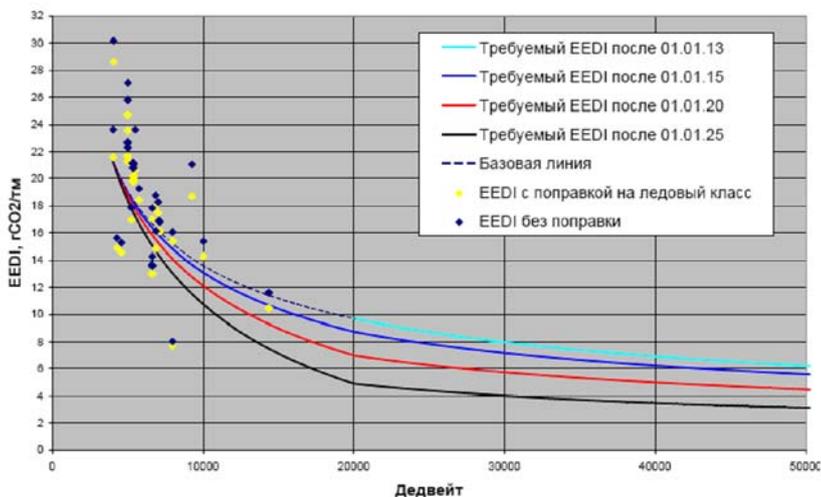


Рис. 5  
EEDI существующих танкеров дедвейтом более 4000 т с категориями ледовых усилений **Ice2** и **L3** в классе PC

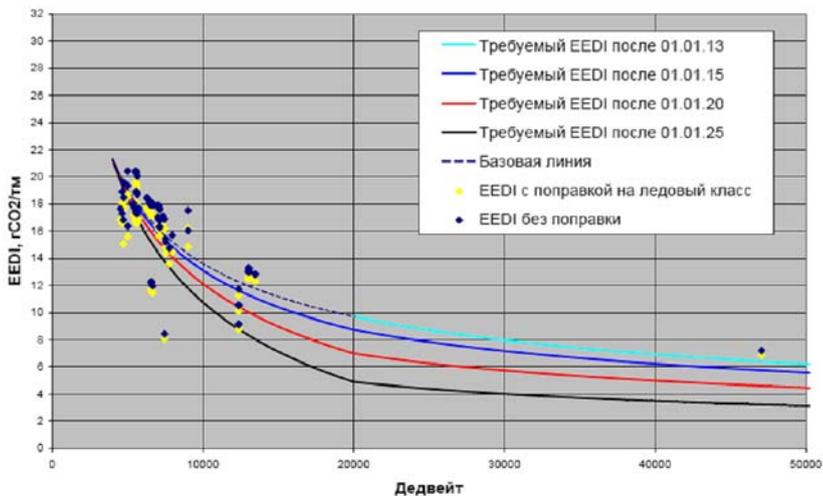


Рис. 6  
EEDI существующих танкеров дедвейтом более 4000 т категориями ледовых усилений **I ce1** и **L4** в классе PC

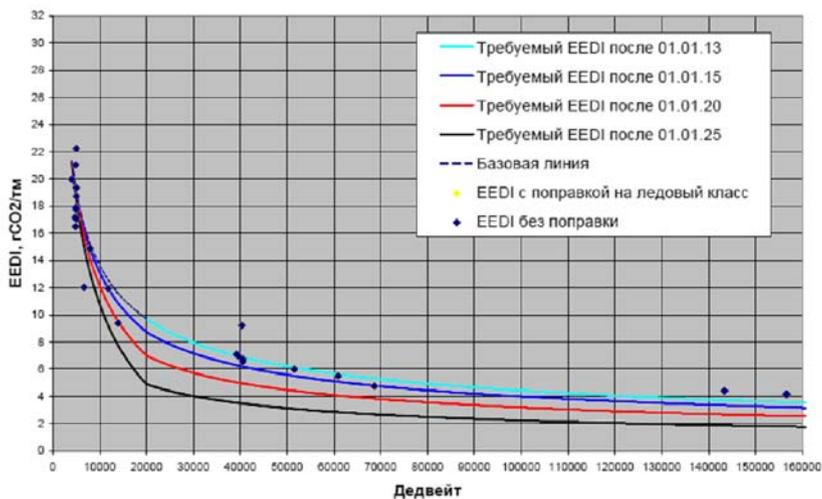


Рис. 7  
EEDI существующих танкеров дедвейтом более 4000 т без ледового класса PC

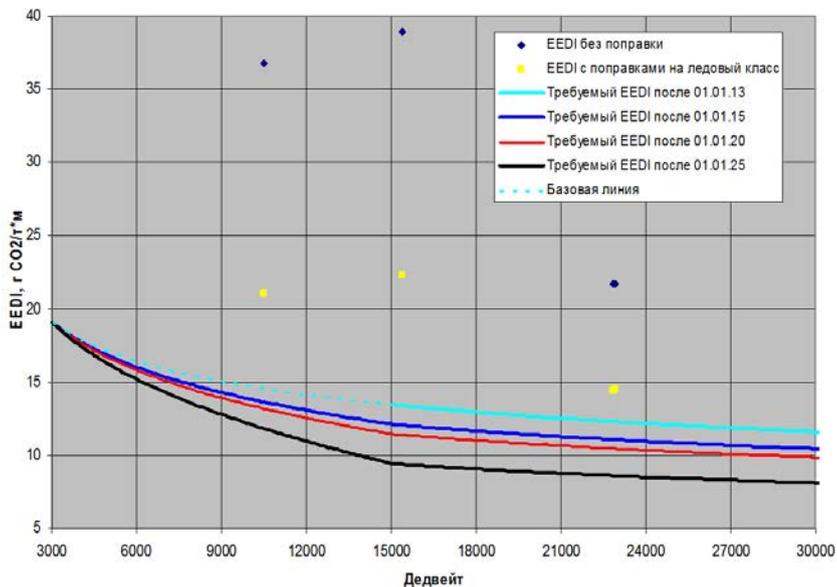


Рис. 8

EEDI судов для генеральных грузов с категориями ледовых усиления **Arc7** и **ULA** в классе PC

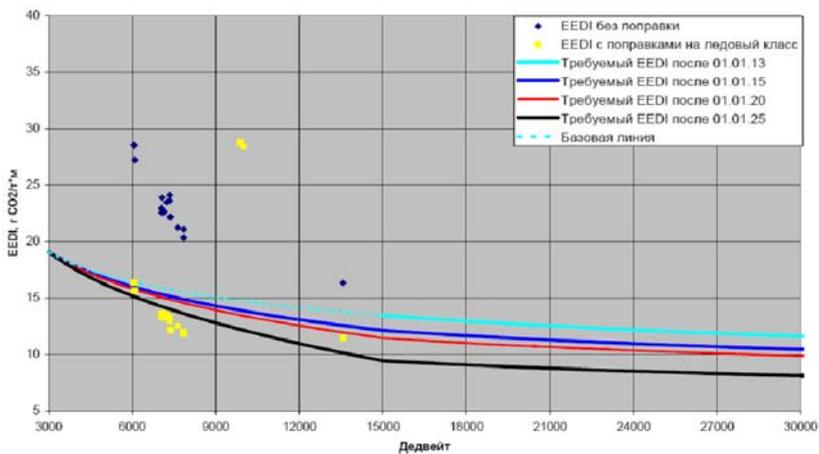


Рис. 9

EEDI существующих судов для генгрузов дедвейтом более 3000 т с категориями ледовых усиления **Arc5** и **UL** в классе PC

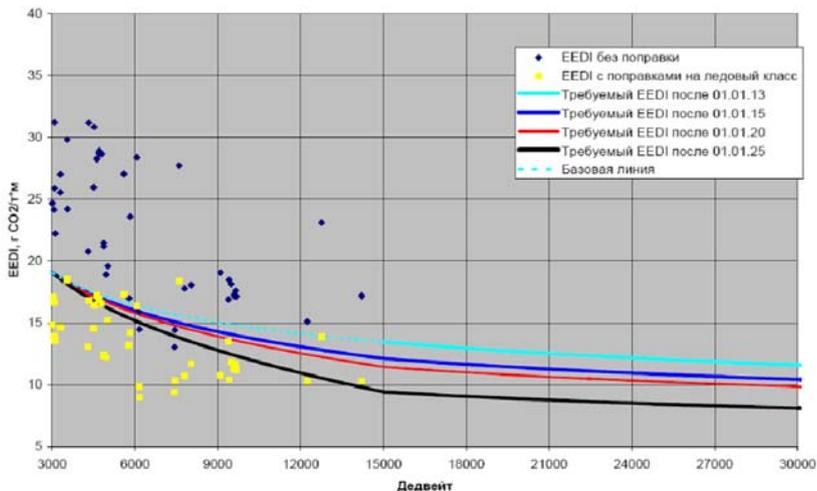


Рис. 10

EEDI существующих судов для генгрузов дедвейтом более 3000 т с категориями ледовых усилений **Arc4** и **L1** в классе PC

формулам (6) и (7). Базовые линии показаны пунктиром, а требуемый EEDI сплошными линиями (требуемое значение EEDI после 01.01.2013 г. показано голубым цветом, после 01.01.2015 г. - синим, после 01.01.2020 г. - красным, после 01.01.2025 г. – черным).

### Описание расчета

Расчет производился по методике, изложенной в [3]. Подробно описывать алгоритм расчета не имеет смысла, так как аналогичные расчеты уже описаны в [7] для судов смешанного (река-море) плавания и в [8] для судов ледового плавания.

Большинство необходимых исходных данных бралось из Регистровой книги судов Регистра по данным базы «Флот» на февраль 2013 г<sup>1</sup>. Таким образом, для расчета были получены длина, ширина, дедвейт, мощность главных двигателей и скорость судна при полной мощности. Всего на 13.02.2013 г. в классе PC

<sup>1</sup> Авторы выражают признательность инженеру отдела внедрения информационных технологий ГУР Павловой А.Ю. за помощь в подготовке данных, необходимых для расчета.

находилось 3856 самоходных судов  $GT \geq 100^\circ$ . Из них без ледового класса - 789, ледоколов различных классов - 33.

Остальным судам ледового плавания к символу класса добавляются категории, указанные в табл. 3.

Таблица 3

Категория ледового усиления	Кол-во судов	Эквивалентная категория ледового усиления (правила 1995 г.)	Кол-во судов	Всего
<b>Ice 1</b>	302	<b>L4</b>	518	820
<b>Ice 2</b>	195	<b>L3</b>	866	1061
<b>Ice 3</b>	95	<b>L2</b>	466	561
<b>Arc 4</b>	90	<b>L1</b>	283	373
<b>Arc 5</b>	17	<b>UL</b>	180	195
<b>Arc 6</b>	6		-	6
<b>Arc 7</b>	10	<b>ULA</b>	6	16
<b>Arc 8</b>				
<b>Arc 9</b>				
<b>Итого</b>				3032*
* Из них 165 судов используют электродвижение				

Данные, приведенные в табл. 4, показывают, что для некоторых типов судов произвести сколько-нибудь достоверные оценки адекватности поправочных коэффициентов невозможно из-за их малого количества. Например, газозовов всего шесть, из которых только один имеет в классе категорию ледового усиления **Ice 2**. Такое же количество контейнеровозов. Несколько больше комбинированных судов - 27, но все эти суда одного проекта с категорией ледовых усилений **L4**. Таким образом, эти три типа судов мы вынуждены исключить из дальнейшего рассмотрения.

В расчете учитывались только суда, к которым применима методика [3], то есть только суда с механической передачей мощности на винт, дедвейт которых больше минимального значения для требуемого EEDI (для танкеров, например, это 4000 т).

Скорость судна при 75% полной мощности главного двигателя рассчитывалась исходя из кубической зависимости потребляемой мощности от скорости судна согласно известной адмиралтейской формуле для водоизмещающих судов  $P_{ME} = CV_{ref}^3$  где постоянная  $C$  индивидуальна для каждого судна (аналогичные расчеты

Таблица 4

**Количество судов различных классов и категорий, подпадающих  
под действие требований МАРПОЛ 73/78 к EEDI**

Класс Регистра	Тип судна						
	1	2	3	4	5	6	7
<b>Arc 9</b>					6		
<b>Arc 8</b>					–		
<b>Arc 7,ULA</b>					28		
<b>Arc 6</b>					71	36	
<b>Arc5, UL</b>	3		17		67	7	
<b>Arc4, L1</b>	14		18	3	193	25	
<b>Ice3, L2</b>	2		57		574	6	
<b>Ice2, L3</b>	9	1	107	1	104	31	
<b>Ice1, L4</b>	4	2	125				27
Без ледового класса	43	3	29	2			
<b>Всего</b>	<b>75</b>	<b>6</b>	<b>353</b>	<b>6</b>	<b>1043</b>	<b>105</b>	<b>27</b>

Примечание. В шапке таблицы цифры означают:  
 1 – Балкеры, дедвейт  $\geq 10000$ ;  
 2 – Газовозы, дедвейт  $\geq 2000$ ;  
 3 – Танкеры, дедвейт  $\geq 4000$ ;  
 4 – Контейнерные суда, дедвейт  $\geq 10000$ ;  
 5 – Суда для генгруза, дедвейт  $\geq 3000$ ;  
 6 – Рефрижераторные суда, дедвейт  $\geq 3000$ ;  
 7 – Комбинированные суда, дедвейт  $\geq 4000$

производились в [8]). Из этого следует, что скорость  $V_{ref}$ , соответствующая 75% полной мощности главного двигателя, можно принять равной 91% скорости судна, указанной в Регистровой книге судов.

Поскольку в Регистровой книге судов отсутствуют данные об удельном расходе топлива главных и вспомогательных двигателей, авторы взяли эти данные из доступных источников [5,6]. Если для каких-либо двигателей получить надежные данные не удалось, то в расчете принималось значение расхода топлива для главных двигателей 190 г/кВтч, а для вспомогательных 215 г/кВтч. Принятые значения находились приблизительно в середине диапазона разброса имеющихся данных по расходу топлива; например, для существующих танкеров главные двигатели имеют удельный расход топлива от 173 до 218 г/кВтч. Согласно [3],

указанные значения соответствуют показателям современных отечественных и зарубежных машин и совпадают с рекомендованными резолюцией МЕРС. 215(63) с поправками в резолюции МЕРС. 231(65).

Результаты расчета сведены в табл. 5 и приведены на рис. 1-15, на которых синим цветом показаны результаты расчета EEDI без учета поправок на ледовый класс, а желтым – в результате применения поправок.

Таблица 5

Категории ледового усиления в классе РС	Эквивалентный согласно [4] класс по Финско-Шведским правилам	Количество судов			
		Всего	Соответствуют	Не соответствуют	% соответствия
Танкеры					
<b>Arc5, UL</b>	<b>IASuper</b>	17	17	-	100
<b>Arc4, L1</b>	<b>IA</b>	18	16	2	89
<b>Ice3, L2</b>	<b>IB</b>	57	54	3	95
<b>Ice2, L3</b>	<b>IC</b>	107	59	48	55
<b>Ice1, L4</b>	<b>II</b>	125	44	81	35
Без ледового класса		29	17	12	60
Всего		353	207	146	58
Суда для генгруза					
<b>Arc7, ULA</b>		6	0	6	0
<b>Arc6</b>		-	-	-	-
<b>Arc5, UL</b>	<b>IASuper</b>	28	26	2	93
<b>Arc4, L1</b>	<b>IA</b>	71	65	6	92
<b>Ice3, L2</b>	<b>IB</b>	67	67	5	93
<b>Ice2, L3</b>	<b>IC</b>	193	183	10	95
<b>Ice1, L4</b>	<b>II</b>	574	267	307	47
Без ледового класса		104	53	51	51
Всего		1043	661	387	63

Категории ледового усиления в классе РС	Эквивалентный согласно [4] класс по Финско-Шведским правилам	Количество судов			
		Всего	Соответствуют	Не соответствуют	% соответствия
Рефрижераторные суда					
<b>Arc4, L1</b>	<b>IA</b>	36	36	-	100
<b>Ice3, L2</b>	<b>IB</b>	7	6	1	86
<b>Ice2, L3</b>	<b>IC</b>	25	19	6	76
<b>Ice1, L4</b>	<b>IC</b>	6	6	-	100
Без ледового класса		31	20	11	65
Всего		105	87	18	83
Балкеры					
<b>Arc5, UL</b>	<b>IASuper</b>	3	-	3	0
<b>Arc4, L1</b>	<b>IA</b>	14	1	13	7
<b>Ice3, L2</b>	<b>IB</b>	2	-	2	0
<b>Ice2, L3</b>	<b>IC</b>	9	2	7	29
<b>Ice1, L4</b>	<b>IC</b>	4	-	4	0
Без ледового класса		43	8	35	19
Всего		75	11	64	15

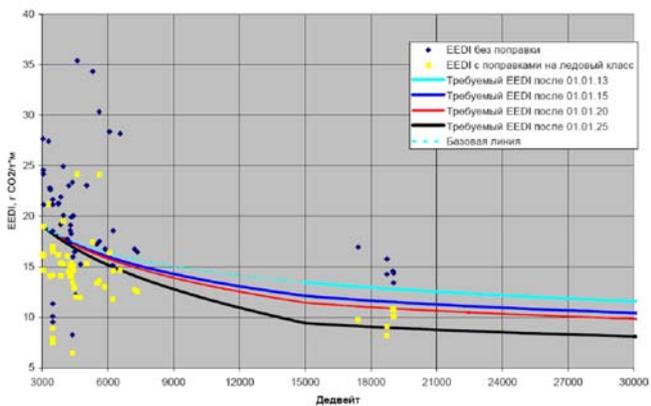


Рис. 11

EEDI существующих судов для генгрузов дедвейтом более 3000 т с категориями ледовых усиления **Ice3** и **L2** в классе РС

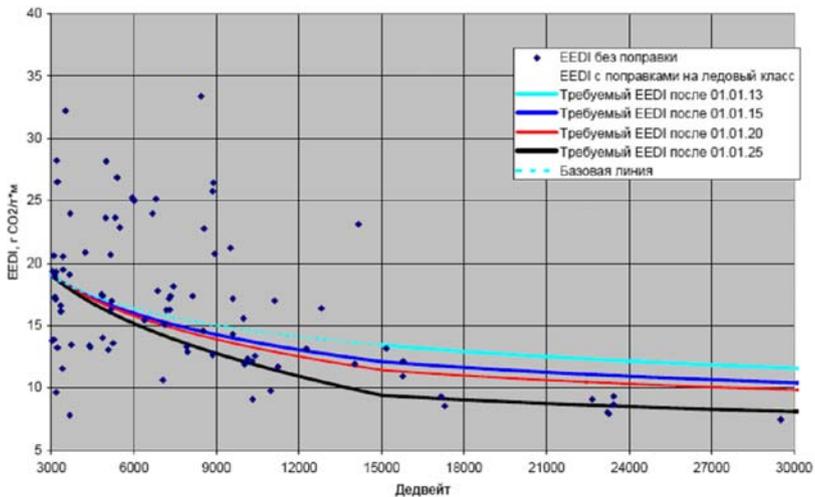


Рис. 12  
EEDI существующих судов для генгрузов дедвейтом более 3000 т без ледовых усилений в классе PC

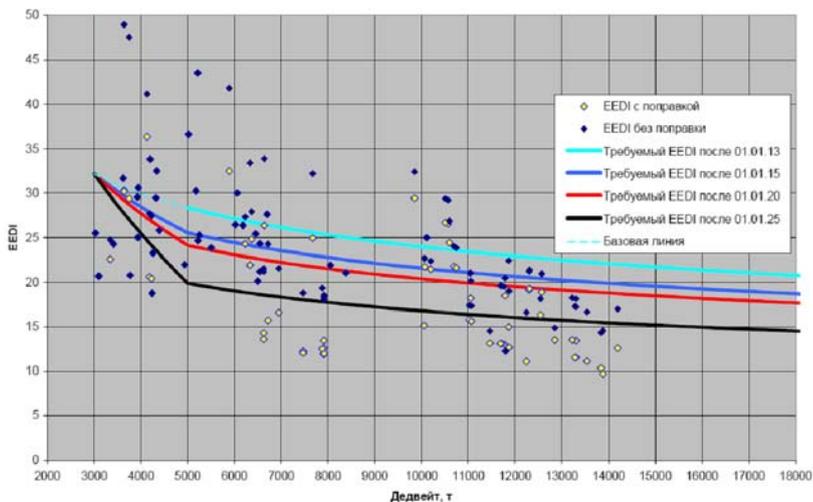


Рис. 13  
EEDI существующих рефрижераторных судов дедвейтом более 3000 т со всеми категориями ледовых усилений и не имеющие таковых в классе PC

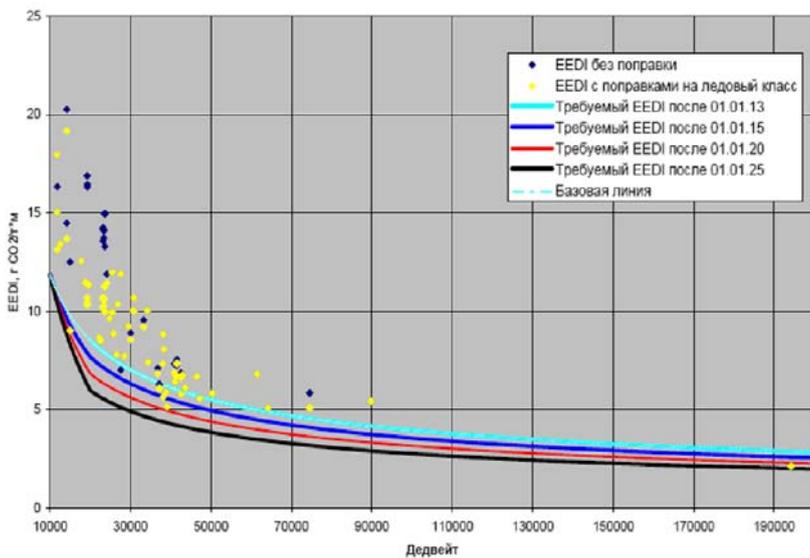


Рис. 14  
EEDI существующих балкеров дедвейтом более 10000 т в классе PC  
( суда всех ледовых классов и не имеющие таковых)

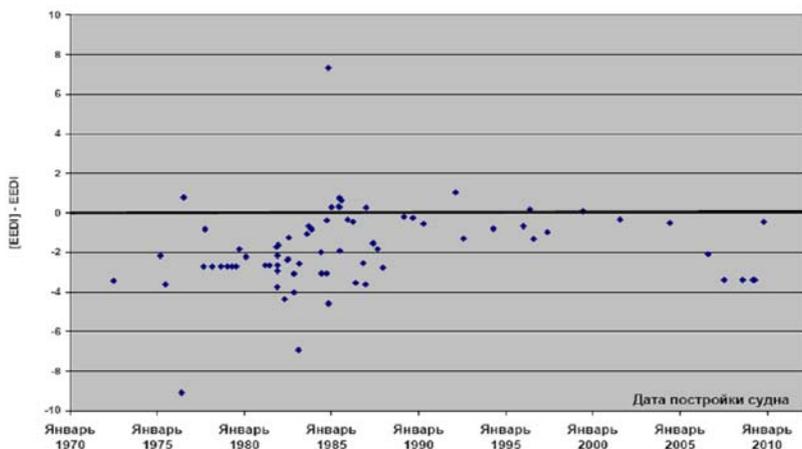


Рис. 15  
Разница между требуемым EEDI и EEDI существующих балкеров дедвейтом более 10000 т с классом PC

## Результаты расчета EEDI танкеров и химовозов

Всего в расчете учитывалось 353 судна, из которых 40 имеют классификационную характеристику «Нефтеналивное/Химовоз».

Результаты расчета для различных ледовых классов показаны на рис.2 –7 и сведены в табл. 5. Из таблицы и рисунков можно сделать вывод, что танкеры с категориями ледовых усилений **Arc5, UL , Arc4, L1** и **Ice3, L2** в классе PC после применения к ним поправочных коэффициентов, разработанных для судов с классами согласно Финско-Шведским ледовым правилам, в абсолютном большинстве отвечают требованиям к EEDI. Почти половина судов с более слабыми категориями ледовых усилений **Ice2, L3** и **Ice1, L4** в классе PC не отвечает требованиям к EEDI, и эта цифра приблизительно совпадает с результатами расчета для судов без ледового класса. Это позволяет с достаточной долей уверенности предположить, что причина несоответствия кроется не в учете дополнительного веса ледовых подкреплений и дополнительной мощности энергетической установки, необходимой для обеспечения работы судна во льдах. Скорее, причина в избыточной мощности энергетической установки, которую судовладелец (пока не ограниченный в этом) считает необходимым иметь на судне для более надежной эксплуатации и соблюдения сроков дисциплины доставки груза. При этом полная мощность энергетической установки используется достаточно редко.

Кроме того, среди судов, которые не соответствуют требованиям по EEDI, присутствует большое число судов смешанного (река-море) плавания. Это многое объясняет, так как эти суда конструктивно приспособлены к плаванию на мелководье и, как следствие, имеют малую осадку, уменьшенный диаметр винтов и, как правило, два винта вместо одного; часто в качестве движителей применяются винто-рулевые колонки. Все перечисленные факторы существенно уменьшают пропульсивный коэффициент и энергоэффективность механической установки судна. Было бы правильно ввести специальный поправочный коэффициент для судов, работающих на мелководье и в реках, что, как нам известно, в настоящее время обсуждается в ИМО.

В целом, можно сделать вывод, что поправочные коэффициенты, предлагаемые для танкеров с ледовыми усилениями по Финско-Шведским правилам, вполне могут быть

применимы для танкеров с эквивалентным ледовым классом РС.

Танкеров с ледовыми классами, которые предполагается в МПК отнести к категории А с механической передачей мощности на винт, в настоящее время в классе РС нет. Все существующие танкеры с категориями ледовых усилений **Arc7** и **Arc6** в классе РС (всего 6 судов трех проектов) имеют электрическую передачу на винт, а поэтому применять к ним методику расчета, изложенную в резолюции МЕРС.212(63) [3] не правомерно. Другую методику ИМО пока не предлагает.

### **Результаты расчета EEDI судов для генгуза**

Всего в расчете учитывалось 1043 [01] судна дедвейтом 3000 и более. Результаты расчета для различных ледовых классов показаны на рис. 8 - 12 и сведены в табл. 5. Из таблицы и рисунков можно сделать вывод, что суда для генгуза с категориями ледовых усилений **Arc5**, **UL**, **Arc4**, **L1** и **Ice3**, **L2** в классе РС после применения к ним поправочных коэффициентов, разработанных для судов с Финско-Шведскими классами, в абсолютном большинстве отвечают требованиям к EEDI, так же как и танкеры.

При этом для судов без ледового класса и судов с категорией ледового усиления **Ice1** процент несоответствия достигает 50%, что совпадает с результатами расчета для танкеров.

Существующие суда с категорией ледового усиления **Arc7** в настоящее время не имеют соответствующего поправочного коэффициента. Применение к ним поправочного коэффициента для категории ледового усиления **Arc5** не позволяет судам выполнять требование конвенции к EEDI (это хорошо иллюстрирует рис. 8).

Наиболее правильным путем решения этой проблемы представляется не применять требования к EEDI для судов категории А. В настоящее время в ИМО обсуждается проект поправок к действующей резолюции МЕРС.212(63), в которой предлагается освободить от выполнения требований к EEDI суда, обладающие ледопроеходимостью 1 м. Согласно циркулярному письму ИМО № 3370 с проектом поправок к Приложению VI МК МАРПОЛ 73/78, от требований к EEDI освобождаются «...грузовые суда, спроектированные для эксплуатации во льдах ... и предназначенные для независимой эксплуатации во льдах со скоростью по меньшей мере 2 уз при толщине льда 1 м или

более, имеющего прочность на изгиб не менее 500 кПа». Согласно 2.2.3.4 (табл. 2.2.3.4-3) части I «Классификация» Правил классификации и постройки морских судов Регистра, указанной способностью ходить во льдах обладают суда с категорией ледового усиления **Arc 6** и выше (самостоятельное преодоление непрерывным ходом стыков ледовых полей толщиной 1,1 м в течение зимне-весенней навигации и 1,3 м в течение летне-осенней). Для судов с категорией **Arc 5** допускается самостоятельное преодоление непрерывным ходом стыков ледовых полей толщиной 1,0 м в течение только летне-осенней навигации. Таким образом, если данная поправка будет принята на суда с категориями ледовых усилений **Arc9 – Arc6**, требования к EEDI применятся не будут.

#### **Результаты расчета EEDI для рефрижераторных судов**

Всего в расчете учитывалось 105 судов дедвейтом более 3000, имеющих в классификационной символике словесную характеристику «Рефрижераторное» или «Рыботранспортное судно». Судов с категорией ледовых усиления выше **Arc4** среди них не оказалось. Результаты расчета для различных ледовых классов сведены в табл. 5. Из таблицы можно сделать вывод, что абсолютное большинство судов с ледовыми классами после применения к ним поправочных коэффициентов, разработанных для судов с Финско-Шведскими классами, в абсолютном большинстве отвечают требованиям к EEDI, в то время как всего 65 % судов без ледового класса соответствуют этим требованиям. В целом картина по рефрижераторным судам очень напоминает картину по судам для генгруза.

#### **Результаты расчета EEDI для балкеров**

Всего в расчете учитывалось 75 судов дедвейтом более 10000, имеющих в классификационной символике словесную характеристику «Рудовозы и навалочные суда». Результаты расчета для различных ледовых классов сведены в табл. 5. Из таблицы можно сделать вывод, что подавляющее большинство судов-балкеров как с ледовыми классами, так и без них не отвечают требованиям к EEDI. На рис. 14 представлены результаты расчета EEDI всех существующих балкеров дедвейтом более 10000 т, классифицированных Регистром вне зависимости от ледового класса с учетом поправок на ледовый класс.

Попытки анализа и определения фактора, который бы являлся основной причиной такого несоответствия существующих балкеров нормам по EEDI, ничего не дали. Например, средняя скорость балкеров, соответствующих нормам, 13,98 уз, а средняя скорость не соответствующих нормам – 14,33 уз, то есть разница не существенна. Не наблюдается зависимость соответствия нормам по EEDI и от даты постройки судна. Это видно из диаграммы на рис. 15, где показана разница между EEDI существующих балкеров и требуемого EEDI для этих судов. При этом если судно соответствует нормам по EEDI, то разница будет больше нуля. Как видно из диаграммы, доля судов, соответствующих нормам по EEDI, не зависит от года постройки. Выборочная проверка соответствия мощности главного двигателя существующих балкеров требованиям к мощности в зависимости от ледового класса показала их соответствие, а также отсутствие избыточных мощностей по сравнению с требованиями Правил РС.

В настоящее время требования к минимальной мощности главного двигателя для судов различных ледовых классов в правилах РС никак не связано с типом и назначением судна. Существенно более суровые требования по EEDI для балкеров, по сравнению с судами других типов (суда для генеральных грузов, рефрижераторы, танкеры), приводит к мысли о необходимости провести для балкеров специальный анализ требований Правил РС к судам ледового класса и возможности их выполнения одновременно с требованиями по EEDI.

### **Выводы**

Путем расчета EEDI существующих судов с классом Регистра проверена адекватность применения поправочных коэффициентов для судов ледового плавания с классом Регистра (танкеров, рефрижераторов, судов для генгруза и балкеров). По результатам расчета большинство танкеров, рефрижераторов и судов для генгруза с категориями ледовых усилений **Arc 5**, **Arc 4** и **Ice 3** удовлетворяют требованиям МК МАРПОЛ 73/78 по EEDI для новых судов. При этом процент соответствия уменьшается по мере уменьшения ледового класса. Доля несоответствия для судов с категориями ледовых усилений **Ice 2** и **Ice 1** примерно совпадает с долей несоответствия судов без ледового класса. Таким образом, возможность одновременного выполнения требований правил РС к минимальной мощности главного двигателя и требований

МК МАРПОЛ 73/78 по EEDI для танкеров, рефрижераторов и судов для генгуза не вызывает сомнений.

В то же время расчеты EEDI для балкеров показывают другую картину. Абсолютное большинство существующих судов со словесной характеристикой «Рудовозы и навалочные суда» различных ледовых классов не соответствуют требуемому EEDI, и это не зависит от ледового класса судна, его размеров и года постройки. Проверка возможности одновременного выполнения требований правил РС и требований МК МАРПОЛ 73/78 по EEDI для балкеров дедвейтом более 10000 т может стать предметом дальнейшего исследования.

### **Список литературы**

1. Гришкин В.В. О деятельности в области сокращения выбросов парниковых газов с судов // Науч.- техн. сб. Российского морского Регистра судоходства. – 2011. – Вып. 34. – С. 153 – 166
2. Resolution мепс.203(62) - amendments to the annex of the protocol of 1997 to amend the international convention for the prevention of pollution from ships, 1973, as modified by the protocol of 1978 relating thereto (Inclusion of regulations on energy efficiency for ships in MARPOL Annex VI), итоговый отчет МЕРС 62/24/Add.1, Annex 19, ИМО. 2011, 17 с.
3. RESOLUTION МЕРС.212(63) – 2012 Guidelines on the method of calculation of the attained Energy Efficiency Design Index (EEDI) for new ships - итоговый отчет МЕРС 63/23, Annex 8, ИМО, 2012, 20с.
4. HELCOM Recommendation 25/7: Safety of winter navigation in the Baltic Sea Area. .... – Режим доступа: <http://www.helcom.fi>.
5. Каталог дизельные и газовые двигатели / ЦНИДИ. – СПб, 2003. – 219 с.
6. Сорокин В.А., Иванов М.Ю. Сравнительный анализ технико-эксплуатационных характеристик отечественных и зарубежных судовых дизельных двигателей мощностью до 3 МВт // Науч.- техн. сб. Российского морского Регистра судоходства. – 2012. – Вып. 35. – С. 111 – 131.
7. Егоров Г.В., Колесник Д.В. Энергоэффективность судов смешанного плавания нового поколения // Морской Вестник. – 2012. – № 4 (44). – С. 97-103.
8. Riska K. Propulsion power for ice-strengthened and ice-going ships - документ DE 57/11/8, ИМО, Материалы 57-й сессии подкомитета по конструкции и оборудованию судов, 2013, 13 с.

**В.А. Сорокин** канд. техн.наук, доц., ЗАО «ЦНИИМФ»

## **АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ И ТЕНДЕНЦИЙ РАЗВИТИЯ СУДОВЫХ ДВУХТОПЛИВНЫХ ДИЗЕЛЕЙ**

*Ключевые слова:* двухтопливные судовые дизели, сжиженный природный газ, параметры, разработка, совершенствование

### **Введение**

В настоящее время на судах различного назначения традиционно в основном применяются два вида нефтяных моторных топлив:

- дистиллятные топлива, которые состоят из легких фракций, полученных методом дистилляции в прямоточных или крекинг-процессах – вязкость топлив 2,5-15 сСт при 50 °С (MDO, DMA-X);
- тяжелые топлива: промежуточные (IFO) с вязкостью 30-180 сСт при 50 °С; тяжелые остаточные топлива (HFO) с вязкостью 180-750 сСт при 50 °С.

По оценкам и прогнозам специалистов, промышленных запасов нефти хватит еще примерно на 40-60 лет, в то время как запасов природного газа – более чем на 100 лет. К сожалению, за последние 25 лет не было открыто ни одного значительного месторождения нефти. Эксперты прогнозируют, что к 2025 г. произойдет значительное истощение ее запасов в связи со значительно возросшим уровнем потребления моторных топлив, следствием чего будет дефицит нефтепродуктов с естественным ростом их стоимости и использование альтернативных видов моторных топлив.

Дополнительным стимулом использования альтернативных видов топлив является экологические требования и нормы, которые установлены Приложением VI к Международной конвенции по предотвращению загрязнения с судов (МК МАРПОЛ 73/78) к выбросам окислов азота  $NO_x$  и серы  $SO_x$  в выхлопных газах судовых дизелей. Если количество выбросов  $SO_x$  связано с содержанием серы в топливе, то содержание  $NO_x$  связано с организацией термодинамического цикла двигателя – главным

образом с максимальной температурой процесса горения топлива и его продолжительностью. Постоянное ужесточение норм выбросов  $\text{NO}_x$  и  $\text{SO}_x$  в двигателях при плавании судов в различных регионах, включая в первую очередь районы контроля выбросов (SECA) – Балтийское (NECA) и Северное моря, Английские проливы и др., задействование и использование практически всех технических решений по снижению выбросов  $\text{NO}_x$  и  $\text{SO}_x$  вызывает необходимость поиска и разработки новых видов альтернативных топлив с улучшенными экологическими свойствами.

Особо следует отметить, что экологические показатели выбросов с выхлопными газами  $\text{NO}_x$  и  $\text{SO}_x$  в настоящее время являются одними из основных показателей конкурентоспособности судовых дизельных установок, так как удовлетворение жестким нормам становится все более проблематичным. Снижение выбросов при работе на нефтяных топливах связано со значительным удорожанием как самого топлива, так и дизельной установки в целом при использовании систем очистки выхлопных газов, инновационных конструктивных решений и др. С учетом стоимости топливной составляющей, равной примерно 60-70 % в эксплуатационных расходах судна, внедрение различных мероприятий, улучшающих экологические показатели двигателей, приведет к значительному росту судовых эксплуатационных расходов и материальных затрат.

Таким образом, применение альтернативных моторных топлив в судовых энергетических установках (СЭУ) становится все более актуальным.

В настоящее время во всех развитых странах мира проводятся масштабные исследования по разработке и производству альтернативных моторных топлив, имеющих доступные запасы и обеспечивающих потребность на ближайшие столетия. Целями исследований также являются разработка и создание двигателей, приспособленных для работы на новых видах топлива, а также национальных концепций по альтернативным топливам.

Для использования альтернативных видов топлива в СЭУ необходимы:

- анализ возможных видов альтернативного топлива и перспектив их использования;
- экономическая и экологическая привлекательность и значительные доступные запасы сырья для производства топлива;

- отсутствие неразрешимых технических проблем при использовании новых видов топлива;
- приемлемый уровень материальных затрат на установку на судне дополнительного оборудования;
- эксплуатационная безопасность и минимальные риски при применении топлива;
- наличие инфраструктуры по производству топлива, бункеровочным средствам и базам, а также широкого присутствия его на рынке;
- возможность использования топлива на транспортных средствах различного функционального назначения.

### **Особенности применения альтернативного моторного топлива - природного газа**

В настоящее время в качестве альтернативного моторного топлива для СЭУ может рассматриваться природный газ (ПГ). Россия располагает огромными запасами ПГ, не требующими для его использования в двигателях никакой химической переработки.

Применение ПГ в качестве топлива на судах имеет уже продолжительную историю, которая связана, прежде всего, с судами-газовозами, на которых газ успешно применяется как основное топливо на протяжении многих десятилетий. Для судов-газовозов основным нормативным документом был и остается Международный кодекс постройки и оборудования судов, перевозящих сжиженные газы наливом (Кодекс IGC), в котором 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.

К числу важнейших качеств ПГ, делающих его привлекательным для судовой энергетики и позволяющих создавать эффективные двигатели с низким содержанием вредных выбросов, относится, прежде всего, его высокая экологичность. Использование ПГ позволяет существенно сократить вредные выбросы в сравнении с топливом на основе нефти: полностью исключить выбросы серы, до 90 % снизить выбросы оксидов азота ( $\text{NO}_x$ ) и существенно (до 30 %) снизить выбросы диоксида углерода ( $\text{CO}_2$ ) и твердых частиц.

Экономические и экологические преимущества газового топлива очевидны, однако возникают опасности при его хранении и использовании. В первую очередь они связаны с его утечками в результате разгерметизации трубопроводов или емкостей для хранения газа.

Использование ПГ в судовых дизельных энергетических установках (ДЭУ) рассматривается как одна из тенденций развития судовой энергетики, при этом оно связано с решением комплекса проблем, обусловленных физико-химическими свойствами газа, созданием соответствующей инфраструктуры для бункеровки судов и современных судовых дизельных двигателей, эксплуатирующихся на газообразном и нефтяном топливах (dual fuel), а также хранением запаса газа на судне, обеспечением взрыво- и пожаробезопасности и др.

Перевозка сжиженного ПГ на судах-газовозах принципиально отличается от всех других видов судоходства постоянным присутствием газа практически во всех частях транспортного процесса от погрузки до выгрузки, включая постоянное взаимодействие груза с СЭУ.

Как моторное топливо ПГ в натуральном виде превосходит дизельное топливо. При его использовании в двигателях внутреннего сгорания обеспечиваются их высокие технико-экономические показатели, сопоставимые с параметрами при работе на нефтяных жидких топливах.

Следует отметить, что применение сжиженного природного газа (СПГ) на судах не ставит неразрешимых технических задач перед проектировщиками, судостроителями и эксплуатационниками, и все проблемы в настоящее время решены на современном уровне развития науки и техники.

Актуальность проблемы объясняется в первую очередь тем обстоятельством, что в настоящее время и на обозримую перспективу дизель остается доминирующим типом самого экономичного двигателя пропульсивных комплексов для судов различного назначения. Для СЭУ альтернативы дизелю не существует. Дизелестроение является одной из наиболее наукоемких отраслей, а дизели и ДЭУ относятся к одним из самых сложных изделий, определяющих уровень развития промышленности и имеющих стратегическое значение для государства.

Основой ПГ является метан. Его содержание в ПГ в зависимости от месторождения составляет (77-99 %), т.е. он является основным компонентом.

Значительные запасы ПГ в России, его уникальные физико-химические свойства, улучшенные экологические показатели в сравнении с традиционными видами топлив позволяют рассматривать ПГ как один из видов перспективных моторных топлив для СЭУ.

Следует отметить, что при нормальных условиях метан имеет плотность примерно в 1200 раз меньшую, чем дизельное топливо, что не позволяет его использовать и хранить на судне при нормальной температуре и давлении.

Сжиженный природный газ (СПГ, LNG - Liquefied Natural Gas,) - это охлажденный до перехода в жидкую фазу природный газ, криогенная жидкость. При переходе из газообразного состояния в жидкое объем газа уменьшается в 613 раз. СПГ – не самостоятельный промышленный продукт, а форма его состояния для транспортировки на судах. Метан используется в качестве моторного топлива в СЭУ в сжиженном состоянии при низкой температуре ( $-162\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) при атмосферном давлении.

Существенным фактором, препятствующим широкому использованию газового топлива при эксплуатации судовых дизелей, является влияние его физико-химических свойств на систему хранения запаса топлива, определяемого исходя из заданной дальности и автономности плавания.

Хранение природного газа в жидкой фазе возможно только при низких температурах ( $-162\text{ }^{\circ}\text{C}$  при атмосферном давлении). Плотность жидкого метана ( $416\text{ кг/м}^3$ ) примерно в два раза ниже, чем дизельного топлива, и необходимый объем цистерн хранения сжиженного газа возрастает примерно в 1,8 раза (с учетом теплотворной способности топлив) по сравнению с аналогичными судовыми емкостями для дизельного топлива (при сопоставимой автономности плавания). С учетом всех факторов размещение газа на борту судна занимает примерно в 2,5-3 раза больше места, чем дизельного топлива.

Температура самовоспламенения природного газа на  $150-300\text{ }^{\circ}\text{C}$  выше, чем у жидких нефтяных топлив. В связи с этим рабочий процесс газового дизеля может быть реализован только с помощью постороннего источника зажигания.

В связи с повышением технического уровня и совершенства дизелей, оснащенности и энерговооруженности судов, а также ужесточения требований ИМО, ИСО, классификационных обществ и других организаций к конструктивной, экологической и эксплуатационной безопасности резко возросло влияние энергетической установки на технико-экономические показатели как самих судовых дизелей и ДЭУ, так и судна в целом.

Пожароопасность метана, основного горючего компонента природных газов, сравнима с пожароопасностью бензина. Однако метан обладает меньшей по отношению к воздуху плотностью и, следовательно, хорошей летучестью. Поэтому метан легко распространяется в воздухе, может образовать с ним взрывоопасную смесь в ограниченном объеме и вследствие летучести может без проблем быть удален из машинного отделения. Смесь метана с воздухом взрывоопасна при содержании в ней метана от 5 до 15 %.

Обеспечение взрыво- пожаробезопасности влечет за собой необходимость отключения подачи газа на двигатель при возникновении утечек или неисправностей. Это обстоятельство и предопределило использование на судах двухтопливных двигателей с отключением подачи газа в случае обнаружения утечек и автоматический переход на жидкое топливо без изменения режима работы двигателя.

Только природный газ, состоящий преимущественно из метана, может использоваться в СЭУ, так как является единственным топливом, рекомендуемым Кодексом Кодекс IGC к использованию на судах.

Низшая удельная теплота сгорания ПГ принимается равной 48–48,5 МДж/кг, что на 10–15% превышает теплоту сгорания дизельного топлива (42,7 МДж/кг). Хранение запасов ПГ в сжиженном виде возможно только в криогенных емкостях – цистернах, которые могут располагаться на палубе, в специальных отсеках, в машинном отделении и других местах. Для обеспечения большой автономности плавания необходимо иметь значительные запасы газа на борту, что влечет за собой, как правило, снижение грузоподъемности судна за счет использования части пространства грузовых трюмов по сравнению с судном на жидком топливе тех же размеров.

В судовых двухтопливных ДЭУ получили применение дизели, в которых в конце такта сжатия газозоодушнoй смеси осуществ-

вляется подача запальной (пилотной) дозы дизельного топлива. Запальная доза дизельного топлива составляет 0,8–3 % от расхода топлива на полной нагрузке и зависит от конструктивных особенностей дизеля (в первую очередь – от системы и организации регулирования подачи газа), его размерности, уровня форсировки и др.

Конвертирование дизеля в двухтопливный может быть выполнено при переоборудовании дизеля путем:

- установки газозоудшного смесителя во впускной трубопровод;
- конструктивной разработки системы регулирования подачи газа с учетом изменения нагрузочного режима двигателя;
- модернизации топливной системы с обеспечением подачи запальной дозы дизельного топлива.

Двухтопливные дизели, работающие на жидком нефтяном моторном топливе и СПГ, в СЭУ со среднеоборотными дизелями (СОД) в настоящее время могут применяться только в составе дизель-генераторных установок, что оговорено в требованиях большинства классификационных обществ.

Объясняется это тем, что при работе дизель-генератора по нагрузочной характеристике и применении внешнего смесеобразования система регулирования подачи газа для исключения детонационного сгорания газозоудшной смеси должна обеспечить подачу обедненной рабочей смеси. При работе двигателя по винтовой характеристике изменяющимися (регулируемыми) параметрами являются частота вращения и нагрузка. При таких режимах работы двигателя появляется вероятность работы двигателя с детонацией, что недопустимо в эксплуатации. Поэтому, в настоящее время в установках с прямой передачей мощности на гребной винт применяются только двухтопливные крейцкопфные малооборотные двигатели (МОД), установленные на судах-газовозах, с подачей газа в камеру сгорания под высоким давлением (до 30 МПа - внутреннее смесеобразование), что полностью исключает детонацию. Причем на судах данного класса используется испаряющаяся в танках часть перевозимого груза, величина которого составляет в сутки 0,15-0,18 % от общей вместимости грузовых танков.

Анализ полученных в условиях стендовых и натурных испытаний характеристик двухтопливных двигателей с использованием

различных топливных схем свидетельствует, что наилучшими показателями по уровню форсировки и экономичности обладают двигатели с внутренним смесеобразованием, когда газ под высоким давлением (25-30 МПа) подается в цилиндр в конце такта сжатия. Поэтому внутрицилиндровая подача газа является наиболее оптимальной схемой, реализованной в двухтактных крещкопфных малооборотных дизелях, установленных на крупнотоннажных судах-газовозах.

Специальные испытания и опыт эксплуатации судовых дизелей на СПГ показали, что при использовании в качестве топлива газа существенно уменьшается износ деталей и узлов двигателя, а также увеличивается срок службы циркуляционного масла. Газовое моторное топливо не вызывает разжижения и загрязнения картерного масла, метан не смывает масляную пленку с деталей цилиндро-поршневой группы (зеркало цилиндра, юбка поршня, поршневые кольца).

По данным различных отечественных и зарубежных источников, эффект использования газа в качестве моторного топлива оценивается следующим образом:

- срок службы масла увеличивается в 1,4 – 1,6 раз;
- наработка двигателя между плановыми переборками при техническом обслуживании и ремонтах увеличивается в 1,4 – 1,7 раз;
- моторесурс двигателя повышается до 50 %;
- увеличивается срок службы топливной аппаратуры, цилиндрических втулок, выхлопных клапанов, поршней из-за отсутствия нагара и отложений на деталях.

Необходимо еще раз подчеркнуть, что применение СПГ является перспективным направлением использования природного газа в качестве моторного топлива на судах, обеспечивающим экономическую, экологическую, ресурсосберегающую эксплуатационную эффективность.

Анализ современного состояния и тенденций развития как зарубежного, так и отечественного дизелестроения показывает, что основным направлением прогресса в судовом дизелестроении является рост цилиндровой и агрегатной мощности за счет форсирования рабочего процесса, частоты вращения, применения новых конструктивных и инновационных решений.

Конкурентоспособность дизельного двигателя при сравнении между собой двигателей разных производителей (отечественных и

зарубежных) и с другими типами тепловых двигателей во многом определяется его эксплуатационными показателями, к числу которых относятся наиболее важные: эффективная мощность ( $P_e$ ) и удельный эффективный расход топлива  $b_e$ , форсировка по  $P_e$ , надежность, экологичность, моторесурс и др.

Из основных проблем использования двухтопливных двигателей следует отметить неравномерность сгорания по циклам при малой нагрузке, опасность детонации и обеспечение взрывопожаробезопасности.

При работе на газе двигатели по уровню форсировки приближаются к показателям базовых двигателей, работающих на дизельном топливе. При этом на этих двигателях полностью сохраняются или дополнительно оборудуются топливные системы жидкого топлива (работа на дизельном и/или средневязком топливах с вязкостью до 180 сСт при 50 °С). Следует отметить, что для обеспечения надежного воспламенения газа при малых нагрузках двигателей фирмы производители газовых двигателей ограничивают уровень минимальной нагрузки при работе на газе значением 10–15 % от номинальной мощности. При нагрузках менее указанной двигатель должен работать на жидком топливе.

Проектирование, изготовление и доводка двухтопливных двигателей потребовали внедрения новых решений, реализации новых концепций управления процессами смесеобразования и сгорания, разработки расчетно-экспериментальных методов исследований и гидродинамического моделирования, визуализации характеристик сгорания и топографического анализа детонации и интенсивности горения, использование цикла Миллера и системы контроля процесса сгорания, электронного управления подачи газа с оптимизацией ее характеристик, реализации идеологии и новых подходов к системе регулирования двигателя, создание газовых смесителей с новыми решениями и автоматическим поддержанием соотношения воздух-топливо, управления зажиганием и многое другое.

Следует отметить, что ПГ применяется в настоящее время в судовых энергетических установках в качестве моторного топлива не только на газозазах, но и судах различного назначения малого и среднего водоизмещения. В настоящее время по данным зарубежной информации в мире насчитывается около 56 судов,

работающих на сжиженном природном газе, причем в подавляющем числе судовладельцами этих судов являются норвежские компании. Ввиду незначительного водоизмещения судов их бункеровка сжиженным газом производится либо автомобилями газовозами, либо на бункеровочных базах заводов по сжижению газа. Все суда небольшого водоизмещения (DW до 5000 т) эксплуатируются на линиях малой протяженности (коротком плече).

Хранение запасов сжиженного газа на указанных судах (не газовозах) производится в цилиндрических вкладных двухстенных цистернах со сферическими днищами, пространство между вкладными цистернами имеет вакуумную термоизоляцию (сосуд Дюара), обе цистерны изготавливаются из нержавеющей стали. Проблема размещения газа решается, как правило, за счет пространства (объема) грузовых трюмов, примыкающих к машинному отделению, с обеспечением изолированного помещения-отсека для цистерн с газом, коффердамов и помещения с криогенными насосами, испарителями, подогревателями, системами газоснабжения, компрессорами, средствами вентиляции и др., либо их расположения на верхней палубе.

С точки зрения обеспечения максимального времени хранения сжиженного газа без потерь в цистернах предусмотрен отбор испарившейся части газа в систему подачи газа к двигателям либо реконденсационной установке.

В настоящее время производителями судовых двухтопливных двигателей являются следующие фирмы:

- малооборотных: MAN Diesel & Turbo;
- среднеоборотных дизелей: Wartsila Corporation; MAN Diesel & Turbo; Bergen; Roll-Royce; Hyundai.

### **Производство современных двухтопливных судовых малооборотных дизелей**

Судовые МОД используются в качестве главной энергетической установки на газовозах большой вместимости – LNGC. Дизели работают на газообразном или жидком топливе, причем при эксплуатации на газообразном топливе используется испаряющаяся часть перевозимого груза.

Судовые МОД с частотой вращения от 60 до 250 об/мин и агрегатной мощностью от 2,9 до 80 МВт производятся ведущей

фирмой MAN Diesel & Turbo и имеют идентичную конструкцию двигателей.

МОД применяются в СЭУ с прямой передачей мощности на гребной винт. Данный вид передач занимает доминирующее положение на судах транспортного морского флота с дедвейтом более 5,0 тыс. т (около 80 % суммарной мощности главных двигателей).

Существующий типоразмерный ряд современных МОД позволяет выбирать оптимальный вариант пропульсивной мощности для любого перспективного судна. Причем, производителями МОД являются как дизелестроительная корпорация, так и многочисленные лицензиаты. Одним из таких лицензиатов является ЗАО «Управляющая компания «Брянский машиностроительный завод»» (УК БМЗ), который может выпускать современные МОД двух ведущих дизелестроительных фирм – MAN Diesel & Turbo и Wartsila Corporation.

Стремление повысить пропульсивный КПД гребного винта привело к необходимости понижения частоты вращения до 60 об/мин. Выигрыш в КПД составил 4–7 %. Чтобы компенсировать потерю мощности дизеля, вызванную снижением частоты вращения, дизелестроители пошли по пути увеличения отношения хода поршня к диаметру  $S/D$  до 4,5.

Фирма MAN Diesel & Turbo занимает лидирующее положение среди производителей МОД. В настоящее время фирма предлагает на рынок самый широкий спектр двухтопливных двигателей мощностью от 3 до 80 МВт [1,2].

Все МОД типов ME/ME-C/ME-B, т.е. двигатели с электронной системой управления, могут поставляться приспособленными для работы на природном газе с подачей его при высоком давлении. В обозначение двигателей, работающих на газообразном топливе, вводится символ GI (Gas Injection). Мощность, частота вращения и экономичность двигателей остаются такими же, как и у соответствующих моделей двигателей типа ME.

ЗАО «УК БМЗ» в 2011 г. от фирмы MAN Diesel & Turbo получена техническая документация на производство малооборотных двухтактных дизельных двухтопливных двигателей 7S60ME8-GI и 7S65ME8-GI (их параметры представлены в табл. 1), предназначенных для энергетической установки судов – газозовов, включая суда ледового плавания.

Таблица 1

**Параметры малооборотных двухтактных двухтопливных дизельных двигателей нового поколения**

Параметр	Значение для двигателя	
	7S60ME8-GI	7S65ME8-GI
Максимальная длительная мощность (МДМ), кВт	16600	20090
Среднее эффективное давление, МПа	2,0	2,0
Частота вращения при МДМ, мин <sup>-1</sup>	105	95
Диаметр цилиндра, см	60	65
Ход поршня, см	240	273
Число цилиндров, шт.	7	7
Удельный расход топлива при МДМ, г/кВтч	171	171
Длина двигателя, мм	9160	10320
Ширина двигателя, мм	3770	4124
Высота двигателя, мм	9725	11025
Масса двигателя, т	414	575
Срок службы, лет	>25	>25
Моторесурс, ч	>200000	>200000
Вид топлива	Газ, тяжелое	Газ, тяжелое

*Двигатели ME-GI для газозовозов LNG*

Поколение двигателей MC/ME эксплуатируется практически во всех СЭУ - на контейнеровозах, танкерах, балкерах, сухогрузах общего назначения и др.

Концепция двигателей типа GI фирмы MAN Diesel & Turbo для стационарного и судового применений одобрена в 1994 г. всеми основными классификационными обществами. Технически имеются только небольшие различия между двигателями, работающими на жидком топливе и газе, но двигатели ME-GI обеспечивают оптимальную гибкость в выборе типа топлива.

К дополнительным компонентам, обеспечивающим эксплуатацию двигателя на газообразном топливе, относятся следующие:

- линия подачи газа включает в себя двухстенный вентилируемый трубопровод и датчики наличия углеводородов для аварийной остановки двигателя;

- для лучшего управления газовым двигателем к хорошо зарекомендовавшей себя системе управления дизелей типа ME в

кооперации с фирмой Burckhardt Compression AG and Kongsberg сделаны дополнения и усовершенствования.

Кроме указанной системы, расположенной на двигателе, он должен располагать следующими дополнительными устройствами:

- системой вентиляции пространства между внутренними и наружными трубами двустенного газового трубопровода;

- системой герметизирующего масла, обеспечивающей маслом устройство герметизации газовой и управляющей частей газовой форсунки;

- системой инертного газа, которая дает возможность очистить газовую систему с помощью инертного газа;

- аварийно-предупредительной системой, включающей в себя анализатор содержания углеводородов в воздухе двустенных трубопроводов.

Система управления и защиты двигателя GI спроектирована по принципу "*fail to safe condition*" (безопасное состояние). Все неисправности, обнаруженные при работе на газе, включая неисправность самой системы управления, ведут к прекращению подачи газа и к переводу на дизельное топливо. При этом производится сброс давления и очистка от газа труб высокого давления и всей системы подачи газа. Перевод на жидкое топливо всегда происходит без снижения нагрузки дизеля.

Газ высокого давления из общего трубопровода поступает по тонким и гибким трубам к клапанам блокам и аккумуляторам каждого цилиндра. Эти ответвления решают следующие основные задачи:

- отделяют систему каждого цилиндра от динамических явлений в общем трубопроводе;

- служат гибким соединением с жестким общим трубопроводом и другими компонентами дизеля, предотвращая чрезмерные напряжения, связанные с неравномерными термическими расширениями в разных частях двигателя.

Буферная емкость, объем которой равен примерно объему 20 цикловых подач газа при номинальной мощности (MCR), также решает важные задачи:

- обеспечивает подачу впрыскиваемого газа при небольшом, предварительно определенном падении давления;

- составляет важную часть системы защиты.

Поскольку для подачи газа используется система Common Rail, форсунка управляется специальной гидравлической системой.

Она включает в себя гидравлическую систему управления двигателями типа ME, электронно-управляемый клапан впрыска газа ELGI (*electronic gas injection valve*) и поставляет к форсунке гидравлическое масло высокого давления, управляя фазой ее открытия.

### *Система впрыска ME-GI*

Работа двигателя на газе требует впрыска в камеру сгорания запального топлива. Для этой цели используются форсунки разного типа – две для подачи газа и две для жидкого топлива. Для впрыска требуются вспомогательные системы подачи:

- газа высокого давления;
- запального топлива;
- гидравлического масла, управляющего работой газовой форсунки;
- уплотняющего масла.

Конструкция форсунки для подачи газа следующая. Газ подается к форсунке через сверления в крышке цилиндра. Для предотвращения утечки газа в зазоры между крышкой цилиндра, форсункой и корпусом форсунки иглой установлены уплотняющие кольца из материала, стойкого к воздействию температуры и газа. Протечки через уплотняющие кольца по сверлениям в форсунке отводятся в межтрубное пространство газоподводящего трубопровода. Эта утечка обнаруживается датчиком контроля наличия углеводородов.

Газ воздействует на иглу форсунки с давлением около 250 бар. Для предотвращения попадания газа в систему управления форсункой через зазор между иглой и направляющей давление уплотняющего масла поддерживается выше давления газа на 25 – 30 бар.

Форсунка запального топлива имеет стандартную для дизелей типа ME конструкцию за исключением распылителя. Давление топлива постоянно контролируется системой защиты с целью обнаружения неисправностей в работе форсунки. Запальная форсунка спроектирована так, что двигатель при работе на жидком топливе может нагружаться до 100% мощности. В случае постоянной работы на жидком топливе рекомендуется заменять распылители форсунок и получать до 1% экономии топлива при работе на полной мощности.

Для подачи газа в двигатель под высоким давлением система дополнительно оборудуется специальным компрессором и трубопроводом, расположенными в машинном отделении.

Газовоздушный процесс при внутреннем смесеобразовании с непосредственным впрыском газа в цилиндр реализован на всех двухтопливных МОД, выпускаемых фирмой MAN Diesel & Turbo.

Фирма Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. (MHI) в настоящее время разрабатывает двухтопливный новый дизель, который будет дополнять линейку дизелей серии Mitsubishi UEC. Поставка дизелей на рынок предполагается в 2015 г.

Для двухтопливного дизеля фирма MHI разрабатывает новые компоненты для возможности работы на двух видах топлива, включая новую систему непосредственного впрыска топлива, систему подачи газа и систему управления. Предварительные испытания на одноцилиндровом опытном отсеке предполагается выполнить в течение 2013 года. Затем предполагается выполнить классификационные испытания полноразмерного двухтопливного двигателя с диаметром цилиндра 600 мм мощностью 11000–18000 кВт для возможности поставки на рынок.

Двухтактные МОД на газообразном топливе в настоящее время концерном Wartsila Corporation на рынок не предлагаются. На заводе в Триесте заканчиваются испытания двухтопливного МОД типа RTX5, отвечающего экологическим требованиям IMO Tier III.

### **Производство современных судовых двухтопливных среднеоборотных дизелей**

Судовые двухтопливные среднеоборотные дизели (СОД) используются в дизель-электрических энергетических установках для привода генераторов (главных и/или вспомогательных). Дизели эксплуатируются на судах-газовозах на испаряющейся части сжиженного природного газа и углеводородном топливе, либо на других судах дедвейтом до 800 т на сжиженном природном газе, находящемся на судне в криогенных бункеровочных цистернах.

Как было указано, главным достоинством дизель-электрических агрегатов с СОД является возможность их использования при создании новых типов прогрессивных судов, для которых необходимы низкие машинные помещения и главные установки большой мощности.

Развитие судового дизелестроения за последние время характеризуется созданием и освоением целого ряда новых типов СОД тронкового типа, предназначенных в основном для привода гребного винта через гребные электродвигатели, винторулевые колонки или редукторные агрегаты [3].

Анализ характеристик двухтопливных СОД, производимых ведущими дизелестроительными фирмами, дает возможность сделать по ним следующие заключения:

агрегатная мощность – 600–18000 кВт;

частота вращения – 500–1000 об/мин;

число цилиндров – 6,7,8,9L; 12,14,16,18V;

цилиндровая мощность – 175–1000 кВт;

среднее эффективное давление при работе на газе – 19,5–20,0 бар;

диаметр цилиндра – 20,0–51,0 см;

отношение хода поршня к диаметру цилиндра – 1,16–1,57;

скорость поршня – 9,1–11,6 м/с;

удельный расход топлива – 164–191 г/кВтч;

вид топлива – GO, MDO, HFO (до 780 сСт при 50 °С), природный газ с метановым числом более 80.

Увеличение цилиндровой мощности достигается форсировкой двигателя по частоте вращения и среднему эффективному давлению или увеличением рабочего объема цилиндра. Число оборотов СОД, как правило, ограничивается 500–600 об/мин для сохранения приемлемых значений средней скорости поршня  $C_m$ , определяющей величину механических и термических нагрузок, а следовательно, долговечность и надежность основных узлов двигателя.

Возможности повышения агрегатной мощности за счет роста средней скорости поршня для этого класса двигателей сверх установившихся значений весьма ограничены, что подтверждается крайне медленным ростом  $C_m$  за прошедшие годы. Следует предположить, что значение средней скорости поршня для мощных СОД не превысит 11,5–12,5 м/с [3].

Среднее эффективное давление  $P_e$  является более гибким средством повышения цилиндровой мощности, чем  $C_m$ . Этим путем идут все зарубежные фирмы, о чем свидетельствует постоянный рост  $P_e$ .

Ведущими фирмами – производителями двухтопливных судовых дизелей являются: Wartsila Corporation, MAN Diesel &

Turbo, Roll-Royce, Hyundai и целый ряд фирм, выпускающих двигатели мощностью до 1000 кВт.

*Двигатели фирмы Wartsila Corporation*

Компания является ведущим поставщиком эффективных и гибких технологий производства СЭУ на основе двигателей внутреннего сгорания, работающих на различных жидких и газообразных видах топлива.

Параметры производимых фирмой двухтопливных СОД представлена в табл. 2 [ 4]. Представленные в ней двигатели Wartsila — это четырехтактные СОД, приспособленные для работы как на легком и/или тяжелом жидком топливе, так и на природном газе. Главная их особенность — это возможность автоматического или по команде оператора переключения с жидкого на газообразное топливо и обратно в любом режиме работы (переключение длится около одной минуты). В случае прерывания подачи газа дизель без остановки немедленно автоматически переводится на жидкое топливо. К двигателю газ подводится по общему трубопроводу с ответвлениями к клапанам на каждом цилиндре. Все трубопроводы имеют двойные стенки.

Таблица 2

**Параметры СОД фирмы Wartsila на двойном топливе**

Параметр	Wartsila 20DF	Wartsila 34DF	Wartsila 50DF
Диаметр цилиндра, мм	200	340	500
Ход поршня, мм	280	400	580
Частота вращения, об/мин	1000/1200	720/750	500/514
Цилиндровая мощность, кВт	146/176	435/450	950/975
Число цилиндров	6L,8L,9L	6L,9L,12V,16V	6L, 8L, 9L, 12V, 16V, 18V
Агрегатная мощность, кВт	876-1584	2700-7200	5700/17550
Среднее эффективное давление, бар	20	20,0/19,8	20
Средняя скорость поршня, м/с	9,3/11,2	9,6/10,0	9,7/9,9

Параметр	Wartsila 20DF		Wartsila 34DF
Удельный расход топлива, г/кВтч	199/194	BSEC 7700 kJ/kWh	BSEC 7410 kJ/kWh
Применяемое топливо	ISO-F-DMX, DMA и DMX, Природный газ	700 cSt /50C ISO-F-DMX, DMA и DMX, природный газ Metan number: 80 LNV: min 24 MJ/Nm <sup>3</sup> , 5-5 bar	700 cSt /50C ISO-F-DMX, DMA и DMX, природный газ Metan number: 80 LNV: min 28 MJ/Nm <sup>3</sup> , 5-5 bar
Удельная масса дизеля, кг/кВт	19,4/15,2 (вместе с электрогенератором)	12,6/10,4	16,8/14,0
Мощность генератора, кВт	841/1521	2510/6680	5500/16940
КПД генератора	0,96	0,93	0,96

При работе на газе воспламенение рабочей смеси производится подачей «запального» легкого топлива, расход которого не превышает 1% от расхода на полной нагрузке. Количество подаваемого «запального» топлива регулируется автоматически в зависимости от скоростного и нагрузочного режима работы двигателя.

При работе на газе дизели в отношении эмиссии вредных выбросов соответствуют требованиям IMO Tier III, а при работе на жидком топливе - требованиям IMO Tier II Конвенции MARPOL 73/78.

Двигатели типа Wartsila DF могут поставляться в сборе с электрогенераторами, работающими с постоянной частотой вращения.

#### *Топливная система*

Двигатели Wartsila DF спроектированы для длительной работы на природном газе или на дизельном топливе (MDF). Возможна также работа на тяжелом топливе (HFO). Работу на двойном топливе обеспечивает внешняя система подачи газа и система подачи топлива.

### *Газовая система*

Газовая система на двигателе включает в себя следующие встроенные компоненты:

- трубопровод (Common Rail pipe) для газа низкого давления;
- газовпускной клапан для каждого цилиндра;
- контрольные фильтры на каждом газовпускном клапане;
- клапан для вентиляции трубопровода Common Rail;
- газовые трубопроводы с двойными стенками.

Трубопровод Common Rail служит для поставки газа к каждому впускному клапану. Это полностью сварная труба большого диаметра, которая одновременно является аккумулятором давления. Питающие трубы подают газ от Common Rail к впускным клапанам, расположенным на каждом цилиндре. Газовпускные клапаны (один на цилиндр) управляются электронной системой и срабатывают для обеспечения каждого индивидуального цилиндра требуемым количеством газа. Клапаны расположены на крышках цилиндров (V-образные двигатели) или на впускном патрубке цилиндрической крышки (рядные двигатели). Газовпускной клапан – соленоидный клапан прямого действия – закрывается пружиной при отсутствии электрического сигнала. Система управления двигателем дает возможность регулировать количество подаваемого в каждый цилиндр газа на работающем двигателе.

Вентиляционный клапан Common Rail используется для выпуска газа из системы, когда двигатель переводится с режима работы на газе на дизельное топливо. Клапан открывается пневматически системой управления двигателем.

### *Впрыск основного топлива*

Основная система впрыска жидкого топлива используется при работе в дизельном режиме. Когда дизель работает на газе, топливо постоянно прокачивается через эту систему, тем самым обеспечивая возможность немедленного перехода на дизельный режим.

Расположенная на двигателе часть системы включает в себя следующие элементы для каждого цилиндра:

- топливоподающий насос;
- трубопровод высокого давления;
- сдвоенную топливную форсунку.

Топливный насос моноблочного типа спроектирован на создание давления до 150 МПа. Насосы снабжены встроенными роликовыми толкателями, а также пневматическими стоп-цилиндрами, соединенными с системой предотвращения разноса дизеля. Трубопровод высокого давления соединяет топливный насос с форсункой. Трубки с двойными стенками размещены в закрытом пространстве.

Сдвоенная форсунка, расположенная центрально в крышке цилиндра, имеет два распылителя – для запального и основного топлива. Распылитель основного топлива закрывается традиционно – иглой, нагруженной пружинной.

Вся система основного топлива помещена в кожух и отделена от газовыпускной системы и системы смазки, что обеспечивает пожаробезопасность и предотвращает возможность загрязнения масла.

#### *Впрыск запального топлива*

Система впрыска запального топлива используется для зажигания газозоудшной смеси при работе на газе. Она включает в себя:

- фильтр запального топлива;
- высоконапорный насос системы Common Rail;
- трубопровод Common Rail;
- сдвоенную топливную форсунку на каждом цилиндре.

Фильтр запального топлива – сдвоенный, полнопроточный с тонкостью очистки 10 мкм.

Высоконапорный насос системы Common Rail навешивается на двигатель, если он работает на генератор, или имеет автономный электрический привод. Насос монтируется на свободном торце дизеля. Создаваемый насосом напор контролируется системой управления двигателя и составляет около 100 МПа.

Запальное топливо насосом подается в трубу Common Rail малого диаметра. Эта труба подает топливо к каждой форсунке и одновременно является аккумулятором давления, предотвращающим пульсацию топлива. Трубопровод высокого давления имеет двойные стенки и помещен в закрытый кожух.

Часть двойной форсунки, предназначенная для запального топлива, имеет иглу, которая открывается соленоидом по сигналам системы управления двигателя. При работе на дизельном режиме

подача запального топлива продолжается для того, чтобы игла и распылитель оставались чистыми.

Топливоподающая система самого популярного и востребованного трехтопливного двигателя Wartsila 50DF следующая. В трехтопливной модификации двигателя для работы на мазуте используются двойные форсунки. Дизельное запальное топливо также используется при работе на мазуте для охлаждения и очистки форсунок запального топлива.

Время, необходимое для достижения полной мощности при переходе на газ, зависит от продолжительности работы двигателя на мазуте. Расход запального топлива менее 1 %.

На рисунке представлена схема перехода трехтопливного двигателя Wartsila 50DF с газа на мазут и обратно.

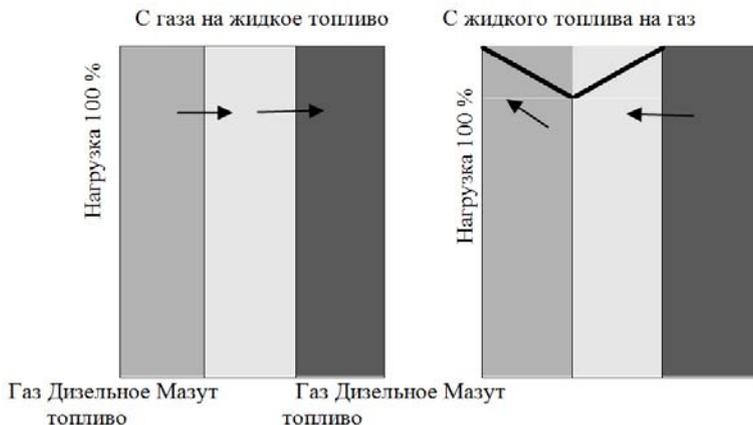


Схема перехода с одного вида топлива на другой двигателя Wartsila 50DF

Фирма Wartsila единственная представляет на продажу развернутый типоразмерный ряд судовых двухтопливных СОД агрегатной мощностью 876-17550 кВт в рядном и V-образном исполнении.

### *Двигатели фирмы MAN Diesel & Turbo*

Фирма MAN Diesel & Turbo предлагает двухтопливный СОД типа DF только одной размерности 51/60. В табл. 3 приведены технико-эксплуатационные и конструктивные параметры двигателя [1].

Таблица 3  
Параметры СОД фирмы MAN Diesel & Turbo на двойном топливе

Параметр	MAN V51/60 DF	MAN L51/60 DF
Диаметр цилиндра, мм	510	510
Ход поршня, мм	600	600
Частота вращения, об/мин	514/500	514/500
Цилиндровая мощность, кВт	1000/975	1000/975
Число цилиндров	12,14,16,18	6,7,8,9
Агрегатная мощность, кВт	12000-18000	6000-9000
Среднее эффективное давление, бар	19,1	19,1
Средняя скорость поршня, м/с	10,28/10,0	10,28/10,0
Применяемое топливо	HFO, газ с метановым числом $\geq 80$ , LNV $\geq 28$ , MJ/Нм <sup>3</sup> 184 г/кВтч	HFO, газ с метановым числом $\geq 80$ , LNV $\geq 28$ , MJ/Нм <sup>3</sup> 184 г/кВтч
Удельный расход топлива, кДж/кВтч	7260	7260
Удельная масса дизеля, кг/кВт	14,7/15,6	16,4/17,7
Удельный расход масла, г/кВтч	0,5	0,5

Дизели на двойном топливе корпорации MAN Diesel & Turbo эффективно работают на жидком топливе или на природном газе с возможностью переключения с газа на жидкое топливо и обратно без изменения режима работы. Дизели могут работать на природном газе с метановым числом не ниже 80 без каких либо регулировок. При более низком метановом числе фирма может предложить приемлемое решение.

Оптимизированная камера сгорания обеспечивает очень низкий удельный расход топлива при работе как на газе, так и жидком топливе.

### *Газовое топливо*

При эксплуатации на природном газе двигатель MAN 51/60DF по выбросам  $\text{NO}_x$  отвечает ограничениям IMO Tier III, установленным для районов контроля выбросов.

### *Система зажигания "Micropilot"*

Специально разработанная система позволяет воспламенять газообразное топливо путем впрыска дистиллятного топлива в количестве 1 % от количества жидкого топлива, потребного для работы двигателя на полной мощности при использовании только дизельного топлива.

### *Жидкое топливо*

Двигатель удовлетворяет требованиям IMO Tier II в части эмиссии  $\text{NO}_x$  как при работе на дистиллятном топливе (MDO), так и на тяжелом топливе (HFO).

### *Запоздалый впрыск (RI – Retarded injection)*

Используется система запаздывания подачи топлива, которая снижает выделение теплоты сгорания, тем самым понижая пиковую температуру в камере сгорания.

### *Система Common Rail для впрыска запального топлива*

В системе впрыска запального топлива использованы последние разработки фирма MAN в области Common Rail технологии, позволяющие гибко устанавливать опережение, продолжительность и давление подачи топлива для каждого цилиндра. Эта гибкость позволяет оптимизировать расход топлива и эмиссию для всех режимов эксплуатации. При работе на газе технология Common Rail позволяет очень точно согласовывать подачу газа и впрыск топлива с мощностью двигателя вплоть до очень малых нагрузок. Кроме того, технология Common Rail позволяет двигателю быстро реагировать на детонацию и пропуск вспышек.

### *Фактически чистое сгорание*

Двигатель MAN 51/60DF спроектирован для сжигания метана или газа с высоким его содержанием. Как простейшее соединение углерода и водорода в серии углеводородов, метан сгорает совершенно чисто.

Кроме фирм Wartsila Corporation и MAN Diesel & Turbo судовые дизели на двойном топливе производит фирма Anglo Belgian Corporation (ABC). Параметры двигателей представлены в табл. 4.

Таблица 4

**Параметры дизелей фирмы Anglo Belgian Corporation на двойном топливе**

Параметр	(L)DZD	(V)DZD
Диаметр цилиндра, мм	256	256
Ход поршня, мм	310	310
Частота вращения, об/мин	720/1000	720/1000
Цилиндровая мощность, кВт	120/167	120/167
Число цилиндров	6,8L	12,16V
Агрегатная мощность, кВт	720-1335	1440-2670
Среднее эффективное давление, бар	12,8	12,8
Средняя скорость поршня, м/с	7,44/10,3	7,44/10,3
Применяемое топливо	Дизельное топливо, природный газ, биогаз, попутный нефтяной газ, шахтный газ	Дизельное топливо, природный газ, биогаз, попутный нефтяной газ, шахтный газ
Удельная масса дизеля, кг/кВт	14,8/10,4	12,5/8,15

Указанные двигатели могут работать на природном газе с метановым числом 73 и низшей теплотой сгорания 39000 кДж/м<sup>3</sup>, а также других видах газообразных топлив.

Фирма Roll-Royce предлагает судовые поршневые двигатели, работающие на газе с искровым зажиганием, развернутые в достаточно широкий типоразмерный ряд, а также отдельные модели двухтопливных дизелей.

Интересны двухтопливные двигатели фирмы Niigata моделей 12, 16 V22 AG и 18V22 AG - это предкамерные дизели с воспламенением газа от запального топлива.

Фирма MaK в настоящее время разрабатывает судовой двухтопливный дизель M46DF с цилиндровой мощностью 900 кВт при 500/514 об/мин. Диаметр цилиндра 460 мм, ход поршня 610 мм, топливо — LNG, MDO, HFO. Поставка первого дизеля планируется в 2014 году.

Из представленных характеристик двухтопливных СОД видно, что при их применении в многомашинных судовых энергетических установках двигатели данного класса могут удовлетворить потребности судов любого водоизмещения.

На всех рассмотренных двигателях подача топлива и газа идентичная: подача газа под низким давлением 4-6 бар на такте наполнения и подача запального топлива через систему Common Rail. Управление подачей - электронное. Естественно, что в деталях конструктивного исполнения у двигателей имеются различия, но на основе имеющихся материалов отследить их затруднительно.

Рассмотрение основных параметров СОД показывает, что, несмотря на большое количество выпускаемых различными фирмами типов СОД (до 10-15 типоразмеров), основные параметры и показатели их мало отличаются друг от друга и все они удовлетворяют предъявляемым к ним технико-эксплуатационным требованиям.

Таким образом, указанные выше двухтопливные СОД являются весьма перспективными, так как дают возможность, при минимальном количестве типоразмеров, осуществлять многомоторные установки как средних, так и больших мощностей, комплектуемых из простых (тронковых), малогабаритных, относительно легких и экономичных дизелей среднеоборотного типа.

К числу постоянно действующих направлений дальнейшего развития судового двухтопливного дизелестроения следует отнести: совершенствование рабочего процесса двигателя и подачи газа, их конструкции, повышение степени наддува, повышение экономичности, надежности и сроков службы, введение автоматизации, совершенствование систем электроники при подаче газа и управлении дизелем и др.

К основным преимуществам использования СПГ в СЭУ относятся: более низкая стоимость; лучшие экологические показатели, позволяющие удовлетворять самым жестким требованиям к эмиссии выхлопных газов; более высокая теплотворная способность; хорошие антидетонационные свойства, обеспечивающие приемлемые степени сжатия; хорошее смесеобразование газа и воздуха ввиду их идентичного агрегатного состояния, что позволяет обеспечить лучшую полноту сгорания топливной смеси в цилиндре двигателя; большой моторесурс двигателя и меньший износ, большой срок службы масла; хорошая летучесть метана, ввиду того, что его плотность примерно в два раза меньше плотности воздуха, чем обеспечивается простота его удаления из помещений, вследствие

чего все нормативные документы регламентируют применение на судах только метана, и др.

К основным недостаткам применения СПГ в СЭУ относятся: необходимость специальных криогенных судовых емкостей для хранения сжиженного газа на борту; повышенная взрывопожароопасность газа, что требует принятия дополнительных мер по обеспечению безопасности; более высокая (на 250–300 °С) по сравнению с дизельным топливом температура самовоспламенения газа, что делает необходимым использование дополнительного источника зажигания газо-воздушной смеси в цилиндре в виде впрыска небольшой дозы запального дизельного топлива либо электроискрового зажигания; отсутствие в настоящее время развитой инфраструктуры по обеспечению бункеровки судов СПГ, что предопределяет его использование преимущественно на судах-газовозах; усложнение системы подачи жидкого топлива и газа к двигателю и др.

### *Список литературы*

1. Marine Engine. Рекламный буклет фирмы MAN Diesel & Turbo 2012 г. ([www.mandiesel.com](http://www.mandiesel.com)).

2. Сорокин В.А. Анализ производства современных судовых малооборотных дизелей // Сб.научн.трудов ЗАО «ЦНИИМФ», Техническая эксплуатация морского флота. – СПб. – 2012. – С. 84–94.

3. Сорокин В.А., Иванов М.Ю. Сравнительный анализ технико-эксплуатационных характеристик отечественных и зарубежных судовых дизельных двигателей мощностью до 3 МВт // Научн.-техн.сб. Российского морского регистра судоходства. – Вып. 34. – 2011. – С. 111–131.

4. Marine Power Systems. Рекламный буклет фирмы Wartsila Corporation, 2012 г. ([www.wartsila.com](http://www.wartsila.com)).

## Проблемы человеческого фактора

---

УДК 629.56

**С.Г. Чулкин**, д-р техн. наук, проф., ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова

**В.М. Петров**, д-р техн. наук, проф., ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова

**Е.О. Ольховик**, канд. техн. наук, доц., ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова

### **РАЗРАБОТКА КОНЦЕПЦИИ НОВОГО УЧЕБНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОГО СУДНА ДЛЯ ПОДГОТОВКИ СПЕЦИАЛИСТОВ МОРСКОЙ ТРАНСПОРТНОЙ ОТРАСЛИ**

*Ключевые слова:* учебно-производственное судно, плавательная практика, морская транспортная отрасль, методики обучения

Учебно-производственные суда (УПС), эксплуатировавшиеся в 70–80-х годах прошлого века, соответствовали качественным требованиям по уровню оснащенности техническими средствами и методикам обучения. Одновременно на них проходили практику от 50 до 100 курсантов. Однако за минувшие десятилетия появились новые информационные технологии, коренным образом изменившие принципы управления судном, что потребовало адекватного изменения как методик, так и технологического сопровождения плавательных практик.

Обеспечить высокое качество практической подготовки плавсостава для современных судов, оборудованных интегрированными системами управления, возможно только с помощью специально организуемых плавательных практик, проведение которых на существующих УПС в нынешних условиях проблематично. Необходимость повышения уровня подготовки кадров объясняется постоянно возрастающими требованиями по повышению безопасности мореплавания. Профессиональная подготовка специалистов морской транспортной отрасли регламентирована рядом международных конвенций, которые предусматривают получение квалификации при наличии

плавательного ценза. В качестве производственной базы для прохождения обязательной плавательной практики курсантов могут выступать суда с различным оснащением. В настоящее время морские университеты не располагают собственными или находящимися в оперативном управлении новыми современными судами, и для организации плавательной практики курсантов заключаются договора с судоходными компаниями. Приобретение или постройка новых УПС является весьма дорогостоящим мероприятием, поэтому оптимальным решением этой проблемы является дооснащение современных коммерческих судов, на которых практиканты в этом случае смогут пройти всесторонний тренинг по приобретению практических навыков и умений, адекватных технической составляющей современного флота. При этом количество курсантов, одновременно находящихся на судне, будет неминуемо сокращено до 6–12 человек. Такая ситуация потребует значительного пересмотра и изменения методик обучения на судне для обеспечения качественного уровня подготовки. Также необходимо учесть, что Государственный университет морского и речного флота им. адм. С.О. Макарова имеет возможность направить ограниченное число профессорско-преподавательского состава в каждую группу (не более 2–3 инструкторов).

Для сохранения общего количества практикантов необходимо привлекать большое количество коммерческих судов и оснащать их необходимым учебным и лабораторным оборудованием по единому сценарию, что потребует значительных средств, привлеченных как из бюджета, так и от судоходных компаний. Естественно, что оснастить такие корабли дублирующим главным оборудованием в целях обучения не удастся. Потребуется установка специальных тренажеров, имеющих систему контроля и анализа работы основного судового оборудования с возможностью моделирования и имитирования различных ситуаций.

В настоящее время в ГУМРФ им. адм. С.О.Макарова ведутся разработки инновационных подходов в области профессиональной морской подготовки за счет использования современных технологий, базирующихся на новейших компьютерных методиках применительно к получению профессиональных знаний непосредственно на судне. Основные тактико-технические

требования к таким судам можно представить в виде комплекса технических средств, обеспечивающих практическую учебную подготовку морских специалистов от уровня рядового плавсостава до квалификации специалиста по эксплуатации судна с высоким уровнем автоматизации всех производственных процессов.

Используемое для практики судно должно располагать современными техническими средствами и учебно-производственными условиями, позволяющими курсантам закрепить полученные в университете теоретические знания.

Для решения этой задачи в центральную систему управления судном должна быть интегрирована специальная компьютерная составляющая, оснащенная и дополненная тренажерами с рабочими местами для курсантов и инструкторов. Фактически, должны быть продублированы без возможности управления судном: штурманская рубка, центральный пульт управления (ЦПУ) и судовая энергетическая установка (СЭУ), радионавигация и связь. Это позволит курсантам отслеживать принимаемые профессиональной вахтой решения, моделировать их самостоятельно или при участии инструктора, имитировать отказы и неисправности, производить изучение и разбор всех процессов, происходящих во время плавания.

Для нормального обеспечения учебного процесса судно необходимо дооснастить:

- учебной штурманской рубкой, интегрированной с ходовым мостиком управления (на 6 человек);
- навигационным тренажером, подключенным к основной навигационной системе (занимаемая площадь – 6 м<sup>2</sup>);
- учебным постом управления СЭУ, подключенным к ЦПУ СЭУ;
- экологической лабораторией;
- компьютерным классом на шестерых курсантов с автоматизированной системой контроля знаний (занимаемая площадь 12 м<sup>2</sup>);
- аудиторией на 10–12 человек для проведения лекций и тактических тренингов, оборудованной мультимедийной системой с возможностью визуализации процессов управления судном.

Предполагается, что в период морской практики курсанты на УПС получают знания и навыки в соответствии с образовательной программой независимо от типа судна (учебное судно, парусник, судно с дизельным двигателем или паровой турбиной). На

протяжении плавания на УПС курсанты практически знакомятся с тем, что они изучали в своем учебном заведении. Усваиваются методы несения вахты, поскольку концепция обучения на УПС заключается в том, что курсанты должны не только наблюдать, но и участвовать в выполнении обязанностей должностных лиц судна в полном объеме.

Для реализации предлагаемой образовательной политики все учебные программы состоят из трех равнозначных элементов: лекции, практическая подготовка и тактические учения. На лекциях, проводимых в специализированных помещениях на судне, даются необходимые инструкции и сведения. Это могут быть полноценные лекции или тренинги перед несением вахты. Практическая подготовка и тактические учения проводятся совместно с должностными лицами судна, при этом в них участвуют небольшие группы курсантов по специальности (2–3 человека), что позволяет более глубоко усвоить знания.

Несение вахты проходит под руководством лицензированных лиц судна, а в качестве инструкторов выступают преподаватели. Курсанты учатся определять местоположение судна для обеспечения безопасности, используя оборудование и методы радио- и спутниковой навигации. При прохождении практики курсанты детально изучают инструкции, методы проведения и определения местоположения судна, работу навигационного оборудования и использование электронных картографических навигационных информационных систем в небольших группах (2–3 человека.).

При маневрировании корабля курсанты должны изучить особенности мореходности. При этом они выполняют заданную судовую роль в порядке ротации, тестируя повороты корабля, его инерционные свойства, буксировку и другие маневры. В результате несения учебной вахты курсанты должны знать, как строить схему прохода, составлять график несения вахты, осуществлять рейс и координировать работу служб.

Под руководством преподавателя (инструктора) курсанты несут вахту в машинном отделении, изучая работу главного двигателя, генератора, котлов и вспомогательных механизмов. При этом они получают навыки управления двигателем, включая его запуск/остановку, операций с системой управления, выполнения процедур увеличения/уменьшения оборотов главного двигателя, изменения

нагрузки генератора, работы насосного оборудования и системы очистки. Курсантам особенно важно усвоить методики поиска и ликвидации неисправностей, измерения динамических характеристик и общего анализа работы силовой установки с помощью специального оборудования. В дальнейшем на семинарских занятиях курсанты делают доклады об участии в проведенных во время вахты мероприятиях и совместно анализируют полученные результаты.

В качестве дополнительных занятий на борту УПС читаются лекции по мониторингу и обеспечению загрузки/разгрузки и размещению перевозимых грузов, в том числе с изучением особенностей осадки, остойчивости, по стресс-контролю. Кроме того, курсанты получают знания о профилактике морских аварий и процедурах при оформлении основных судовых документов.

В период практики на УПС предпочтительно общение на английском языке, что значительно повышает данную компетенцию и развивает возможности общения по радиосвязи и с работниками портов.

На лекциях по экономической части курсанты изучают методы составления оперативного плана для работы главного двигателя с учетом экономической эффективности и других факторов, таких как управление плаванием, расходом топлива и работой балласта, анализом расхода смазочных материалов, основы экологической безопасности.

В качестве дополнительных тренингов курсанты должны освоить проведение лабораторных экологических тестов по оценке загрязнения атмосферы, контролю качества топлива, выбросов соединений серы, оксидов азота, диоксида углерода, воды. В зависимости от типа судна и применяемого оборудования возможно изучение электрических схем судна, принципов работы холодильных агрегатов, систем автоматического контроля, оборудования для перемещения грузов и т.д.

## **Выводы**

Предложенная авторами концепция организации плавательной практики курсантов морских специальностей позволит обеспечить:

- высокое качество учебной практики курсантов учебных заведений за счет ее прохождения на современных коммерческих судах;

- подготовку специалистов по всему спектру программ профессионального образования, включая отработку согласованных технических действий на судне;

- повышение квалификации профессорско-преподавательского состава;

- расширенного применения современных образовательных технологий для активного использования в плавательной практике.

**Н.Н. Григорьев**, проф., ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова

**А.П Двинин**, проф., Российский новый университет

**С.В Латухов**, проф., ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова

**М.М Наконечный**, кап. дальн. плав., ООО «СКФ Арктика»

## **ПРОБЛЕМЫ ОСВОЕНИЯ АРКТИКИ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ ЧЕЛОВЕЧЕСКОГО ФАКТОРА**

*Ключевые слова:* человеческий фактор, Севморпуть, инфраструктура, подготовка кадров, психофизиологические показатели, психологический паспорт профессии

Значение Северного морского пути (далее - СМП) как транспортной магистрали следует рассматривать с разных позиций, но прежде всего – с точки зрения использования его для обеспечения перевозок, связанных с включением природно-ресурсного потенциала Заполярья в экономику страны. Эту задачу невозможно решить без участия морского транспорта, который является единственным эффективным видом транспорта на столь обширной территории. Для масштабного освоения Арктики потребуются в большом количестве специалисты, обладающие не только специфическими профессиональными знаниями, но и способные эффективно выполнять свои обязанности в суровых погодных условиях. Между тем, климатические условия Заполярья мало способствуют выполнению работ как в обычных, так и, тем более, в экстремальных ситуациях, которых в Арктике не убавилось. Арктика была и продолжает оставаться регионом, экстремальным как для работы, так и для проживания.

«Постсоветский» период в нашей стране характеризовался разрушением инфраструктуры на протяжении всего СМП. Интерес к трассе был существенно утрачен, что привело к уменьшению численности населения региона. Следовательно, предстоит фактически заново создавать инфраструктуру СМП с учетом современных реалий. А для этого потребуются физически здоровые люди с высокими психофизиологическими

показателями для выполнения трудоемких работ уже на первом этапе восстановления СМП (см. об этом в [1]).

По разным оценкам от 60 до 70% территории России приходится на зону вечной мерзлоты, а если добавить болота и другие не особенно пригодные для жизни пространства, то площадь комфортного проживания составит примерно 15% территории Российского государства. Учитывая это, а также состояние здоровья нации, растущее число людей с лимитированными возможностями трудовой деятельности, число лиц, реально способных и готовых работать в экстремальных условиях Арктики, крайне ограничено. Сказывается и демографическая ситуация. На основании прогноза ученых Берлинского института населения и развития Ш. Зиверта и Р. Клигхольца, к 2050 г. Россия перестанет входить в десятку крупнейших стран мира. В ближайшие сорок лет население нашей страны уменьшится на 25 млн. человек.

Арктика, вопреки прогнозам о грядущем глобальном потеплении, не станет милостивее к человеку. Сокращение площади ледового покрытия приведет к усилению влияния на судоходство штормовых условий плавания. В то же время, российские ученые НИИ Арктики и Антарктики считают, что нынешнее потепление – это обычное явление, характерное для шестидесятилетнего цикла. В ближайшее время начнется похолодание.

Современные технические средства и технологии позволяют более эффективно осваивать северные регионы. Снижение возможных рисков за счет применения современных технологий рассмотрено в [1], где авторы обстоятельно рассматривают вопросы технологии и безопасности транспортных операций при обработке судов в необорудованных пунктах российской Арктики. Но это техническая сторона вопроса. Другой стороной является человек как исполнитель. Вследствие неразвитости инфраструктуры СМП, выполнение многих, в том числе трудоемких работ требует, кроме соответствующей профессиональной подготовки, – стабильности психофизиологических показателей личности при выполнении работы в условиях холодной ветреной погоды, недостатка кислорода, замкнутого пространства или, наоборот, бесконечных пространств «белого безмолвия». И все это – сверх обязательного выполнения требований Международной конвенции о подготовке,

дипломировании персонала судов и несении вахты (ПДНВ) с учетом принятых к ней «манильских поправок».

Предполагаемое нарастание объема перевозок по СМП потребует пересмотра кадровой политики всех заинтересованных сторон. Прежде всего, это увеличение численности специалистов не только высокой квалификации, но и отвечающих определенным требованиям, позволяющим продолжительное время выполнять работу в экстремальных условиях. Предстоит большая и важная работа по отбору и расстановке специалистов, по сути, новой формации. Она осложнена тем, уже продолжительное время вопросами адаптации персонала к работе в экстремальных условиях практически не занимались. Утрачена профессиональная преемственность. Целый ряд профессий, ранее считавшихся героическими, и, следовательно, престижными – перестали быть таковыми.

Понятно, что важным вопросом является и финансирование. Расходы на содержание инфраструктуры в полярных регионах со снижением температуры окружающей среды на один градус с увеличением на один градус географической широты растут отнюдь не по линейным законам. С учетом масштабов коррупции, расходы на восстановление и содержание СМП – тяжелое бремя. Большую положительную роль в поддержке арктического региона играет функционирование ряда крупных промышленных предприятий, таких, как ОАО «ГМК «Норильский никель».

Первую продукцию компания выдала в 1939 г. В 1953 г. на ее долю приходилось производство 35% никеля, 12% меди, 30% кобальта и 90% платиноидов от общего производства этих металлов в Советском Союзе. Согласно исследованиям компании International Nickel Study Group, на долю ГМК «Норильский никель» в последние годы приходилось 20% мировой добычи никеля, что составило 297,0 тыс. тонн в 2010 г. [2]. С развалом СССР интенсивность перевозок на трассах СМП существенно снизилась. На смену плановым регулярным перевозкам пришли эпизодические рейсы. Это обстоятельство способствовало созданию компанией «Норильский никель» собственного современного флота. Аналогичным путем пошла и компания «Совкомфлот».

Объемы перевозок углеводородов по СМП существенно возрастают. В 2012 г. вывоз сырой нефти и сжиженного газа

должен был достигнуть 32,1 млн т, а к 2020 г. эта цифра должна увеличиться до 75 млн т [3].

Природно-ресурсный потенциал арктического региона и эффективность экономики, с одной стороны, предполагают развивать перерабатывающие предприятия на местах добычи ресурсов. С другой стороны, это ставит вопрос о кадрах. В настоящий момент именно проблема кадров, а не просто человеческих ресурсов, остро стоит во всех сферах отечественной экономики. Уже сегодня 54% российских компаний испытывают кадровый голод [4]. К сожалению, начальное среднее профессиональное образование основательно разрушено. В то же время нередки случаи, когда учебные заведения выпускают специалистов, потребности в которых нет. Преобладает тенденция развития высшего образования. На 12 студентов вузов приходится один студент среднего профессионального образования, при этом качество подготовки как первых, так и вторых оставляет желать лучшего. 70 % выпускников работают не по избранной специальности.

Каким же представляется дальнейшее развитие программ и стратегий развития российской Арктики? Наведение порядка в Арктике, дальнейшее ее освоение потребуют реальных программ, подготовленных специалистами, а также реальных инвестиций. Все вышесказанное не позволяет только оптимистично смотреть в будущее, тем более, что настоящее свидетельствует о серьезных кадровых проблемах, влияющих и на аварийность при плавании в ледовых условиях. Так, в период зимней навигации 2009 – 2010 гг. 23% аварий произошли при плавании в ледовых условиях [9,10,11, 12]. Ледовое плавание в современных условиях ставит под сомнение ритмичность поставок грузов, что приводит к нарушению одного из главных современных логистических принципов - «just-in-time» («точно в срок»).

При рассмотрении вопросов использования трассы СМП не затрагивается также такая важная проблема, как проблема глубин. Достоверность данных о глубинах на навигационных картах весьма сомнительная. Напомним, что в навигацию 2009–2010 гг. 23% аварий случились при плавании в ледовых условиях в районах с адекватным гидрографическим обеспечением. Исследования глубин – это трудоемкие и дорогостоящие работы, для проведения которых необходим специализированный флот,

современное оборудование и обученные кадры. Опыт проектирования судов, особенно специализированных, в сегодняшней России существенно отстает от Запада. Не случится ли так, как уже происходит с дноуглубительными работами, рыночный сегмент которых захватили иностранные компании, переманивающие к себе российские кадры? При этом мы сами передаем в руки иностранцев информацию о глубинах в акваториях портов, которая в прежние годы была закрытой.

На сегодняшний день гарантий безопасности мореплавания на трассах СМП нет. Утрачен опыт, накопленный за 80-летний период планомерного изучения и исследования Арктики. Учитывая все вышесказанное, к числу приоритетных задач следует отнести решение кадровой проблемы, которая касается всех без исключения сторон судоходной деятельности.

Современный российский кадровый рынок можно охарактеризовать как крайне неустойчивый. По некоторым данным, россиянин каждые пять-шесть лет меняет не только место работы, но и профессию. А ведь это срок становления специалиста. Существует целый ряд профессий, где неспециалисту просто нечего делать. Морская отрасль не является исключением. Здесь более, чем где-либо выполнять профессиональные обязанности способен только специалист с соответствующей подготовкой. К сожалению, качество подготовки специалистов для морского флота снижается, и не только в России. Такова мировая тенденция. Это происходит на фоне падения престижности морских профессий. Как свидетельствует проведенное авторами анкетирование, до 84 % выпускников морских специальностей готовы перейти на береговую работу при условии, что будут получать удовлетворяющую их зарплату. А ведь в перспективе работы по освоению арктического шельфа.

Целенаправленная подготовка персонала для работы на трассах СМП не ведется. Компании, которым в ближайшее время потребуются кадры, по-прежнему рассчитывают, что нужда заставит людей работать в любых условиях. Прийти-то, возможно, и придут, но с какой эффективностью будут работать? Вопрос привлечения, обучения и удержания работника является комплексным, требующим кооперации всех заинтересованных сторон: работодателя, работника и учебного заведения. В современных условиях каждая из сторон исходит из личных,

часто корыстных интересов, что в итоге может пойти во вред всем. Понять, что современный работник – это не расходный материал, современному российскому бизнесу не просто. Для этого требуется новое мышление, которого пока нет. Совокупность негативных факторов ведет к высокой текучести кадров, приносящей компаниям дополнительные расходы, а порою и являющейся причиной аварий и техногенных катастроф.

Пренебрежительное отношение к специфике арктического региона чревато серьезными последствиями. Существует опасение, что стремление получить быстрые результаты может возобладавать над здравым смыслом. Потери в системе организации работы СМП за годы перестройки потребуют определенного времени для восстановления. Если этого не сделать, стихийная эксплуатация судов, особенно нефтяных танкеров, газозовов и буровых платформ, может привести к серьезным последствиям. Только для создания аварийно-спасательной службы на трассах СМП, с учетом эксплуатации флота в Арктике, потребуются значительные средства. Авария и пожар на нефтяной платформе в Мексиканском заливе убедительно показали, что даже самая современная техника может оказаться бессильной. Если нечто подобное произойдет во льдах, то ущерб, нанесенный природе, будет ощутимее. Вряд ли сегодня существуют надежные способы борьбы с разливом нефти в арктических водах, большую часть времени находящих под льдом. Принимая во внимание неустойчивый характер течений и дрейф льдов, усложняется прогнозирование перемещения пятен нефти. В условиях низких температур нефть разлагается значительно дольше. Ее оседание на дно нанесет серьезный ущерб обитателям полярных морей.

Приступая к разведке и добыче углеводородов на арктическом шельфе, нужно помнить о нравах современного российского бизнеса, его стремлении получить максимальную прибыль любой ценой вопреки требованиям безопасности, защиты окружающей среды, да и здравому смыслу вообще. Череда аварий, происшедших в стране и в мире за последние годы, свидетельствует об игнорировании мер предосторожности при создании и эксплуатации объектов, несущих угрозу экологии. Побудительными мотивами осуществления контроля за потенциально опасными объектами становятся именно аварии. Но и этот контроль носит не постоянный, а эпизодический характер.

По прошествии непродолжительного времени все возвращается на «круги своя».

Нельзя не сказать о проблемах развития арктического туризма. Использование атомных ледоколов для туристических маршрутов на Северный полюс свидетельствует о неэффективном использовании флота стратегического назначения и сродни использованию авианосцев и крейсеров для борьбы с пиратами. По мнению бывшего премьер-министра РФ В.А.Зубкова: «Видимо, от безысходности, что не все вопросы решаются, было решено заняться туризмом в Арктике, хотя там нет никакой инфраструктуры. Говорить о развитии туризма в этом направлении преждевременно» [13].

При анализе причин аварийности главный упор делается на низкое качество подготовки и недисциплинированность. Вердикт неизменно один – повысить контроль. Однако, только усиление контроля не решает проблемы аварийности [14]. Не уделяется внимания таким важным темам, как психофизиологические особенности человека, например, усталость. Если состоянию физического здоровья уделяется внимание, то психофизиологические показатели не подвергаются контролю вовсе. Между тем, как показывают исследования, проведенные в Морском колледже (ныне входит в состав ГУМРФ им.адм. С.О. Макарова) в 2004–2008 гг., значительное число абитуриентов имело существенные отклонения от нормы по целому ряду психофизиологических показателей, влияющих на принятие управленческих решений [15]. Так, например, пространственные представления оказались ниже нормы у 40%, в то же самое время результаты расследования аварийности свидетельствуют о том, что 45% аварий происходит из-за потери пространственной ориентации судоводителями [16]. Интеллектуальная лабильность (способность к обучению) ниже нормы у 37%. Кроме того, наблюдается снижение и по другим важным психофизиологическим показателям. Так, вербальный интеллект у 40% ниже нормы, а это означает, что поступающая информация интерпретируется неадекватно. При этом пределы внешнего диалога не вписываются в фоновый культурный диалог общей осведомленности, которая ниже нормы у 30% абитуриентов. Зрительная память ниже нормы у 42%, а оперативная память у 35%. Между тем, совокупность этих и других показателей существенно влияет на принятие управленческих решений.

Важность влияния психофизиологических показателей на снижение роли человеческого фактора при принятии управленческих решений бесспорна. Результаты многолетних исследований по профессиональному отбору, проведенных в армии и некоторых промышленных отраслях США, показывают, что снижение аварийности по вине персонала составило 40–70% от исходных данных (до начала психофизиологического отбора). Количество отчисленных из учебных заведений снизилось с 30–40 % до 5–8%. Снижение затрат на подготовку специалистов составило 30–40%. Надежность систем управления выросла на 10–25% [17].

Учитывая резкое снижение престижности морских профессий (84% моряков не хотят, чтобы их дети наследовали морскую профессию), качества школьной подготовки (так считают 95% респондентов) и проч., вопросы подготовки специалистов морских профессий приобретают особую актуальность [18, 19].

Понимание необходимости учета психофизиологических показателей уже имеет место в некоторых компаниях. Так, в компании «СОВКОМФЛОТ» начата работа по определению влияния психофизиологических показателей на качество принимаемых управленческих решений среди плавсостава.

Рассматривая проблемы подготовки кадров, тем более для плавания в ледовых условиях, не следует уповать на «могущество» стандартов третьего поколения, на интерактивные доски, компьютерные технологии, инновационные методы. Все это лишь средства. Главным носителем инновационных образовательных технологий был и продолжает оставаться преподаватель. Сказанное выше, в полной мере относится и к тренажерной подготовке для плавания в ледовых условиях. Не следует уповать на непогрешимость даже самых современных тренажеров. Без практического опыта ледового плавания ошибочно ожидать снижения аварийности [20].

Задачи современного судоходного бизнеса можно сформулировать так: привлечь, обучить, удержать. Обеспечивать их решение должны все участники судоходной отрасли [21].

## **Выводы**

В целях обеспечения безопасного судоходства в Арктике для снижения негативного влияния человеческого фактора, качественной подготовки кадрового состава необходимо:

- проводить исследования в области эргономики профессий;
- проводить профотбор в учебных заведениях;
- создать «психологический паспорт профессий»;
- активно пропагандировать морские профессии;
- углублять сотрудничество компаний с учебными заведениями;
- привлекать для работы военнослужащих, увольняемых из вооруженных сил;
- повышать имидж профессии преподавателя морского учебного заведения, так как именно преподаватель - основной элемент в качественной подготовке будущих работников морского транспорта.

## *Список литературы*

1. Изотов О.А., Кириченко А.В., Латухов С.В., Никитин В.А. Технология и безопасность транспортных операций. Обработка судов в необорудованных пунктах российской Арктики. – СПб.: Островитянин, 2013. – 308 с.
2. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ereport.ru/articles/commod/nickel.htm>.
3. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.tiksi.ru/content/view/16/>.
4. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.vedomosti.ru/career/news/14763541/demograficheskaya-petlya-strany#ixzz2acdMQ3G0>.
5. Григорьев Н.Н. Белые пятна морского образования // Транспорт Российской Федерации, 2008. – № 5(18).
6. Григорьев Н.Н. Как обустроить морское образование в России // Транспорт Российской Федерации, 2008. – № 1(14).
7. Григорьев Н.Н., Железняков А.М., Наконечный М.М. Арктика: проблемы сегодня и завтра // Атомная стратегия. - 2012. – №70.
8. Григорьев Н.Н. Как слово в море отзовется // Морской флот, 2012. – № 1(1499).
9. Давыденко А.А., Управление в портах и обеспечение безопасности // Морской флот, 2011. – № 01-03 (1497).
10. Ермолаев П.М. Анализ аварийности на морском и речном транспорте // Транспортная безопасность и технологии, 2011. – №2 (25).
11. Фролов А.Е. О некоторых результатах портового контроля в 2010 г.// Транспортная безопасность и технологии, 2011. – №2 (25).

12. Рукша В.В. Слабаки в Арктике не выживают [Электронный ресурс] // Морские вести России. – Режим доступа: <http://www.press-release.ru/branches/transport/c7b8d873d5a2b/>.
13. Зубков В.А. «Развивать туризм в Арктике решили от безысходности». [Электронный ресурс] // Новости России - ИА REGNUM. – Режим доступа: <http://www.regnum.ru/news/981129.html>.
14. Григорьев Н.Н., Наконечный М.М., Железняков А.М. Одним контролем аварийность не снизить // Атомная стратегия, 2012. – №62.
15. Григорьев Н.Н., Двинин А.П., Яловенко А.В. и др. Психологический аспект подготовки специалистов для морского флота // Эксплуатация морского транспорта, 2007. – №1(47).
16. Ермолаев П.М. Анализ аварийности на морском и речном транспорте // Транспортная безопасность и технологии 2011. – №2 (25).
17. Универсальный психодиагностический комплекс // Новый оборонный заказ. Стратегии, 2011. – №2(14).
18. Grigoriev N. N., Nakonechny M. M. Ship Management Philosophy to be Reviewed. The 10th Annual General Assembly and Conference MET Trends in the XXI Century: Shipping Industry and Training Institutions in the Global Environment – Area of Mutual Instruments and Cooperation – Saint-Petersburg – September 19–21, 2009.
19. Grigoriev N. N., Nakonechny M. M. Human Factor: Initial Causes of Accidents. World Maritime Technology Conference, WMTC2012. – Saint-Petersburg, May 29 – June 1, 2012.
20. Григорьев Н.Н., Наконечный М.М., Железняков А.М. Тренажеры ледового плавания: «за» и «против» [Электронный ресурс] // Атомная стратегия. – Режим доступа: <http://www.proatom.ru/modules.php?name=News&file=article&sid=4611>.
21. Григорьев Н.Н., Железняков А.М., Наконечный М.М. Морское образование России: от количества к качеству // Атомная стратегия, 2013. – №78.

## Новые требования РС к судам типа «река-море»

---

УДК 629.5.01

*Г.В. Егоров, д-р техн. наук, проф, Морское Инженерное Бюро, г. Одесса*

*И.А. Ильницкий, Морское Инженерное Бюро, г. Одесса*

*Я.В. Калугин, Морское Инженерное Бюро, г. Одесса*

### **КРУИЗНЫЕ ПАССАЖИРСКИЕ СУДА СМЕШАННОГО (РЕКА-МОРЕ) ПЛАВАНИЯ ДЛЯ РОССИЙСКИХ ВНУТРЕННИХ ВОДНЫХ ПУТЕЙ**

*Ключевые слова: пассажирское круизное судно, путевые условия, проектирование, параметрический ряд, суда смешанного (река-море) плавания, правила Российского морского регистра судоходства*

По экспертным оценкам, можно ожидать, что к 2030 г. речные круизные суда (КС) будут по внутренним водным путям (ВВП) России перевозить до 1,0 млн туристов. При этом средний возраст российских речных КС составляет 38,5 лет.

Существующие отечественные КС не могут эксплуатироваться на международных линиях ввиду того, что при их проектировании и строительстве не выполнялись требования международных конвенций (СОЛАС 74, МАРПОЛ 73/78 и др.), что не позволяет получить на такие суда международные свидетельства, подтверждающие возможность эксплуатации и перевозки пассажиров.

На рынке морских и речных круизов отсутствуют предложения на ранее популярные круизы между портами Черного, Азовского, Балтийского, а также Каспийского морей. Это связано, прежде всего, с отсутствием КС, способных осуществлять такие переходы.

Существующий морской круизный флот рассчитан, как правило, на дальние переходы с заходами в морские порты различных прибрежных государств. Главные размерения таких КС учитывают возможность подхода к акваториям морских портов и швартовки у существующих морских причалов, но не позволяют заходить в устьевые речные порты и, тем более, перемещаться по внутренним водным путям.

Таким образом, задача создания и классификации в правилах Российского морского регистра судоходства (РС) круизных судов смешанного (река-море) плавания представляется актуальной и важной для воднотранспортной и туристической отраслей России.

Целью статьи является обоснование (на основе исследований 2010-2012 гг., проведенных Морским Инженерным Бюро) «линейки» современных КС смешанного (река-море) плавания, представляющих интерес для отечественных судоходных компаний и, соответственно, для российского классификационного общества.

На данный момент в России, да и вообще в мировой практике эксплуатации КС, отсутствует флот пассажирских судов класса «река-море». То есть, нет судов, способных выполнить и морской, и речной круиз. Единственное (в России и в классе РС) такое судно – «Казань» типа «CEZANNE GI.A.» (проект 179-RI) было построено в Италии в 1999 г. и предназначалось для круизов по Средиземноморскому бассейну с заходами в реки. Основные характеристики судна приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Основные характеристики судна «Казань»  
(источник - Регистровая книга судов РС)**

Характеристика	Значение
Длина, мм	126,5
Ширина, мм	11,2
Осадка, мм	2,88
Число палуб	3
Пассажировместимость, чел	150
Водоизмещение, т	3186
Мощность, л.с.	2 × 1500
Скорость, км/ч	21,3

Судно было продано, переименовано (т/х «Курмангазы») и с 2009 г. работает как плавообщезитие на Каспии.

Эксплуатация речных КС на линиях с выходом в море распространена в Украине. Круизные компании «Червона Рута» [8] и «Viking River Cruises» [9] используют речные КС, которые эксплуатируются вдоль побережья Черного моря (рис. 1).

Первые круизы на речных КС с выходом в Черное море стали возможны после выполненной Морским Инженерным Бюро работы по



Рис. 1  
 Район эксплуатации речных круизных пассажирских судов в Украине

расширению района плавания речного пассажирского судна проекта 302 «Т.Г. Шевченко», в которой было обосновано присвоение судну класса Российского Речного Регистра (РРР) М-ПР (фактически класс присваивался Регистром судоходства Украины).

С тех пор и по настоящее время по Днепру с выходом в Черное море успешно эксплуатируются при максимальной заполняемости пассажирами:

- два КС проекта 302 («Генерал Ватутин» и «Звезда Днепра» 1988 г. постройки) круизной компании «Червона рута»;
- два КС проекта 301 («Принцесса Днепра» 1976 г. постройки и «Михаил Ломоносов» 1979 г. постройки круизных компаний «Червона рута» и «Viking River Cruises» соответственно).

Кроме того, круизная компания «Червона рута» в 2012 г. купила европейское речное КС «Фиделио» 1995 г. постройки и

модернизировала его. С 2013 г. судно осуществляет круизы на линии Киев - Николаев – Ялта.

В СССР был накоплен значительный опыт работы морских пассажирских линий, включая каботажные и прибрежные (табл. 2).

Таблица 2

**Основные пассажирские линии эксплуатации советских пароходств  
(источник – [7])**

Пароходство	Линии	Сезонность
Черноморское морское пароходство	Одесса – Батуми	Круглогодичная
	Одесса – Жданов, Одесса – Херсон, Одесса – Николаев, Одесса – Севастополь, Одесса – Очаков	Сезонная
	Одесса – Александрия	Апрель – Ноябрь
	Одесса - Марсель	Июнь – Сентябрь
	Одесса - Алжир	Июнь – Октябрь
Советское Дунайское пароходство	Измаил – Килия – Вилково – Рени – Измаил, Измаил – Одесса - Измаил	Сезонная
	Пассау – Вена – Ялта – Стамбул – Пассау, Измаил – Рени - Галац - Измаил	
Каспийское морское пароходство	Баку – Красноводск - Баку	Круглогодичная
Дальне-восточное морское пароходство	Камчатская, Приморская	Круглогодичная
	Приморско-Сахалинская, Северная Курильская, Южная Курильская	Сезонная
	Сахалин - Курилы	Май – Ноябрь
	Находка – Йокогама – Находка	Круглогодичная
	Находка – Йокогама – Гонконг - Находка	Сезонная
Камчатское морское пароходство	Петропавловск-Камчатский – Палана, Петропавловск-Камчатский - Пахачи	Сезонная
Сахалинское морское пароходство	Холмск - Ванино	Круглогодичная

Пароходство	Линии	Сезонность
Мурманское морское пароходство	Мурманск – Йоканьга	Круглогодичная
	Мурманск – Архангельск, Мурманск – Озерко	Сезонная
Северное морское пароходство	Архангельск – Мезень, Архангельск – Соловки, Архангельск – Нарьян-Мар	Сезонная
Эстонское морское пароходство	Виртсу – Куйвасту, Рохукюла – Хельтермаа, Рохукюла – остров Вормси, Виртсу – Хельтермаа, Таллин – Хельсинки	Круглогодичная
Балтийское морское пароходство	Санкт-Петербург – Стокгольм	Круглогодичная

Понятно, что часть этих линий (прибрежные) вполне может обслуживаться судами смешанного (река-море) плавания. Кроме того, учитывая значительный интерес иностранных туристов к круизам по России и российских туристов к отдыху на побережье Турции и Египта, представляется интересным создание КС, которые смогут работать как по ВВП России, так и по системе Дунай – Майн – Рейн («Дунай макс» класса), и КС, которые смогут работать вдоль побережья Турции и по Красному морю.

Работы по созданию концептов базировались как на общих подходах к проектированию судов внутреннего и смешанного (река-море) плавания [2, 5], так и на основании специальных решений [1, 3, 4, 6, 10]. Принципиальную роль играло обсуждение проблем с ведущими специалистами пассажирской отрасли – К.О. Анисимовым, В.Ф. Березиным, А.А. Трофимовым, Д.Г. Рябовым, Д.Н. Галкиным, А.Е. Смолиным, А.А. Семиным.

Как показано в [3], для наших условий может быть рекомендован традиционный монокорпусный тип пассажирского судна с широким внедрением модульного принципа формирования внутреннего пространства жилого блока судна. Применение стандартных модульных кают позволяет в одном и том же корпусе варьировать пассажироместимость судна в достаточно

широком диапазоне за счет изменения набора модулей пассажирских кают различной площади (в зависимости от требуемого уровня комфортабельности судна). При этом принципиальным является возможность кругового обзора, как главной особенности именно речных круизов (за счет солнечной палубы или носового салона, или прогулочных галерей). При речном путешествии, в отличие от морского, интерес представляют виды с обоих бортов, к тому же часто речные путешественники берут билеты только в один конец, и вид из окна (балкона) каюты недостаточен для получения полноценных впечатлений.

Для безопасного и ускоренного процесса эвакуации пассажиров могут быть использованы современные эвакуационные системы, состоящие из рукава и принимающей площадки, на которую спускаются пассажиры во время эвакуации и с которой перемещаются на спасательные шлюпки и плоты (иногда посадка пассажиров может осуществляться прямо на спасательное средство).

Экипаж должен формироваться, исходя из автоматизации судовой энергетической установки, палубных работ (автоматические якорно-швартовные лебедки), процесса погрузки припасов и механизации процесса уборки палуб (моечные машинки и т.п.) и с учетом использования совмещения специальностей.

Новое поколение КС смешанного (река-море) плавания для отечественных ВВП, по нашему мнению, будет характеризоваться следующими особенностями.

**1 По главным размерениям.** Определяющим является наличие ограничений путевых условий района эксплуатации судна (глубины, габариты судового хода, размеры гидротехнических сооружений и т.п.) – классы «Волго-Балт макс», «Волго-Дон макс», «ББК макс», «Дунай макс».

В табл. 3 представлена информация о возможности эксплуатации пассажирских КС «Волго-Балт макс», «Волго-Дон макс», «ББК макс», «Дунай макс» классов на «непроектных» линиях этих судов (читать следует на пересечении соответствующих строк и столбцов таблицы).

Таблица 3

**Взаимозаменяемость проектируемых пассажирских КС класса «река-море»**

Класс судна	Возможность эксплуатации на непроектной линии для судов класса			
	«Волго-Балт макс»	«Волго-Дон макс»	«ББК макс»	«Дунай макс»
«Волго-Балт макс»	–	Не возможна из-за ограничивающего фактора в виде длины судна	Не возможна из-за ограничивающих факторов в виде длины, ширины и надводного габарита судна	Не возможна из-за ограничивающих факторов в виде длины, ширины, осадки и надводного габарита судна
«Волго-Дон макс»	Возможна при условиях: $V_M \leq 16,95$ м и $H_{\text{нГ}} \leq 13,2$ м	–	Не возможна из-за ограничивающих факторов в виде длины, ширины и надводного габарита судна	Не возможна из-за ограничивающих факторов в виде длины, ширины, осадки и надводного габарита судна
«ББК макс»	Возможна	Возможна	–	Не возможна из-за ограничивающих факторов в виде осадки и надводного габарита судна
«Дунай макс»	Возможна	Возможна	Возможна при условии: $L_M \leq 132$ м	–

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

- судно класса «Волго-Балт макс» может эксплуатироваться по Волге и Волго-Балтийскому водному пути с выходом в Балтийское, Северное и Каспийское моря;
- судно класса «Волго-Дон макс» может эксплуатироваться как по Волго-Донскому судоходному каналу с выходом в Азовское, Черное, Средиземное моря, по Волге с выходом в Каспийское море, так и по Волго-Балтийскому водному пути с выходом в Балтийское и Северное моря (при выполнении указанных условий);
- судно «ББК макс» класса может эксплуатироваться как по Беломорско-Балтийскому каналу с выходом в Белое море, так и на линиях судов «Волго-Балт макс» и «Волго-Дон макс» классов;

- судно «Дунай макс» класса может эксплуатироваться как по системе Дунай-Майн-Рейн с выходами в Северное, Средиземное, Черное и Азовское моря, так и на линиях судов «Волго-Балт макс», «Волго-Дон макс», «ББК макс» классов (при выполнении указанных условий).

### **2 По архитектурно-конструктивному типу.** Это будут:

- так называемые «плавучие гостиницы» с надстройкой по всей ширине судна без проходов по бортам (с устройством полноценных балконов/террас или «французских» балконов при каютах) – для КС, ориентированных на иностранных туристов. Верхняя «солнечная» палуба оборудуется бассейном и тентами от солнца;

- суда с прогулочными галереями по бортам на всех палубах, обеспечивающими пассажирам круговой обзор достопримечательностей (такой вариант на новых проектах применяется редко: не каждому туристу приятно наличие случайных людей в непосредственной близости от окна его каюты);

- суда с носовым обзорным салоном, обеспечивающим обзор достопримечательностей с обоих бортов.

Применяется промежуточный вариант (для КС, ориентированных на российских туристов), который представляет собой в той или иной степени сочетание упомянутых выше вариантов. Практически все новые КС, причем как морские, так и речные, за рубежом строятся с максимальным количеством балконов.

Прежние привычные решения по применению в каютах иллюминаторов и судовых окон классического типа входят в противоречие с современными представлениями об обзоре и освещении кают. Поэтому, с точки зрения обеспечения безопасности, принципиальным является вопрос об устройстве окон и дверей практически от палубы до палубы, что требует решения ряда проблем по прочности узлов крепления, материала окон, обеспечения взаимодействия палуб при минимальных площадях стен рубок, водо- и брызгонепроницаемости (в зависимости от палубы).

**3 По планировке внутренних помещений.** Имеются ввиду модульные принципы формирования как жилых блоков в целом, так и самих каютных модулей (стандартные каюты) и вертикальное зонирование жилых и общественных помещений (рестораны, салоны и бары размещаются в отдельных от жилых помещений вертикальных зонах; над каютами пассажиров и экипажа не

размещаются помещения, в которых может создаваться шум). Общая площадь составляет примерно 13–30 м<sup>2</sup>, включая балкон/ «французский» балкон (как правило, каюты 2-х местные). Устройство ресторана с числом мест, равным числу пассажиров; конференц-зала, баров, интернет-салонов, детских комнат, салона красоты, сувенирного киоска, фитнес-центра, солярия на открытой солнечной палубе. Для людей с ограниченными возможностями – лифты, соединяющие все палубы; коммуникации и туалеты.

**4 По оборудованию подъемными и опускаемыми рулевыми рубками.** Для работы в условиях низкого надводного габарита (река Москва в центре города, Волхов, Дунай) потребуется оборудование судов подъемными и опускаемыми рулевыми рубками. Подъемные рулевые рубки в основном требуются для составных судов (кормовое расположение). Опускаемые рулевые рубки - для судов с сильным ограничением надводного габарита. Для опускаемых рулевых рубок применимы следующие положения относительно палубы: приподнятое; на уровне палубы; частично утопленное (до уровня окон рулевой рубки); полностью опущенное заподлицо с палубой (наблюдение ведется по приборам и визуально судоводителем из открытого люка в крыше рулевой рубки).

**5 По путевым условиям [5], стратегии туроператора, его позиции на рынке, приверженности к тем или иным линиям.** Такой выбор, при всей его внешней субъективности, должен быть осуществлен из дискретного числа альтернатив, вполне объективно возникших на отечественном туристическом рынке как результат компромисса при выборе путевых ограничений и численности групп туристов (400-500 человек, 250-300 человек, 200-250 человек, 100-150 человек).

**6 По уровню комфортабельности.** При проектировании новых судов однозначно следует исходить из заданного заказчиком уровня комфортабельности [10] (количество условных звезд либо коэффициент комфортабельности), который будет служить регулирующим фактором эффективности будущего судна в виде функции, определяющей потребные площади палуб и помещений, габаритные размеры судна, его пропульсивные характеристики и в итоге – его экономическую эффективность.

В качестве критерия оценки проектной комфортабельности пассажирских судов можно применить пятизвездочную шкалу,

неофициально используемую практически всеми туроператорами. Количество звезд увеличивается в соответствии с повышением уровня качества обслуживания и комфорта.

Особо следует выделить КС повышенной комфортности (по сути, яхты) и суда для круизов одного дня (безкаютные). Часто такие суда вообще не относят к круизным судам в силу значительных отличий в подходах к пассажирской зоне и ряду специальных вопросов (наличия дополнительных возможностей для водных видов активного отдыха и т.п.). В настоящей работе приведены примеры таких проектов Морского Инженерного Бюро (PV09 и PV01).

Главные размеры концептов пассажирских КС выбираются, исходя из данных, представленных в табл. 4 (подробнее – в работе [5]).

Таблица 4

**Сводная информация по главным размерениям КС смешанного (река-море) плавания**

Класс судна		Габаритная длина $L_M$ , м	Габаритная ширина $B_M$ , м	Осадка $d$ , м	Надводный габарит $H_{нг}$ , м
«Волго-Балт макс»		$\leq 185$	$\leq 16,95-20,1$	2,90-3,80	$\leq 13,2$
«Волго-Дон макс»		$\leq 140$	$\leq 17,0$	3,20-3,70	$\leq 14,0$
«ББК макс»		$\leq 132$	$\leq 13,63$	2,90-3,80	$\leq 11,9$ м*
«Дунай макс»	Дунай до Пассау	$\leq 135$	$\leq 13,40$	2,00-2,50	$\leq 6,7$
	Выше Пассау**	$\leq 135$	$\leq 11,45$	1,70-2,00	$\leq 6,03$
* Если не ожидать разводки моста на 1330,6 км или 24 м, если проходить при разведенном пролете					
** Включая сквозной проход до Северного моря (система Дунай-Майн-Рейн)					

Выбор класса РС для перспективных пассажирских КС предполагал следующее:

- назначение классов по районам плавания в соответствии с планируемыми направлениями перевозок;
- определение категории ледового усиления в соответствии с накопленным опытом работы и тенденций к продлению навигационного периода, в том числе зимней эксплуатации;
- задание экономически обоснованного срока службы судна.

Поэтому для проекта PV300VD класса «Волго-Дон макс» с выходом в Каспийское, Азовское, Черное и Средиземное моря и для проекта PV200D класса «Дунай макс» с выходом в Черное, Азовское, Средиземное и Северное моря был назначен класс РС **R2-RSN**. Для концептов «ББК макс» класса PV200VB и PV09 с выходом в Белое море – класс PPP **М-ПР 2,5**.

Базируясь на накопленном опыте работы Морского Инженерного Бюро, для судов, предназначенных для работы в Азовском, Черном, Средиземном и Каспийском морях зимой (и/или в Балтийском, Белом и Северном морях летом) предполагается назначить категорию ледовых усилений **Ice 1** в классе РС или **Лед 20-Лед 30** в классе PPP, а для судов, предназначенных для работы в Балтийском, Белом и Северном морях зимой – **Ice 2** или **Лед 40** соответственно.

Анализ подобных альтернатив позволил выстроить параметрический ряд КС смешанного (река-море) и внутреннего плавания, объективно востребованных отечественными судовладельцами, и на его основе разработать в Морском Инженерном Бюро проекты новых судов.

Версия такой линейки проектов приведена в табл. 5. В ее состав входят востребованные на современном рынке туристических услуг следующие основные классы речных КС (причем рассматривались как суда внутреннего плавания, так и суда смешанного (река-море) плавания):

**«Волго-Балт макс».** Размеры определяются условиями Волго-Балтийского пути. Предполагает эксплуатацию на линиях, соединяющих порт Санкт-Петербург и порт Москва. Для варианта с классом смешанного (река-море) плавания – возможность выхода в Финский залив, до портов Кронштадт и Выборг, а также в Балтийское, Северное и Каспийское моря. Габариты и повышенная управляемость за счет полноповоротных винторулевых колонок и подруливающих устройств позволяют работать по Волге вплоть до Астрахани.

Архитектурно-конструктивный тип проекта PV500VB – стальное самоходное трехвинтовое (с полноповоротной винторулевой колонкой в ДП) судно с наклонным форштевнем и транцевой кормовой оконечностью, с избыточным надводным бортом, с удлиненной надстройкой бака, надстройкой юта, со средним расположением четырехъярусной надстройки, с носовым

Таблица 5  
**Основные характеристики круизных судов, спроектированных Морским Инженерным Бюро**

Номер проекта	Вид сбоку - см. в табл. 6 рисунок с указанным ниже номером	Габаритные размеры (длина, ширина, высота борта), м	Пассажиро-местность, чел.	Средняя площадь пассажирской каюты, м <sup>2</sup>	Категория комфортабельности, *	Скорость в эксплуатации, км/ч	Класс
«Волго-Балт макс»							
PV500VB	1	179,86 × 17,00 × 5,50	518	17,30	4*	22	М-ПР 2,5 (лед 30) А
«Волго-Дон макс»							
PV300VD	2	140,19 × 16,60 × 5,50	300	14,10	4*	22	КМ Ice1 R2-RSN AUT1-ICS
«Дунай макс»							
PV200D	3	135,00 × 11,40 × 3,50	200	13,00	4*	22	КМ Ice1 R2-RSN AUT3-ICS
«ББК макс»							
PV200BB	4	114,00 × 13,60 × 4,00	200	14,50	4*	22	М-ПР 2,5 (лед 30) А
PV09	5	95,80 × 13,80 × 3,80	36	37,50	5*	22,5	М-ПР 2,5 (лед 20) А
Круизы одного дня							
PV01	6	45,03 × 14,05 × 2,82	250	Каюты не предусмотрены	3*	20,4	М-ПР 2,5

расположением рулевой рубки и машинным отделением в кормовой части. Основные характеристики – см. табл. 5. Осадка наибольшая – 3,2 м; высота габаритная от ОП – 16,4 м; экипаж и обслуживающий персонал – 117 чел.; автономность по топливу – 15 сут., по прочим видам запасов – 10 сут.

Компоновка КС в варианте пассажировместимости 518 чел. включает 97 стандартных двухместных кают площадью 15,5 м<sup>2</sup>, 72 двухместные каюты с французским балконом площадью 17 м<sup>2</sup>, 64 двухместные каюты с балконом площадью около 17 м<sup>2</sup>, 24 двухместные «Люкс» каюты с балконом площадью около 26 м<sup>2</sup> и 2 «Люкс» апартаментов с балконом площадью 41 м<sup>2</sup>. Пассажировместимость судна может варьироваться в зависимости от установленных каютных модулей.

Каюты пассажиров размещаются в средней вертикальной зоне на 4-х ярусах надстройки и в корпусе на нижней палубе. Каюты капитана и комсостава располагаются на солнечной палубе рядом с рулевой рубкой. Размещение остальных 107 членов экипажа предусмотрено в корпусе в средней (жилой) вертикальной зоне.

Каюты на верхней и солнечной палубах имеют собственные балконы со сдвижными секциями для обеспечения сквозного прохода по палубе в аварийных ситуациях. В носовой вертикальной зоне размещаются ресторан, панорамный театрально-музыкальный салон с баром и террасой, трансформируемые конференц-залы, камбуз, буфет, провизионные кладовые, кают-компания и салон отдыха для экипажа, помещения установок кондиционирования воздуха и обработки пресной воды. Кормовая вертикальная зона отведена под бар «24 часа» с террасой, гриль-бар, видеосалон, библиотеку, магазины, бюро информации, детскую комнату, интернет-офис, сауну, парикмахерскую, СПА-салон, массажную, тренажерный зал, кладовые, машинное отделение и помещение обработки сточных вод.

**«Волго-Дон макс».** Размеры определяются путевыми условиями Волго-Донского судоходного канала. Предполагает эксплуатацию на линиях, соединяющих порт Санкт-Петербург и порт Москва, по Волго-Донскому судоходному каналу с выходом в Азовское, Черное, Средиземное моря, по Волге с выходом в Каспийское море, так и по Волго-Балтийскому водному пути с выходом в Балтийское и Северное моря.

Архитектурно-конструктивный тип проекта PV300VD – стальное самоходное трехвинтовое судно с наклонным форштевнем и

транцевой кормовой оконечностью, избыточным надводным бортом, удлиненной надстройкой бака, надстройкой юта, со средним расположением четырехъярусной надстройки, носовым расположением рулевой рубки, машинным отделением в кормовой части. Основные характеристики – см. табл. 5. Осадка наибольшая – 3,20 м; высота габаритная от ОП – 17,2 м; экипаж и обслуживающий персонал – 76 чел.; автономность по топливу – 15 сут., по прочим видам запасов – 10 сут.

Схема компоновки круизного судна в варианте пассажировместимости 300 чел.: 144 стандартные двухместные каюты площадью около 13 м<sup>2</sup>, включая 4 каюты с дополнительными местами, 6 кают «Люкс» (рис. 2). Пассажировместимость судна может варьироваться от 250 до 300 мест в зависимости от установленных каютных модулей (площадь стандартных кают от 18 до 13 м<sup>2</sup>).

Каюты пассажиров размещаются в средней вертикальной зоне на 4-х ярусах надстройки. Каюты «Люкс» имеют собственные балконы. Каюты капитана и старшего механика располагаются на тентовой палубе рядом с рулевой рубкой. Размещение остальных 74 членов экипажа предусмотрено в корпусе в средней (жилой) вертикальной зоне. В носовой вертикальной зоне размещается панорамный театрално-музыкальный салон с баром, трансформируемые конференц-залы, СПА-салон с сауной, фитнес-центр, интернет офис, помещения установок кондиционирования воздуха и водоподготовки. Кормовая вертикальная зона отведена под ресторанный комплекс, размещающийся на двух ярусах, камбуз с провизионными кладовыми, машинное отделение.

**«Дунай макс».** Размеры определяются путевыми условиями реки Дунай и межбассейнового соединения Дунай-Майн-Рейн. Предполагает эксплуатацию по внутренним водным путям России, а также по реке Дунай с возможностью выхода в Азовское, Черное и Средиземное моря. Кроме того, предполагается эксплуатация по системе Дунай-Майн-Рейн с выходом в Северное море. Судно «Дунай макс» класса может эксплуатироваться на линиях судов классов «Волго-Балт макс», «Волго-Дон макс», «ББК макс».

Архитектурно-конструктивный тип проекта PV200D – стальное самоходное двухвинтовое судно с наклонным форштевнем и транцевой кормовой оконечностью, избыточным надводным бортом, удлиненной надстройкой бака, надстройкой юта, средним

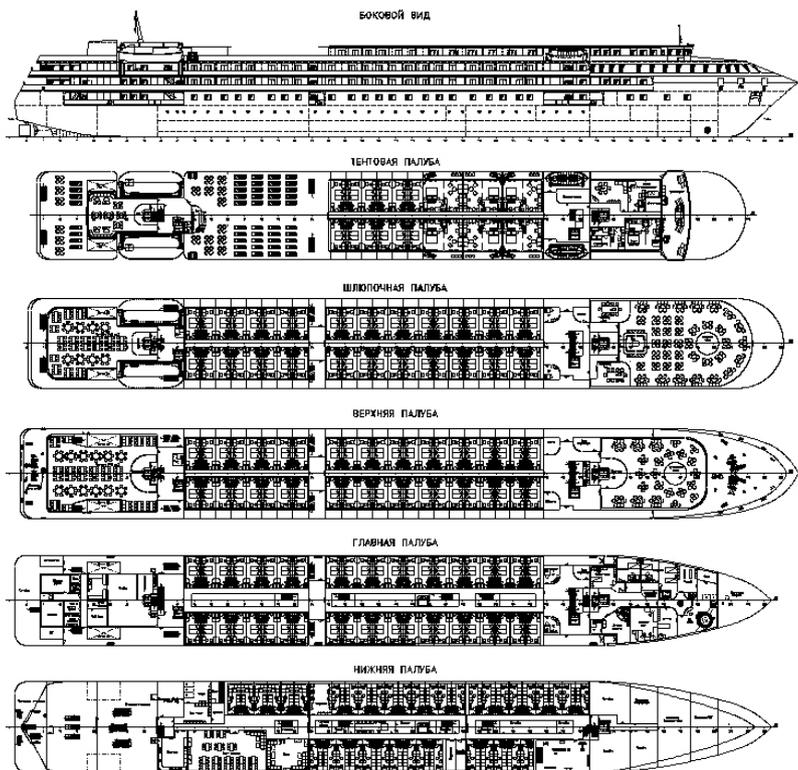


Рис. 2

Схема общего расположения круизного пассажирского судна проекта PV300VD «Волго-Дон макс» класса в варианте пассажировместимости 300 чел

расположением двухъярусной надстройки, носовым расположением рулевой рубки, машинным отделением в кормовой части. Основные характеристики – см. табл. 5. Осадка наибольшая – 2,10 м; высота габаритная от ОП – 8,80 м; экипаж и обслуживающий персонал – 58 чел.; автономность по топливу – 10 сут., по прочим видам запасов – 10 сут.

Компоновка круизного судна в варианте пассажировместимости 200 чел. включает 72 стандартные двухместные каюты площадью 13,0 м<sup>2</sup>, 16 стандартных двух/трех/четырёх местных

кают площадью 11,0 м<sup>2</sup> и 2 каюты «Люкс». Пассажировместимость судна может варьироваться от 180 до 250 мест в зависимости от установленных каютных модулей (площадь стандартных кают от 18 до 11 м<sup>2</sup>).

Каюты пассажиров размещаются в средней вертикальной зоне на 2-х ярусах надстройки и в корпусе в средней (жилой) вертикальной зоне. Каюты экипажа располагаются на нижней палубе. В носовой части судна на верхней палубе имеются прогулочные галереи по бортам. Носовая вертикальная зона отведена под ресторанный комплекс, размещаемый на двух ярусах, камбуз с провизионными кладовыми, кают-компанию. В кормовой вертикальной зоне размещается детская комната, трансформируемый конференц-зал, СПА-салон с сауной, тренажерный зал, массажная, машинное отделение.

**«ББК макс».** Размеры определяются путевыми условиями Беломорско-Балтийского канала, Предполагает эксплуатацию на линиях, соединяющих порт Санкт-Петербург и порт Москва, порт Санкт-Петербург и порт Беломорск через Беломорско-Балтийский канал с возможностью выхода в Белое море и на Соловецкие острова. Судно класса «ББК макс» может эксплуатироваться на линиях судов классов «Волго-Балт макс» и «Волго-Дон макс».

При удержании осадки судна в пределах 1,40 м некоторые суда этого класса (проект PV09) могут совершать круизы Москва – Нижний Новгород и Москва – Уфа, т.е. работать в условиях реки Ока и реки Белая.

Архитектурно-конструктивный тип проекта PV200BB – стальное самоходное судно с двумя ВРК, наклонным форштевнем и транцевой кормовой оконечностью, избыточным надводным бортом, надстройкой полубака, средним расположением трехъярусной надстройки, носовым расположением рулевой рубки и машинным отделением в кормовой части. Основные характеристики – см. табл. 5. Осадка наибольшая – 2,00 м; высота габаритная от ОП – 11,8 м; экипаж и обслуживающий персонал – 58 чел.; автономность по топливу – 10 сут., по прочим видам запасов – 10 сут.

Компоновка круизного судна в варианте пассажировместимости 200 чел. включает 75 стандартных двухместных кают площадью 14,2 м<sup>2</sup>, 16 стандартных двух/трех/четырёх местных кают площадью около 13,0 м<sup>2</sup> и 2 каюты «Люкс».

Каюты пассажиров размещаются в средней вертикальной зоне на 4-х ярусах надстройки. Каюты «Люкс» имеют собственные балконы. Каюта капитана располагается на шлюпочной палубе рядом с рулевой рубкой. Командный состав экипажа располагается в корпусе в средней (жилой) вертикальной зоне на нижней палубе. Размещение остальных 9 членов экипажа предусмотрено в корпусе в средней (жилой) вертикальной зоне на нижней палубе. Обслуживающий персонал в количестве 40 чел. располагается в корпусе в средней (жилой) вертикальной зоне на нижней палубе. В носовой вертикальной зоне размещается фитнес-центр с сауной, обзорный салон, офисы, детская комната, помещения установок кондиционирования воздуха и обработки сточных вод. Кормовая вертикальная зона отведена под панорамный театральномызыкальный салон с баром, трансформируемый в конференц-залы, ресторанный комплекс, камбуз с провизионными кладовыми, машинное отделение. Тренажерный зал размещен на главной палубе.

**Суда для круизов одного дня (безкаютные).** Представлены проектом PV01 на 250 пассажиров («Империя»), который был реализован в 2008 г. и успешно работает на черноморском побережье России, осуществляя однодневные прогулки отдыхающих. Проект PV01 – стальной трехпалубный двухвинтовой теплоход с баком, без юта, с седловатостью и погибью палубы, средним расположением рубки и кормовым – машинного отделения, одинарными бортами, наклонным форштевнем и транцевой кормой. В трюме предусматриваются три каюты для размещения обслуживающего персонала (12 чел.). На первом ярусе располагается ресторан, помещение для подогрева пищи, кладовые продуктов, прачечная и гримерная; на втором ярусе – ресторан и плавательный бассейн; на третьем ярусе – ходовой мостик и помещения для экипажа (5 чел.).

Следует обратить внимание на то, что большинство пассажиров прогулочных рейсов в районе Берлина, Парижа, Лондона и Амстердама – местные и иностранные туристы. Появление Морского фасада и введение безвизовых 72 часов для пассажиров морских КС, заходящих в Санкт-Петербург, обеспечило «взрывной» рост прогулочного флота Санкт-Петербурга. Смягчение визового режима для туристов и строительство гостиниц также сможет придать импульс развитию

судов для круизов одного дня как в Москве, так и в других российских городах на реках.

Схемы общих боковых видов предлагаемого ряда речных круизных судов приведены в едином масштабе в табл. 6.

Таблица 6

**Схемы общих боковых видов параметрического ряда круизных судов**

№	Проект, максимальная пассажировместимость	Вид сбоку
«Волго-Балт макс»		
1	PV500VB, 518 чел.	
«Волго-Дон макс»		
2	PV300VD, 300 чел.	
«Дунай макс»		
3	PV200D, 200 чел.	
«ББК макс»		
4	PV200BB, 200 чел.	
5	PV09, 36 чел.	
Круизы одного дня		
6	PV01, 250 чел.	

ЗАО «ЦНИИМФ» под руководством генерального директора, канд. экон. наук С.И. Буянова выполнил моделирование эксплуатационной деятельности основных классов судов из предлагаемой линейки.

При этом в расчеты закладывались следующие схемы эксплуатации:

1) Проект PV500VB – эксплуатация судна на линии Санкт-Петербург – Москва.

2) Проект PV300VD – используется комбинированная схема эксплуатации:

- в период с мая по октябрь - выполнение рейсов на линии Москва – Санкт-Петербург;

- в конце навигации - переход с туристами в Ростов-на-Дону (рейсы Москва – Самара, Самара – Ростов-на-Дону);

- переход судна с туристами на Красное море: Ростов-на-Дону – Ялта – Одесса – Стамбул (Турция), Стамбул (Турция) – Александрия (Египет);

- зимний период: выполнение рейсов в Красном море из порта Шарм-эль-Шейх.

3) Проект PV200D – используется комбинированная схема эксплуатации:

- в период с мая по август - выполнение рейсов на линии Санкт-Петербург – Москва;

- переход на внутренние водные пути Европы (р. Дунай): рейсы Москва – Самара, Самара – Ростов-на-Дону, Ростов-на-Дону – Ялта – Одесса, Одесса – Будапешт;

- с сентября по январь и с марта по апрель – выполнение рейсов на р. Дунай на линии Будапешт – Нюрнберг.

4) Проект PV200BB – эксплуатация судна на Северо-Западе России на линиях Санкт-Петербург – Валаам – Кижы – Петрозаводск – Санкт-Петербург, Санкт-Петербург – Валаам – Санкт-Петербург, Санкт-Петербург – Кижы – Соловки – Москва.

Таким образом, предполагается, что круизные суда проектов PV500VB и PV200BB эксплуатируются только в период «летней» навигации – около 160 сут., а суда проектов PV300VD и PV200D - около 300 сут. за счет перехода в районы с продленной (осенне-весенней) и круглогодичной навигацией.

Основные параметры расчетных судов приведены в табл. 7.

Таблица 7

## Основные параметры расчетных судов

Параметр	PV500VB	PV300VD	PV200D	PV200BB
Пассажироместимость, чел.	518	300	200	200
Каюты кат. 1 (люкс-апартаменты)	4	12	4	4
Каюты кат. 1 («люкс» пл. 26 м <sup>2</sup> )	40	-	-	-
Каюты кат. 1 (2-х местн. с балконом пл. 17 м <sup>2</sup> )	136	-	-	-
Каюты кат. 2 (2-х местн. с французским балконом пл. 17 м <sup>2</sup> )	144	-	-	-
Каюты кат. 2 (2-х местн. стандарт пл. 15 м <sup>2</sup> )	194	-	-	-
Каюты кат. 2 (2-х местн. стандарт пл. 14,2 м <sup>2</sup> )	-	-	-	150
Каюты кат. 2 (2-х местн. стандарт пл. 13 м <sup>2</sup> )	-	288	144	-
Каюты кат. 3 (2-х местн. пл. 13 м <sup>2</sup> )	-	-	-	12
Каюты кат. 3 (3-х местн. пл. 13 м <sup>2</sup> )	-	-	-	18
Каюты кат. 3 (4-х местн. пл. 13 м <sup>2</sup> )	-	-	-	16
Каюты кат. 3 (2-х местн. пл. 11 м <sup>2</sup> )	-	-	6	-
Каюты кат. 3 (3-х местн. пл. 11 м <sup>2</sup> )	-	-	18	-
Каюты кат. 3 (4-х местн. пл. 11 м <sup>2</sup> )	-	-	28	-
Численность экипажа, чел.	20	18	18	18
Численность обслуж. персонала, чел.	97	58	40	40
Эксплуатационная скорость судна, км/ч	20,0	20,0	20,0	20,0
Валовая вместимость	11 600	8 900	3 400	4 800
Мощность главных двигателей, кВт	3 600	3 000	1 740	1 560
Тип топлива	ТТ 380	ТТ 380	ДТ	ДТ
Расход топлива на ходу, т/сут.	14,1	9,8	7,6	7,0
Расход топлива на стоянке, т/сут.	6,0	3,5	2,7	2,7
Автономность плавания, сут.				
Автономность плавания по топливу, сут.	15	15	10	10
Автономность плавания по запасам, сут.	10	10	10	10

При расчете экономики было учтено, что суда будут зарегистрированы в Российском международном реестре судов (РМРС). Регистрация судов, работающих в каботаже, в РМРС стала возможной после принятия Федерального Закона «О внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации в связи с реализацией мер по поддержке российского судостроения и судоходства» от 07.11.2011 г. №305-ФЗ (далее – закон о поддержке судостроения и судоходства). Соответственно, тарифы страховых взносов для плательщиков, производящих выплаты членам экипажей судов, зарегистрированных в РМРС, составляют 0,0%. Также из состава амортизируемого имущества исключаются основные средства, зарегистрированные в РМРС. В результате из состава расходов исключаются страховые взносы и

амортизационные отчисления, а также суда освобождаются от налогов на прибыль, имущество и от транспортного налога. В структуре расходов присутствуют платежи в РМРС: регистрационный и ежегодный.

Доходы формировались за счет выручки от продажи билетов на круизы, расходы – исходя из себестоимости содержания судов, ходового и стояночного времени, а также дополнительных расходов по обслуживанию туристов в рейсе (питание, экскурсионная программа в местах стоянок, развлекательная программа на борту судна и т.п.).

Расчеты показателей экономической эффективности выявили, что для судов проектов PV500VB, PV300VD, PV200D проектный срок окупаемости составил от 10,7 до 13,8 лет, для судна проекта PV200BB – около 33 лет (см. табл. 8).

Для судов проектов PV300VD, PV200D данный результат обусловлен продолжительным периодом эксплуатации (около 300 сут.).

Судно проекта PV500VB, несмотря на строительную стоимость на 70% большую, чем у судна проекта PV200BB, выигрывает за счет значительно большей пассажировместимости. Еще одним существенным фактором является то, что судно проекта PV500VB эксплуатируется на тяжелом топливе, а проекта PV200BB – на дизельном.

Таблица 8

**Оценка показателей экономической эффективности эксплуатации пассажирских круизных судов**

Показатели	PV500VB	PV300VD	PV200D	PV200BB
Навигационный период, сут.	161	326	291	158
Межнавигационный период, сут.	204	39	74	207
Доходы, тыс. руб	260 130,00	257 174,00	220 364,00	97 270,00
Расходы, тыс. руб	110 621,68	162 890,14	128 888,54	68 308,54
Годовой финансовый результат, тыс. руб	149 508,32	94 283,86	91 475,46	28 961,46
Ежегодный платеж в РМРС, тыс. руб	134,36	115,19	45,08	60,76
Чистая прибыль, тыс. руб	149 373,96	94 168,67	91 430,38	28 900,70
Инвестиции:	1 600 077,00	1 300 070,25	1 050 041,96	950 048,12
Стоимость судна, тыс. руб	1 600 000,00	1 300 000,00	1 050 000,00	950 000,00
Регистрационный взнос в РМРС, тыс. руб	77,00	70,25	41,96	48,12
Срок окупаемости, лет	10,7	13,8	11,5	32,9

## **Выводы**

Полученные результаты могут использоваться как база для качественной оценки привлекательности рассмотренных проектов, так как оценка производилась исходя из использования судовладельцем собственных денежных средств.

Соответственно, особое внимание на себя обращают проекты круизных судов смешанного (река-море) плавания классов «Волго-Балт макс» (PV500VB) и «Волго-Дон макс» (PV300VD), которые обеспечивают наиболее экономически оправданные решения для постройки судов нового поколения и, соответственно, для классификации судов по правилам Российского морского регистра судоходства.

## *Список литературы*

1. Анисимов К.О., Егоров Г.В. Как сохранить российские речные круизы? // Морская Биржа. - 2012. - №3 (41). - С. 24-34.
2. Егоров Г.В. Проектирование судов ограниченных районов плавания на основании теории риска. - СПб.: Судостроение, 2007. - 384 с.
3. Егоров Г.В. Анализ опыта европейских речных круизов и его влияние на новое поколение отечественных пассажирских судов // Морской вестник. - 2012. - №3 (43). - С. 23-28.
4. Егоров Г.В., Егоров А.Г. Исследование надежности и безопасности существующих речных пассажирских круизных судов // Труды НТК по СМК памяти акад. Ю.А. Шиманского. - СПб: ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, 2011. - С. 28-29.
5. Егоров Г.В., Ильницкий И.А. Определение главных размерений судов ограниченных районов плавания на основе анализа путевых условий // Вісник ОНМУ. - Одеса: ОНМУ, 2007. - Вип. 22. - С. 20-39.
6. Егоров Г.В., Ильницкий И.А., Калугин Я.В. Принципы проектирования корпусов круизных пассажирских судов для европейской части ВВП России // Труды НТК по СМК памяти акад. Ю.А. Шиманского. - СПб: ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, 2011. - С. 30-31.
7. Морские пассажирские суда / Ю.А. Будницкий, Г.П. Пилипенко, А.Г. Чукавин, В.С. Петухов. - Л.: Судостроение, 1989. - 224 с.
8. [Электронный ресурс]. – Сайт круизной компании «Червона Рута». - URL: <http://ruta-cruise.com/ru> (дата обращения 05.07.2013).
9. [Электронный ресурс]. – Сайт «Expedia». - URL.: <http://cruise.expedia.com/Itinerary.aspx?item=356249> (дата обращения 17.03.2013).
10. Семин А.А. Влияние комфортабельности на выбор главных размерений пассажирских круизных судов внутреннего и смешанного плавания // Вісник ОНМУ. - Одеса: ОНМУ, 2005. - Вип. 17. - С. 39-45.

# СОДЕРЖАНИЕ

## Регистру судоходства – 100 лет

Седов С.Н. Сто лет движения вперед . . . . .	3
Дутов А.В., Апполонов Е.М., Тимофеев О.Я. Российский морской регистр судоходства и Крыловский Государственный научный центр – гаранты создания передовой морской техники . . . . .	8
Буянов С.И. Российский морской регистр судоходства и ЦНИИМФ. Стратегия сотрудничества (партнерства) . . . .	12

## Мореходные качества судов

Назаров А.Г. Особенности оценки остойчивости малых судов . . . . .	16
Тарица Г.В., Щербаков И.В., Вераксо К.С. Оптимизация проектных решений для улучшения мореходных качеств по результатам эксплуатации головного судна . . . . .	27
Ефименков Ю.И., Кутейников М.А., Маркозов Г.В., Сотсков С.А. Основные результаты разработки требований к судам ограниченного района плавания <b>R2-RSN(4,5)</b> . . . . .	41
Ярисов В.В. Определение эквивалентных характеристик инерции, демпфирования и устойчивости судов с жидкими грузами в длиннопротяженных отсеках корпуса . . . . .	54

## Вопросы прочности судов и плавучих сооружений

Большев А.С., Фролов С.А., Кутейников М.А. Математическое моделирование поведения морских плавучих объектов в программном комплексе "Anchored Structures" . . . . .	68
--	----

## **Технология судостроения и судоремонта**

Барышников С.О., Чистов В.Б. Проблемы дефектации и ремонта корпусов судов смешанного (река-море) плавания.....	91
--	----

## **Материалы и сварка**

Башаев В.К., Хлусова Е.И., Голосиенко С.А. Разработка технологии производства листового проката толщиной до 50 мм из высокопрочных сталей с индексом "Аrc" .....	100
Ильин А.В., Филин В.Ю., Башаев В.К. К вопросу об определении трещиностойкости хладостойкой высокопрочной стали в толщине до 150 мм .....	112

## **Нефтегазовые сооружения**

Вальдман Н.А. Использование барьеров безопасности при разработке проектов морских сооружений на шельфе .....	124
Муравьева Л.В. Оценка риска подводных трубопроводов на морском грунте при сейсмическом воздействии .....	133
Берхин И.М., Литонов О.Е. Усовершенствованная методика расчетов прочности конструкций самоподъемных плавучих буровых установок при ветро-волновых воздействиях .....	141

## **Защита окружающей среды**

Макаров В.Г., Никитин В.С., Жмойда И.А. Экологические и экономические проблемы эксплуатации танкеров .....	151
--	-----

## **Судовые механические установки, валопроводы и движители**

- Костылев И.И., Петухов В.А. Повышение эффективности технической эксплуатации судовых систем теплоснабжения с органическим теплоносителем . 173
- Шурпяк В.К., Гришкин В.В. О конструктивном коэффициенте энергетической эффективности судов ледового плавания . . . . . 191
- Сорокин В.А. Анализ современного состояния и тенденций развития судовых двухтопливных дизелей . . 213

## **Проблемы человеческого фактора**

- Чулкин С.Г., Петров В.М., Ольховик Е.О. Разработка концепции нового учебно-производственного судна для подготовки специалистов морской транспортной отрасли . . . . . 239
- Григорьев Н.Н., Двинин А.П., Латухов С.В., Наконечный М.М. Проблемы освоения Арктики с учетом влияния человеческого фактора . . . . . 245

## **Новые требования РС к судам типа «река-море»**

- Егоров Г.В., Ильницкий И.А., Калугин Я.В. Круизные пассажирские суда смешанного (река-море) плавания для российских внутренних водных путей . . . . . 255

УДК 629.12.001.11

*Ключевые слова:* остойчивость, малые суда, нормирование.

**Назаров А.Г.** Особенности оценки остойчивости малых судов // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – Вып. 36. – 2013. – С. 16 – 26.

Рассмотрены различные нормативные документов по оценке остойчивости малых судов, даны рекомендации по их совершенствованию. В связи с проводимой РС и другими классификационными обществами работой по совершенствованию нормативной базы, особое значение приобретает актуализация требований к остойчивости как одному из основных мореходных качеств малых судов (т.е. судов с длиной корпуса  $LH < 24\text{м}$ ). С целью повышения их безопасности, в статье поставлены задачи анализа существующих требований к остойчивости в неповрежденном состоянии и выработки рекомендаций по их совершенствованию с точки зрения проектанта.

УДК 629.5.01

*Ключевые слова:* скоростное патрульное судно, береговая охрана, ледовый класс, мореходные характеристики, проектирование, правила Российского морского регистра судоходства.

**Тарица Г.В., Щербаков И.В., Вераксо К.С.** Оптимизация проектных решений для улучшения мореходных качеств по результатам эксплуатации головного судна // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – Вып. 36. – 2013. – С. 27 – 40.

Рассмотрен принципиальный подход к глубокому анализу достигнутых характеристик головного судна с целью дальнейшей оптимизации проектных решений для улучшения мореходных качеств серийных судов. Проведен сравнительный анализ результатов модельных испытаний, инженерных расчетов, произведенных специализированным программным обеспечением NAPA, и результатов натурных испытаний головного и серийного

судов. Отражены результаты модернизации головного судна, достигнутые улучшения эксплуатационных характеристик и условий обитаемости на серийном судне.

УДК 629.12.001.33:061.1 (47+57)

*Ключевые слова:* суда смешанного (река-море) плавания, требования к прочности корпусов, долгосрочные характеристики волнения, ограничение по волнению, надежность прогнозов волнения, редуцированные коэффициенты к общим и местным волновым нагрузкам.

**Ефименков Ю.И., Кутейников М.А., Маркозов Г.В., Сотсков С.А.** Основные результаты разработки требований к судам ограниченного района плавания **R2-RSN(4,5)** // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – Вып. 36. – 2013. – С. 41 – 53.

Опыт эксплуатации, проектирования и модернизации судов смешанного (река-море) плавания показал необходимость разработки требований к судам нового класса **R2-RSN(4,5)**. Определена целесообразность введения промежуточного класса, который допускает эксплуатацию судна ограниченного района плавания **R2-RSN(4,5)** в тех же районах, что и судно ограниченного района плавания **R2-RSN**, но с более жестким ограничением по волнению. Задача разработки требований к новому классу **R2-RSN(4,5)** решена интерполяцией действующих требований РС, предъявляемых к судам смешанного (река-море) плавания **R2-RSN** и **R3-RSN**.

УДК 629.12.001

*Ключевые слова:* качка судна, измерение характеристик остойчивости, длиннопротяженные отсеки корпуса.

**Ярисов В.В.** Определение эквивалентных характеристик инерции, демпфирования и остойчивости судов с жидкими грузами в длиннопротяженных отсеках корпуса // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – Вып. 36. – 2013. – С. 54 – 67.

Приведены расчетные формулы для определения эквивалентных характеристик инерции, демпфирования и остойчивости судов с жидкими грузами к безразмерной форме. Выведены приближенные формулы для определения коэффициентов сопротивления движению внутренней жидкости для отсеков судов. Сопоставлены расчетные и экспериментальные данные, относящиеся к изучению качки судов с жидкими грузами. Представлена возможность расчета универсальных эквивалентных характеристик с построением соответствующих графиков или номограмм.

УДК 629.124.74:629.563.2:51-74

*Ключевые слова:* математическое моделирование, морские плавучие объекты, системы удержания, внешние нагрузки, статические и динамические задачи.

**Большев А.С., Фролов С.А., Кутейников М.А.** Математическое моделирование поведения морских плавучих объектов в программном комплексе "Anchored Structures" // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – Вып. 36. – 2013. – С. 68 – 90.

Констатировано, что наиболее универсальным и относительно дешевым способом решения вопросов, направленных на исследования статики и динамики плавучих объектов, является создание мощного проблемно-ориентированного программного комплекса (ПК), позволяющего в короткий срок выполнить математическое моделирование всех необходимых режимов функционирования разнообразных конструктивных вариантов создаваемых сооружений.

В Санкт-Петербургском государственном политехническом университете создан и при постоянной поддержке Российского морского регистра судоходства более 15 лет успешно развивается ПК "Anchored Structures", способный решать большинство статических и динамических задач, возникающих у проектировщика. Излагаются некоторые методологические основы, использующиеся при решении проектных задач, и приводятся примеры практического применения данного ПК.

УДК 625.12:539.4

*Ключевые слова:* дефектация, остаточный перегиб, остаточная изогнутая ось корпуса.

**Барышников С.О., Чистов В.Б.** Проблемы дефектации и ремонта корпусов судов смешанного плавания // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – Вып. 36. – 2013. – С. 91 – 99.

Обосновывается необходимость более точного измерения остаточной толщины листовых элементов корпусов судов смешанного плавания. Показана необходимость более точного ограничения распространения вмятин по палубе или днищу в одном сечении. Обращено внимание на целесообразность учета общего перегиба корпуса, предлагается оригинальный способ определения ординат остаточной изогнутой оси корпуса. Указана необходимость учета потери устойчивости пластин обшивки и полос подкрепления. Дана зависимость для определения размеров поперечного сечения полос и места их установки, при которых потеря устойчивости исключается. Отмечены технологические процессы ремонта для устранения остаточного перегиба. Рекомендовано использовать материалы статьи при совершенствовании правил РС.

УДК 669.14.018.41:621.771.23

*Ключевые слова:* хладостойкие стали, технология производства листового проката, высокотемпературная термомеханическая обработка, предел текучести.

**Башаев В.К., Хлусова Е.И., Голосиенко С.А.** Разработка технологии производства листового проката толщиной до 50 мм из высокопрочных сталей с индексом "Arc" // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – Вып. 36. – 2013. – С. 100 – 111.

Основной тенденцией в создании современных хладостойких сталей для экстремальных условий Арктики и Дальнего Востока является применение процессов прецизионной термомеханической обработки или термического улучшения в сочетании с

микролегированием при общем снижении содержания дорогостоящих легирующих элементов. Основной целью при этом является получение мелкодисперсной и ультрамелкодисперсной структуры металла, которая, наряду с высокой хладо- и трещиностойкостью, обеспечивает и более высокие прочностные характеристики. Это открывает возможности расширения диапазона применения высокопрочных сталей, обеспечивает снижение металлоемкости конструкций, повышение эксплуатационной надежности и снижение трудоемкости сварки за счет использования сталей в меньших толщинах.

УДК 620.171.34:539.4

*Ключевые слова:* хладостойкость, CTOD, температура вязко-хрупкого перехода, "энергетический" подход.

**Ильин А.В., Филин В.Ю., Башаев В.К.** К вопросу об определении трещиностойкости хладостойкой высокопрочной стали в толщине до 150 мм // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – Вып. 36. – 2013. – С. 112 – 123.

Освоение углеводородных месторождений арктического шельфа России требует создания новых хладостойких материалов для крупногабаритных сварных конструкций. Основным классом материалов для таких конструкций остаются низколегированные стали, для которых характерно наличие вязко-хрупкого температурного перехода. Для некоторых элементов конструкций требуемые толщины достигают 130-150 мм, а расчетная температура эксплуатации ниже  $-30$  °С. Методы контроля хладостойкости стали таких толщин в нормативных документах существенно различаются и недостаточно проработаны в связи с малым опытом эксплуатации подобного класса конструкций при экстремально низких температурах. Как правило, требуется особое рассмотрение применимости стали в толщине свыше 70 мм.

УДК 622.276.004

*Ключевые слова:* барьеры безопасности, морские транспортно-технологические системы, аварийные ситуации.

**Вальдман Н.А.** Использование барьеров безопасности при разработке проектов морских сооружений на шельфе // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – Вып. 36. – 2013. – С. 124 – 132.

Рассматриваются различные аспекты применения барьеров безопасности при проектировании и эксплуатации морских объектов транспортно-технологических систем в российских шельфовых морях. Приведены примеры организации барьеров безопасности при проектировании морских объектов для Арктики.

УДК 622.691.4.053

*Ключевые слова:* подводный трубопровод, безопасность, сейсмические нагрузки, динамическая модель, оценка риска, линейный осциллятор.

**Муравьева Л.В.** Оценка риска подводных трубопроводов на морском грунте при сейсмическом воздействии // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – Вып. 36. – 2013. – С. 133 – 140.

Морские магистральные трубопроводы должны обладать повышенной надежностью при строительстве и эксплуатации, их основные критерии - техническая и экологическая безопасность. Рассмотрен анализ стабильности трубопровода при чрезвычайных гидродинамических условиях для предельных ситуаций. При построении алгоритмов расчета сооружений с учетом пространственной работы необходимо исходить из нелинейной математической модели, которая наиболее полно отражает характер адаптации сооружения к сильным землетрясениям. Характер действительного поведения сооружения, его устойчивость по отношению к сильным землетрясениям дают возможность проследить поведение сооружения на всех стадиях его работы - от упругой до полного разрушения.

УДК 629.124: 622.242: 539.4

*Ключевые слова:* СПБУ, прочность конструкции, методики расчета, ветро-волновые нагрузки, ветоятностные и детерминистические методы расчета.

**Берхин И.М., Литонов О.Е.** Усовершенствованная методика расчетов прочности конструкций самоподъемных плавучих буровых установок при ветро-волновых воздействиях // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – Вып. 36. – 2013. – С. 141 – 150.

Рассматриваются методики и программы расчета опорно-подъемных устройств самоподъемных плавучих установок (СПБУ), используемые при проектировании СПБУ в ЦКБ "Коралл" (методики Lit-1, Leg-1 и Leg-2).

Основное внимание уделяется Методике Leg-2 (Коралл) – новой разработке, в которой используются современные направления расчета СПБУ. Она основана на использовании метода конечных элементов (МКЭ) не только в части расчета напряженно-деформированного состояния опорных колонн, но и для определения гидродинамических нагрузок. Важным отличием этой методики является то, что конечно-элементная модель включает не только опорные колонны, но и корпус, т.е. моделирует СПБУ в целом. Все методики являются универсальными и пригодны для СПБУ, предназначенных для работы как на глубокой, так и на мелкой воде, как для решетчатых, так и для цилиндрических опорных колонн. Делаются выводы о перспективах применения новаций в рассмотренных методиках и их гипотетическом внедрении в правила РС.

УДК – 629.123

*Ключевые слова:* танкер, защита окружающей среды, аварийные разливы нефти, экологическая безопасность, столкновения, пожары, разлом корпуса, посадка на мель, статистика аварий.

**Макаров В.Г., Никитин В.С., Жмойда И.А.** Экологические и экономические проблемы эксплуатации танкеров // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – Вып. 36. – 2013. – С. 151 – 172.

Рассматриваются основные проблемы экологической безопасности эксплуатации танкеров, источники и виды загрязнений, мероприятия, направленные на их предупреждение. Особое внимание уделяется авариям и катастрофам танкеров, связанным с их гибелью, значительными разрушениями корпуса, разливами нефтегруза.

УДК 621.181.016

*Ключевые слова:* органический теплоноситель, неисправности котельных установок, эффективность; системы циркуляции термомасла, автоматического управления, контроля и диагностики.

**Костылев И.И., Петухов В.А.** Повышение эффективности технической эксплуатации судовых систем теплоснабжения с органическим теплоносителем // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – Вып. 36. – 2013. – С. 173 – 190.

Выполнен анализ опыта эксплуатации судовых систем теплоснабжения и котельных установок с органическим теплоносителем. Рассмотрены новые технические решения, направленные на повышение эффективности их технической эксплуатации.

УДК 629.541 - 546; 629.5.021.18

*Ключевые слова:* энергетическая эффективность, суда ледового плавания.

**Шурпяк В.К., Гришкин В.В.** О конструктивном коэффициенте энергетической эффективности судов ледового плавания // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – Вып. 36. – 2013. – С. 191 – 212.

Представлены данные расчета конструктивного коэффициента энергетической эффективности существующих судов ледового плавания, имеющих класс РС, на соответствие нормативам ИМО для судов различного назначения. Проверяется возможность применения для судов с классом РС поправочных коэффициентов, предусмотренных резолюцией ИМО МЕРС.212

(63) для судов с финско-шведским ледовым классом. Делается вывод, что для судов с ледовым классом РС Arc6 – Arc9 невозможно применение поправочных коэффициентов судов с финско-шведским ледовым классом.

УДК 621.433.001.5

*Ключевые слова:* двухтопливные судовые дизели, сжиженный природный газ, параметры, разработка, совершенствование.

**Сорокин В.А.** Анализ современного состояния и тенденций развития судовых двухтопливных дизелей // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – Вып. 36. – 2013. – С. 213 – 238.

В связи с истощением природных запасов нефти, экологическими проблемами использования нефтяных моторных топлив все более актуальным становится применение в судовых энергетических установках альтернативных топлив, к числу которых в первую очередь относится сжиженный природный газ (СПГ). Представлены результаты анализа производимых ведущими фирмами двухтопливных двигателей, их технико-эксплуатационных характеристик и перспектив использования в судовой энергетике. Показано, что в качестве альтернативного топлива на ближайшую перспективу в судовой энергетике будет применяться СПГ, имеющий лучшие технико-эксплуатационные показатели по сравнению с жидкими нефтяными топливами. Приведены основные физико-химические свойства СПГ, и показана возможность его применения в судовых дизелях. Сделан вывод, что в настоящее время двухтопливные двигатели, выпускаемые различными фирмами, в полной мере удовлетворяют потребности мирового судостроения.

УДК 629.56

*Ключевые слова:* учебно-производственное судно, плавательная практика, морская транспортная отрасль, методики обучения.

**Чулкин С.Г., Петров В.М., Ольховик Е.О.** Разработка концепции нового учебно-производственного судна для подготовки специалистов морской транспортной отрасли // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – Вып. 36. – 2013. – С. 239 – 244.

Предложен новый подход к организации плавательной практики курсантов морских специальностей. Для этого, в рамках договоренностей с крупными судоходными компаниями, действующие современные суда по возможности доукомплектовываются необходимым учебным и производственным оборудованием, в результате чего группы курсантов (6–12 человек) смогут проходить практическое обучение и полноценно участвовать в несении вахты на судне.

УДК 551.577.53:574.23:347.796

*Ключевые слова:* человеческий фактор, Севморпуть, инфраструктура, подготовка кадров, психофизиологические показатели, психологический паспорт профессии.

**Григорьев Н.Н. , Двинин А.П., Латухов С.В., Наконечный М.М.** Проблемы освоения Арктики с учетом влияния человеческого фактора // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – Вып. 36. – 2013. – С. 245 – 254.

Особое внимание уделено анализу доминирующей причины аварийности на морском флоте – «человеческому фактору». Понятие «человеческий фактор» трактуется с позиций психофизиологических показателей личности. Существование такой взаимосвязи подтверждается данными статистики аварийности. Особый акцент сделан на важности проведения психофизиологического отбора абитуриентов при поступлении в морские учебные заведения на специальности, сопряженные с необходимостью принимать управленческие решения в стрессовых ситуациях, что особенно важно, имея в виду судоходство в Арктике.

УДК 629.5.01

*Ключевые слова:* пассажирское круизное судно, путевые условия, проектирование, параметрический ряд, суда смешанного (река-море) плавания, Правила Российского морского регистра судоходства.

**Егоров Г.В., Ильницкий И.А., Калугин Я.В.** Круизные пассажирские суда смешанного (река-море) плавания для российских внутренних водных путей // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – Вып. 36. – 2013. – С. 255 – 276.

Обоснован параметрический ряд современных круизных судов (КС) смешанного (река-море) плавания, ориентированных на российские внутренние водные пути и представляющих принципиальный интерес для отечественного классификационного общества. Приведены основные характеристики и конструктивные решения существующих и спроектированных КС. Сделан вывод, что требования Регистра к таким судам должны исходить из оптимального сочетания возможностей, определяемых главными параметрами судов, и необходимости обеспечить безопасность и экологичность в соответствии с предполагаемыми районами плавания.

UDC 629.12.001.11

**Key words:** *stability, small ships, specification.*

**Nazarov A.G.** Criteria for Evaluating Stability of Small Ships // Transactions of Russian Maritime Register of Shipping. – Issue 36. – 2013. – P. 16 – 26.

Various normative documents on evaluation of stability of small ships are reviewed, and recommendations for their improvement are provided. In the context of the work carried out by RS and other classification societies for improvement of the normative documents, special attention is paid to updating of the requirements for stability as the main seaworthiness characteristic of small ships (i.e. ships with hull length  $LH < 24$  m). Regarding improvement of their safety, the current requirements for the intact stability are reviewed and recommendations for their improvement from the designer's point of view are introduced.

UDC 629.5.01

**Key words:** *high-speed patrol vessel, coast guard, ice class, seaworthiness characteristics, design, rules of Russian Maritime Register of Shipping.*

**Taritsa G.V., Shcherbakov I.V., Verakso K.S.** Optimization of Design Solutions for Improvement of Sea-worthiness Characteristics Based on the Results of the Prototype Ship Operation // Transactions of Russian Maritime Register of Shipping. – Issue 36. – 2013. – P. 27 – 40.

The fundamental approach to comprehensive analysis of the prototype ship characteristics for further optimization of design solutions for improvement of seaworthiness characteristics of ships of a series is introduced. The comparative analysis of results of the model tests, engineering evaluation made by the specialized software NAPA and the full-scale tests of the prototype ship and the ship of a series is performed. The results of modernization of the prototype ship, enhancement of performance and habitable conditions on the ship of a series are presented.

UDC 629.12.001.33:061.1 (47+57)

**Key words:** *ships of river-sea navigation, requirements for hull strength, long-term sea state characteristics, sea state restrictions, reliability of sea state forecast, reduction factors to the total and local wave loads.*

**Efimenkov Y.I., Kuteynikov M.A., Markozov G.V., Sotskov S.A.** Basic Results of Developing Requirements for Ships of Restricted Area of Navigation R2-RSN(4,5) // Transactions of Russian Maritime Register of Shipping. – Issue 36. – 2013. – P. 41 – 53.

Experience in operation, design and modernization of ships of river-sea navigation has shown the necessity to develop the requirements for a new class of ships of restricted area of navigation **R2-RSN(4,5)**. The feasibility of introducing an intermediate class is determined that allows for operation of the ship of restricted area of navigation **R2-RSN(4,5)** in the same areas as the ship of restricted area of navigation **R2-RSN** but with a more stringent sea state restrictions. The task of developing requirements for a new class of ships of restricted area of navigation **R2-RSN(4,5)** is solved by interpolating the RS current requirements to the ships of river-sea navigation of restricted areas of navigation **R2-RSN** and **R3-RSN**.

UDC 629.12.001

**Key words:** *ship's rolling, measurement of stability characteristics, long-length hull sections*

**Yarisov V.V.** Determination of Equivalent Inertia Characteristics, Damping and Stability of Ships with Liquid Cargo in the Long-Length Hull Sections // Transactions of Russian Maritime Register of Shipping. – Issue 36. – 2013. – P. 54 – 67.

Calculating formulae for determination of the equivalent inertia characteristics, damping and stability of ships with liquid cargoes to dimensionless form are given. Approximate formulae to determine the coefficients of resistance to internal fluid movement for ships' compartments are determined. Design and test data on the ship motions with liquid cargoes are compared. The capability to automatically calculate the universal equivalent characteristics with plotting of the relevant graphs or nomograms is demonstrated.

UDC 629.124.74:629.563.2:51-74

*Key words: mathematical modeling, offshore facilities, self-positioning systems, external loads, static and dynamic problems.*

**Bolshev A.S., Frolov S.A., Kuteynikov M.A.** Mathematical Modeling of Floating Facilities Behaviour by Means of the Software Package “Anchored Structures” // Transactions of Russian Maritime Register of Shipping. – Issue 36. – 2013. – P. 68 – 90.

It is ascertained that the most versatile and relatively inexpensive way to study the statics and dynamics of floating facilities is to create a powerful problem-oriented software package allowing prompt mathematical modeling of all necessary operating modes of various facilities' designs.

In St. Petersburg State Polytechnical University the software package “Anchored Structures” has been created and has been successfully updated for more than 15 years with the continuous support of Russian Maritime Register of Shipping to solve most of the static and dynamic problems encountered by the designer. Methodological basis for solution of design problems and examples of practical application of the software package are given.

UDC 625.12:539.4

*Key words: testing for defects, residual hogging, residual hull bending axis.*

**Baryshnikov S.O., Chistov V.B.** Problems of Testing for Defects and Hull Repair of Ships of River-Sea Navigation // Transactions of Russian Maritime Register of Shipping. – Issue 36. – 2013. – P. 91 – 99.

The necessity for more accurate measurement of residual thickness of the hull plate structures of ships of river-sea navigation is substantiated. The necessity for more precise localization of dents on deck or bottom in one section is demonstrated. Attention is paid to practicability of considering the general hull hogging, and the original method for determining ordinates of the residual hull bending axis is introduced. Necessary consideration of the loss of stability of the shell and reinforcement plates is stated. Relation is demonstrated for determination of size of the plate cross-section and place of their installation where the loss of stability is excluded. Repair processes are

introduced to eliminate the residual hogging. It is recommended to use the article when improving the RS rules.

UDC 669.14.018.41:621.771.23

**Key words:** *cold-resistant steels, manufacturing procedures for rolled plates, high-temperature thermo-mechanical treatment, yield stress.*

**Bashaev V.K., Khlusova E.I., Golosienko S.A.** Development of Manufacturing Procedures for Rolled Plates of Thickness up to 50 mm Made of High Strength Steels with Index "Arc" // Transactions of Russian Maritime Register of Shipping. – Issue 36. – 2013. – P. 100 – 111.

The main trend in the development of modern cold-resistant steels for extreme conditions in the Arctic and Far East is application of high-precision thermo-mechanical treatment or heat refining combined with microalloying while reducing the content of expensive alloying elements. The main objective is to obtain fine and ultrafine metal structure, providing higher strength properties along with cold and crack resistance. This opens possibilities for extending the range of application of high strength steels, provides improved operation reliability, reduced metal consumption and welding labour content due to application of steels of smaller thicknesses.

UDC 620.171.34:539.4

**Key words:** *cold resistance, CTOD, ductile-brittle transition temperature, "energy" approach.*

**Ilyin A.V., Filin V.Yu., Bashaev V.K.** Determination of Crack Resistance of Cold-Resistant High Strength Steel of Thickness up to 150 mm // Transactions of Russian Maritime Register of Shipping. – Issue 36. – 2013. – P. 112 – 123.

Development of hydrocarbon deposits in the Arctic shelf of Russia requires development of new cold-resistant materials for large-size welded structures. The main class of materials for these structures are low-alloy steels characterized by ductile-brittle temperature transition. For some structural elements the required thickness is 130 – 150 mm

and design operating temperature is below – 30 °C. Methods of cold-resistance testing of these steels in the existing normative documents differ significantly and are poorly developed due to the low operating experience of this class of structures at extremely low temperatures. As a rule, application of steels of thickness above 70 mm is subject to special consideration.

UDC 622.276.004

**Key words:** *safety barriers, marine transport and processing systems, emergency situations.*

**Waldman N.A.** Application of Safety Barriers in Project Development of Offshore Facilities // Transactions of Russian Maritime Register of Shipping. – Issue 36. – 2013. – P. 124 – 132.

Different aspects of the safety barriers' application in design and operation of offshore facilities of transport and processing systems in the Russian shelf seas are reviewed. Examples of the safety barriers' arrangement are given in design of offshore facilities for the Arctic regions.

UDC 622.691.4.053

**Key words:** *subsea piping, safety, seismic loads, dynamic model, risk assessment, linear oscillator.*

**Muravyova L.V.** Risk Assessment of Subsea Piping on the Seabed Under Seismic Loads // Transactions of Russian Maritime Register of Shipping. – Issue 36. – 2013. - P. 133 – 140.

Main pipelines shall be of high reliability under construction and in operation, their main criterion is technical and environmental safety. The pipelines' stability under hydrodynamic conditions in extreme situations is reviewed. When developing algorithms for structural analysis regarding the spatial performance, it is necessary to assume from the non-linear mathematical model completely reflecting the structure adaptation to strong earthquakes. The nature of actual behaviour of a structure, its resistance to strong earthquakes enables to trace the

behaviour of the structure at all operational stages from elastic deformation to complete destruction.

UDC 629.124: 622.242: 539.4

**Key words:** *MODU, structural strength, calculation methods, wind and wave loads, probabilistic and deterministic calculation methods.*

**Berkhin I.M., Litonov O.E.** Improved Method of Strength Analysis of Self-Elevating Mobile Offshore Drilling Units Under Wind and Wave Loads // Transactions of Russian Maritime Register of Shipping. – Issue 36. – 2013. – P. 141 – 150.

Methods and software for strength analysis of jacking systems of self-elevating mobile offshore drilling units (MODU) used in MODU design by Central Design Bureau (CDB) CORALL (calculation methods Lit-1, Leg-1 and Leg-2) are reviewed.

The focus is on Method Leg-2 (Corall) that uses modern means for self-elevating MODU calculation. It is based on the finite element analysis (FEA) used not only for stress-strain state analysis of the legs but also for determination of hydrodynamic loads. This method is characterized by the finite-element model of both the legs and the hull, i. e. the model of self-elevating MODU as a whole. All methods are universal and suitable for the self-elevating MODU intended for both deep and shallow waters, both for gridwork and cylindrical legs. Conclusions are made for advanced application of innovative methods mentioned above and their hypothetical implementation in the RS rules.

UDC 629.123

**Key words:** *tanker, environmental protection, oil spills, environmental safety, collisions, fires, hull de-struction, grounding, accident statistics.*

**Makarov V.G., Nikitin V.S., Zhmoida I.A.** Environmental and Economical Problems of Tankers Operation // Transactions of Russian Maritime Register of Shipping. – Issue 36. – 2013. – P. 151 – 172.

The basic problems of environmental safety of tanker operation, the sources and types of pollution, preventive measures are reviewed.

Particular attention is paid to the accidents with tankers related to their wrecks, significant hull destructions, oil spills.

UDC 621.181.016

*Key words:* thermal liquid, faults of boiler plants, efficiency, thermal oil circulation, automated control, monitoring and diagnostic systems.

**Kostylev I.I., Petukhov V.A.** Enhancement of Efficiency of the Ship's Thermal Liquid Systems // Transactions of Russian Maritime Register of Shipping. – Issue 36. – 2013. – P. 173 – 190.

Operating experience of the ship's heating systems and boiler plants with thermal liquids are reviewed. Innovative technologies aimed at enhancement of efficiency are presented.

UDC 629.541 - 546; 629.5.021.18

*Key words:* energy efficiency, ice class ships

**Shurpyak V.K., Grishkin V.V.** Energy Efficiency Design Index (EEDI) of Ice Class Ships // Transactions of Russian Maritime Register of Shipping. – Issue 36. – 2013. – P. 191 – 212.

The EEDI calculations of existing ice class ships under the RS class are presented for compliance with the IMO requirements for different types of ships. Possible application of correction factor prescribed by IMO resolution MEPC.212(63) for the ships with the Finnish-Swedish ice class is reviewed in relation to the RS-classed ships. The conclusion is made that the correction factors of the ships with the Finnish-Swedish ice class cannot be applied to the RS-classed ships with ice classes **Arc6 – Arc9**.

UDC 621.433.001.5

**Key words:** *dual-fuel marine diesel engines, liquefied natural gas, parameters, development, improve-ment.*

**Sorokin V.A.** Analysis of the Current Status and Development Trends of Dual-Fuel Marine Diesel Engines // Transactions of Russian Maritime Register of Shipping. – Issue 36. – 2013. – P. 213 – 238.

In view of depletion of oil natural resources, environmental problems related to use of oil fuels, the application of alternative types of fuel, primarily liquefied natural gas (LNG), in the ship power plants is becoming increasingly important. The results of the review made by the leading manufacturers of the dual-fuel engines, their technical performance and prospective use in the ship power plants are presented. It is shown that in the near future LNG as an alternative type of fuel shall be used in the ship power plants due to the best performance as compared to the liquid oil fuels. The basic LNG physical and chemical properties, and the possibility of its use in marine diesel engines are demonstrated. The conclusion is made that the current dual-fuel engines manufactured by different companies are completely adequate for the needs of the global shipbuilding industry.

UDC 629.56

**Key words:** *training ship, seagoing practice, maritime transport sector, training procedures.*

**Chulkin S.G., Petrov V.M., Olkhovik E.O.** Development of a New Concept of Training Ship for the Specialists Engaged in the Maritime Transport Sector // Transactions of Russian Maritime Register of Shipping. – Issue 36. – 2013. – P. 239 – 244.

A new approach to seagoing practice for marine cadets is presented. For this purpose under agreements with the major shipping companies the operating modern ships are replenished, where possible, with necessary training and production facilities to provide for a group of cadets (6 – 12 persons) the practical training and proper watchkeeping on board.

UDC 551.577.53:574.23:347.796

**Key words:** *human factor, Northern Sea Route, infrastructure, personnel training, physiological parameters, psychological professional passport.*

**Grigoriev N.N., Dvinin A.P., Latukhov S.V., Nakonechny M.M.** Problems of the Arctic Development in View of the Human Factor // Transactions of Russian Maritime Register of Shipping. – Issue 36. – 2013. – P. 245 – 254.

Special attention is paid to the analysis of the human factor as the dominant cause of accidents in the Navy. The concept of human factor is defined in terms of psycho-physiological personality parameters. This relationship is confirmed by the accident statistics. Particular emphasis is given to the importance of psycho-physiological selection of applicants to marine educational institutions connected with management decision-making in stressful situations that is particularly important in relation to the Arctic shipping.

UDC 629.5.01

**Key words:** *passenger cruise ship, sailing conditions, design, parameter range, ships of river-sea navigation, rules of Russian Maritime Register of Shipping.*

**Egorov G.V., Ilnitsky I.A., Kalugin Ya.V.** Passenger Cruise Ships of River-Sea Navigation Operated in the Russian Inland Waterways // Transactions of Russian Maritime Register of Shipping. – Issue 36. – 2013. – P. 255 – 276.

The parameter range of the modern cruise ships of river-sea navigation operated in the Russian inland waterways and attractive for the national classification society is substantiated. The main particulars and design solutions of the existing and designed cruise ships are given. It is concluded that the requirements of the Register to these ships shall proceed from the optimal balance of the capabilities defined by the main particulars and the necessity to provide the safety and environmental protection in the prescribed area of navigation.

Российский морской регистр судоходства

**Научно-технический сборник, вып. 36**

*Редакционная коллегия  
Российского морского регистра судоходства*

Ответственный за выпуск *О.В. Колышкин*  
Главный редактор *М.Р. Маркушина*  
Редактор *Е.Б. Мюллер*  
Компьютерная верстка *С.С. Лазарева*

Подписано в печать 15.11.2013 Флотат 60 x 84/16. Гарнитура Гельветика  
Усл. печ. л.: 17,4. Уч.-изд.л.: 15,8. Тираж 100

Российский морской регистр судоходства  
191186, Санкт-Петербург, Дворцовая набережная, 8  
[www.rs-class.org/ru/](http://www.rs-class.org/ru/)