

РОССИЙСКИЙ МОРСКОЙ



РЕГИСТР СУДОХОДСТВА

# НАУЧНО- ТЕХНИЧЕСКИЙ СБОРНИК

ВЫПУСК

30

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ

2007

Редакционная коллегия Российского морского регистра судоходства:

Н.А. Решетов, (председатель) В.И. Евенко, В.П. Карпенко, С.С. Коцкий (заместители председателя), А.Е. Сазонов, С.А. Быстров, А.А. Захаров, С.В. Кириллов, М.Ф. Ковзова, И.Н. Копилец, М.Н. Кринская, М.А. Кутейников, В.Б. Мачульский, А.С. Михайлов, Е.Б. Мюллер, А.А. Сергеев, В.А. Хоботов, В.Г. Чернов.

**В** декабре 2007 года состоится очередное заседание Научно-технического совета Российского морского регистра судоходства. На протяжении долгих лет в его составе успешно работают многие видные ученые, заслуженные деятели науки и техники, специалисты научно-исследовательских институтов, конструкторских бюро, Регистра – люди, вносящие неоценимый вклад в развитие транспортной и судостроительной науки и в совершенствование нормативной базы РС.

К глубококому сожалению, некоторых из них уже нет с нами. Их памяти посвящается вступительное слово к настоящему сборнику.

*Н.А. Решетов*

## **О ВКЛАДЕ Ф.М. КАЦМАНА В СТАНОВЛЕНИЕ И РАЗВИТИЕ МОРСКОЙ НАУКИ**

В декабре 2007 года очередное заседание Президиума Научно-технического совета Регистра впервые почти за 40 лет пройдет без Ф.М. Кацмана, который являлся его постоянным членом, а в течение ряда лет – был заместителем председателя Президиума по научной работе.

Вся жизнь Феликса Максовича была связана с флотом. Он начал свой трудовой путь в тяжелые годы войны в Средне-Волжском пароходстве. В 1948 году закончил Судомеханический факультет Ленинградского высшего мореходного училища. По специальному запросу Ф.М. Кацман был направлен в головное проектно-конструкторское бюро №1 Минморфлота. В 1952 году его назначают на должность начальника отдела, на которой он проработал до 1967 года. В 1963 году Феликс Максович защитил кандидатскую диссертацию, а в 1967 году начал преподавательскую деятельность в Ленинградском высшем инженерном

училище им. адм. С.О. Макарова. В 1973 году он становится начальником кафедры «Теория и устройство судна», в 1983 году успешно защищает докторскую диссертацию, а в 1984 году ему присваивается звание профессора.

Ф.М. Кацман был известным ученым в области проектирования и эксплуатации морских судов. Ему принадлежат более 450 научных трудов, в число которых входят 35 монографий, а также 15 авторских свидетельств и патентов на изобретения. Диапазон научных интересов Феликса Максовича охватывал множество направлений: от проектирования винтов до таких масштабных, как безопасная транспортировка углеводородов в северных районах и создание транспортных коридоров. Он являлся бессменным руководителем научной школы по эксплуатации комплекса «корпус судна – двигатель – движитель». Одним из направлений его многогранной деятельности была разработка глобальной концепции безопасности судоходства. Специальная монография, написанная Ф.М. Кацманом в последние годы его жизни, называлась «Человеческий фактор в проблеме обеспечения безопасности судоходства». Ф.М. Кацман являлся научным руководителем 33 кандидатов и докторов наук, его с благодарностью и теплотой вспоминают многие выпускники ГМА им. адм. С.О. Макарова.

Ф.М. Кацман как ученый отличался масштабностью мышления, ясно видел перспективные направления. Благодаря неисчерпаемой энергии ему удавалось сочетать научную и педагогическую деятельность с большой практической и общественной работой в сферах судостроения и судоходства. В течение длительного времени он был советником начальника БМП по науке, членом Научно-технического совета Министерства транспорта РФ, членом Научно-технического совета при губернаторе Ленинградской области, советником Северо-западного филиала Союза российских судовладельцев, членом Морского совета при Правительстве Санкт-Петербурга.

Он являлся главным научным сотрудником, советником директора и членом Ученого совета Института проблем транспорта РАН практически с момента образования института, занимал пост вице-президента Российской академии транспорта по научной работе, был избран действительным членом ряда

*отечественных и зарубежных академий: Российской академии транспорта, Академии навигации и управления, академий транспорта России и Казахстана, Института морских инженеров Великобритании и других.*

*Деятельность Ф.М. Кацмана отмечена правительственными, ведомственными и региональными наградами: орденом «Знак Почета», медалями, грамотами Министерства транспорта, губернатора Санкт-Петербурга и другими. Ему были присвоены почетные звания «Заслуженный деятель науки и техники РФ», «Почетный работник морского флота», «Почетный работник транспорта России».*

*Необходимо особенно отметить плодотворное сотрудничество Феликса Максовича с Российским морским регистром судоходства, которое продолжалось более 40 лет. Под руководством Ф.М. Кацмана были разработаны требования к нормам прочности валопроводов и лопастей гребных винтов для ледоколов ЛЛ6–ЛЛ9 и судов с ледовыми укреплениями Л1–Л9. Он был разработчиком требований к зубчатым зацеплениям редукторов, применяемых в составе механизмов ледоколов и судов ледового плавания. Будучи в авангарде судостроительной науки, Ф.М. Кацман разработал требования к новому типу винтов с саблевидной формой лопастей. С появлением высокоскоростных судов Ф.М. Кацманом были сформулированы требования к нормам прочности гребных винтов для судов этого типа. Им также была составлена инструкция по надзору за ремонтом и по освидетельствованиям винтов и валопроводов. Это перечень лишь некоторых его работ, результаты которых, войдя в правила РС, явились значительным вкладом в развитие отрасли и совершенствование нормативной базы Регистра.*

*Ушел большой ученый, прекрасный человек. Дело его продолжают многочисленные ученики.*

## **О ВКЛАДЕ Д.В. ВИЛЕСОВА В РАЗВИТИЕ НОРМАТИВНОЙ БАЗЫ РОССИЙСКОГО МОРСКОГО РЕГИСТРА СУДОХОДСТВА**

*На протяжении более 30 лет Дмитрий Васильевич Вилесов, доктор технических наук, профессор Государственного морского технического университета (ГМТУ), возглавлял секцию «Электрическое оборудование» при Научно-техническом совете РС, активно участвовал в рабочей группе МАКО «Электрическое оборудование», председателем которой в 1998 – 2004 гг. был Российский морской регистр судоходства, а также в работе Международной электротехнической комиссии (МЭК).*

*За эти годы при непосредственном участии Д.В. Вилесова был внесен огромный вклад в развитие нормативной базы Регистра.*

*На базе ГМТУ под руководством Д.В. Вилесова разработан комплекс программ, позволяющих прогнозировать необходимые данные о параметрах состояния судовых электроэнергетических систем (СЭЭС) в их типовых режимах. Созданный комплекс программ позволяет определять параметры основных видов переходных режимов СЭЭС: включения и отключения статической нагрузки; пуска и торможения асинхронных двигателей (в том числе соизмеримых по мощности с генератором); возникновения и отключения коротких замыканий в различных точках системы при различных соотношениях мощностей и типов генераторных агрегатов и составе подключенных потребителей; неточной синхронизации судовых генераторов между собой и с береговой сетью; параллельной работы с валогенератором при переменной (из-за волны) угловой скорости. Этот комплекс программ предназначен для расчетов параметров состояний СЭЭС с типичными структурами в нормальных и аварийных режимах и базируется на одобренных РС методах расчета переходных процессов в СЭЭС.*

*В основу этих методов положены математические модели элементов СЭЭС, апробированные в течение ряда лет во многих*

*теоретических и экспериментальных работах. Разработанные и использованные здесь новые модели систем автоматического регулирования частоты и напряжения позволяют описывать реальные системы регулирования, построенные на принципах регулирования по отклонению или комбинированного регулирования.*

*Кроме того, в комплексе используется новое, более точное математическое описание систем автоматического распределения активной и реактивной нагрузки параллельно работающих машин.*

*В связи с вступлением в силу Федерального закона «О государственном регулировании в области обеспечения электромагнитной совместимости технических средств», ГМТУ под руководством Д.В. Вилесова по заданию Регистра была выполнена работа по корректировке требований Правил РС в части нормирования условий электромагнитной совместимости судового оборудования.*

*Целью работы было приведение в соответствие требований правил РС с положениями настоящего Закона, а также с требованиями международных стандартов МЭК 60533 и 60945, не входящими в противоречие с требованиями Федерального закона.*

*В результате в Правила РС включены современные требования по обеспечению электромагнитной совместимости на борту судна, как в части нормирования требований, так и в части методик проведения испытаний.*

*Также в связи с введением Правила V/17 новой главы V «Безопасность мореплавания» Международной конвенции СОЛАС-74 была подготовлена и утверждена Минтрансом РФ «Типовая программа и методика испытаний на ЭМС электронного и электрического оборудования, расположенного на ходовом мостике судна».*

*Кроме нормативной и научно-технической деятельности Дмитрий Васильевич также уделял большое внимание подготовке судовых инженеров-электриков по вопросам технического регулирования. Практика показывает, что молодые специалисты, окончившие вуз по специальности «электрооборудование судов», как правило, не имеют представлений о категориях тех-*

нического регулирования в тех объемах, которые необходимы в самом начале их профессиональной деятельности. Поэтому очевидна необходимость формирования соответствующих основных представлений и знаний у будущих специалистов еще на стадии их обучения в вузе.

Знание содержания специальных разделов Правил РС (часть XI «Электрическое оборудование» и часть XV «Автоматизация») и Руководств РС по техническому наблюдению является для судовых инженеров-электриков необходимым условием квалифицированных и правомерных решений практически всех конкретных задач по электрооборудованию и автоматизации судов. Важным аспектом подготовки является развитие у будущих инженеров-электриков чувства ответственности в своей деятельности за обеспечение надежности питания электроэнергией – одной из основ безопасности судна.

Сказанное выше побудило Д.В. Вилесова предложить создание дисциплины, предварительно названной «Техническое регулирование безопасности морских судов», для изучения основных вопросов технического регулирования, применительно к задачам подготовки студентов ГМТУ по специальности «Системы электроэнергетики и автоматизации судов». Целью преподавания дисциплины должно явиться формирование у студентов знаний, навыков и представлений в области технического регулирования, осуществляемого РС в судовой технике, которые необходимы для компетентного участия в решении практических задач разработки и эксплуатации электротехнического оборудования и средств автоматизации судов.

Вот далеко не полный перечень вопросов научно-технического сотрудничества Д.В. Вилесова с Российским морским регистром судоходства, которые нашли отражение в нормативных документах РС и позволили Регистру занять достойное место среди ведущих классификационных обществ.

УДК 629.12.539.4 001.2.001.5

*Г.В. Егоров, М.А. Кутейников*

### **ПРИНЦИПЫ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ БЕРЕГОВЫХ СЛУЖБ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БОРЬБЫ ЗА ЖИВУЧЕСТЬ АВАРИЙНЫХ СУДОВ С УЧЕТОМ ПРОЧНОСТНЫХ ОГРАНИЧЕНИЙ**

С 1 января 2007 года в соответствии с Правилем 37(4) Приложения 1 к МК МАРПОЛ 73/78 введено требование, что каждый нефтеналивной танкер дедвейтом 5000 т и более должен иметь возможность быстрого доступа к береговым службам, способным выполнить расчеты аварийной остойчивости и остаточной прочности (Emergency Response Service (ERS)).

Создание таких служб под техническим наблюдением Российского морского регистра судоходства (РС), было связано с решением большого количества технических и организационных вопросов, а также ряда научных проблем.

Главная из научных проблем заключается в том, что до сих пор не существует общепринятого подхода к оценке остаточной прочности корпусов судов после аварии.

Целью настоящей статьи является попытка формализовать основные принципы деятельности подобных береговых служб, указав пути решения проблемы остаточной прочности корпусов поврежденных судов в рамках единого подхода по обеспечению борьбы за живучесть.

Историю появления требования следует начинать с принятия в августе 1990 года США Oil Pollution Act, в котором впервые появились официальные указания [16] относительно необходимости на-

личия на всех нефтеналивных танкерах, которые заходят в территориальные воды США, непосредственного доступа к программам береговых служб при посадках на мель, столкновениях, взрывах, пожарах, разрушениях конструкции в шторм.

При этом впервые были сформулированы основные требования к ERS:

- доступ в любое время дня и ночи;

- наличие программ расчета;

- выполнение расчетов по конкретному судну с учетом его реального состояния и загрузки;

- выполнение расчетов остаточной прочности, базирующихся на полученных с судна данных по повреждениям корпуса;

- выполнение расчетов аварийной остойчивости, базирующихся на фактической информации по затопленным помещениям;

- подготовка рекомендаций по разгрузке, спрямлению, обеспечивающих сохранение прочности и остойчивости, уменьшение реакции грунта;

- выполнение расчета усилий на тихой воде с учетом реакции грунта;

- наличие «аварийного» комплекта судовой документации конкретного судна.

Именно такой подход был реализован в ряде береговых центров, созданных как классификационными обществами (DNV, LR), так и частными фирмами в США.

Береговая Охрана США с 8 августа 2005 года распространила требования о наличии у судовладельца договора со специализированным береговым центром на другие типы судов валовой вместимостью 400 единиц и более [17].

Известно, что живучесть судна обеспечивается конструктивными мероприятиями (при его постройке), организационно-техническими мероприятиями (на протяжении всего периода эксплуатации судна) и борьбой за живучесть после получения повреждения [13, 14].

Схема действий во время аварии приведена на рис. 1. С момента принятия решения о сохранении судна начинается борьба за живучесть аварийного судна.

Несмотря на то, что еще в 1870 – 1898 гг. адмиралом С.О. Макаровым [13] были предложены первые таблицы непотопляемос-



Рис. 1  
Организация действий экипажа и берегового центра ERS  
по исправлению аварийной ситуации

ти, разработаны принципы спрямления поврежденного судна, в подавляющем большинстве последующих работ рассматривались вопросы обеспечения первых двух категорий: конструктивных и организационно-технических мероприятий при постройке и эксплуатации соответственно.

При этом возникла парадоксальная ситуация, когда на этапе проектирования точность расчетов аварийной посадки и остойчивости достигает фантастически малых величин, а в момент аварии основу приказов и действий по борьбе за живучесть составляет накопленный опыт в виде НБЖС, иных нормативных документов [10] и интуиция экипажа.

Принципы борьбы за живучесть были развиты А.Н. Крыловым [12], В.Г. Власовым [2], Н.П. Муру [14].

Проблема состоит в высокой степени неопределенности и быстротечности аварийной ситуации. В сочетании с ответственностью за жизнь людей, живучесть судна, сохранность груза и защиту окружающей среды она ставит в очень жесткие рамки человека, принимающего решение. Вероятно, именно это обстоятельство подвигло сначала законодателей США, а затем и ИМО создать береговую поддержку капитану для обеспечения его действий в критической ситуации.

Целевая функция борьбы за живучесть – сохранить судно – определяет и требования к обеспечению безопасного перевода судна в порт после принятия ряда оперативных мер. В их основе лежат задачи выполнения критериев аварийной плавучести и остойчивости и остаточной прочности (см. рис. 2).

Живучесть принято представлять как свойство корпуса судна сохранять или восстанавливать в достаточной мере свои эксплуатационные качества после аварийного изменения нагрузки и несущей способности корпуса, а также после выхода из строя технических средств. При этом под непотопляемостью понимается живучесть при нарушении водонепроницаемости корпуса и затоплении части отсеков.

До настоящего времени требования классификационных обществ к непотопляемости судов регламентируют обеспечение аварийной плавучести и остойчивость поврежденных судов (навалочников, танкеров, химовозов, газовозов, пассажирских судов, а также сухогрузных судов длиной более 80 м и ряда других типов) при достаточно больших расчетных размерах повреждений.

Критерии аварийной плавучести и остойчивости изложены в правилах классификационных обществ и разработках, положенных в основу эксплуатационных документов, например [1].

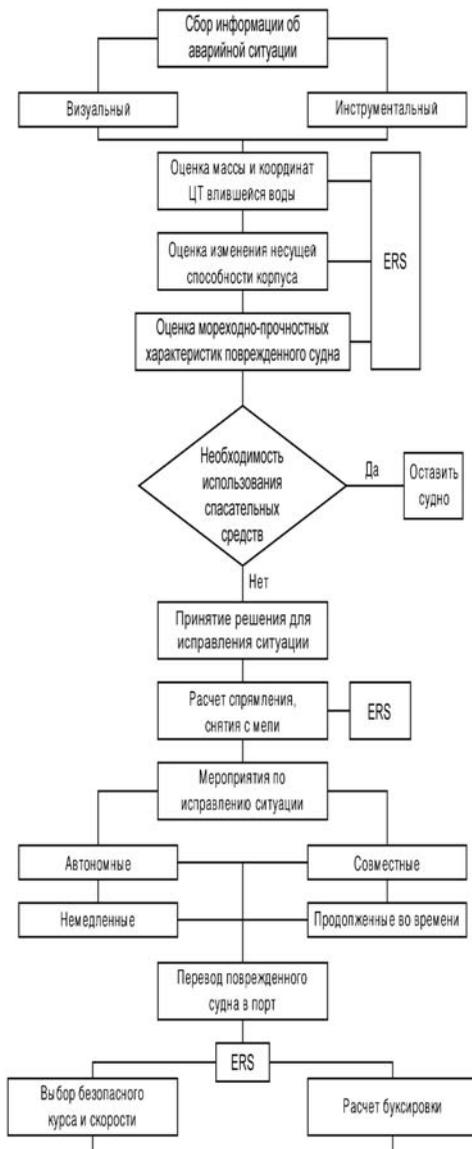


Рис. 2  
 Принципиальная схема борьбы за живучесть судна  
 с участием Emergency Response Service

Исходя из фактических размеров повреждений и изменения нагрузки судна из-за поступления забортной воды, можно утверждать, что в число контролируемых последствий аварий необходимо также включать существенное уменьшение общей прочности (см. табл. 1).

Таким образом, необходимо прежде всего сформулировать критерий аварийной прочности, которого до сих пор в официальных нормативных документах нет.

Разработке подобного критерия были посвящены работы [5, 6, 7, 8, 11], в которых был предложен оперативный подход к борьбе за живучесть с учетом требований прочности, при оценке ряда силовых факторов ранее не рассматриваемых для этой цели (дополнительные нормальные напряжения от стесненного кручения, возможность возникновения упругопластического состояния в поврежденном сечении и его влияния на фактическую несущую способность), методов оценки и оптимизации напряженного состояния корпуса после аварии.

Таблица 1

**Влияние вида аварии на прочность корпуса судна**

Влияние	Аварии				
	Столкновение с судном или иным плавучим средством	Посадка (касание) на грунт	Взрыв	Пожар	Течь
Несущая способность (повреждения)	+	+	+	температурные деформации конструкции	–
Нагрузка					
Забортная вода	+	+	+	–	+
Вылив груза	+	+	+	–	+
Исправление ситуации (спрямление, снятие, тушение)	+	+	+	+	+

Согласно [7] значение допускаемой величины изгибающего момента на тихой воде с учетом повреждений и длительности буксировки до места убежища определяется как

$$[M] = 0,8 / (K_{\Delta} K_{Bi} K_{\theta}) \cdot \sigma_T^H \cdot W_{\min}^0 - M_{\text{ВОЛН}},$$

где  $M_{\text{ВОЛН}}$  – максимальное значение волнового момента на трассе кратковременного перехода (буксировки) в ближайший порт-убежище;

$\sigma_T^H$  – нормативный предел текучести материала корпуса;

$W_{\min}^0$  – минимальный момент сопротивления корпуса до повреждения;

$K_{\Delta}$  – коэффициент, учитывающий возрастание нормальных напряжений из-за потери части продольных связей и состояния косоугольного изгиба;

$K_{Bi}$  – коэффициент возрастания напряжений в сильноповрежденных сечениях открытого типа из-за бимоментов [8];

$K_{\theta}$  – коэффициент возрастания нормальных напряжений при статическом крене [8].

Учитывая кратковременность ситуации, максимальное значение волнового изгибающего момента  $M_{\text{ВОЛН}}$  можно принять равным 4,5 стандартам волнового изгибающего момента  $\sigma_M$  на стационарном трехмерном нерегулярном волнении с высотой волны  $h_3$  % и средним периодом  $T_{CP}(L)$ , как это было сделано в работе [9] для разовых перегонов судов вне установленных им районов плавания.

Основанием для оценки степени поврежденности корпуса и для расчетов непотопляемости являются геометрические размеры пробоины – ее протяженность по длине судна, по высоте, глубине и пр. [6].

Важнейшим звеном борьбы за живучесть аварийного судна, находящегося на плаву (см. рис. 3), является спрямление, обычно рассматриваемое как принятие оперативных мер по уменьшению крена и дифферента судна после аварии.

В практике мореплавания нашел определенное применение ряд способов расчета спрямления поврежденного судна: боевые таблицы непотопляемости С.О. Макарова [13]; способ А.Н. Крылова [12]; первый, второй и смешанный способы В.Г. Власова [2].

Г.Е. Павленко и В.К. Чернышевым на основе «векторного» метода был предложен специальный прибор для расчета спрямления по условиям борьбы с креном, уменьшением дифферента и улучшением остойчивости [15].

АВАРИЙНАЯ СИТУАЦИЯ: ПОВРЕЖДЕННОЕ СУДНО НА ПЛАВУ



Рис. 3  
Принципиальная схема борьбы за живучесть  
при столкновениях и нарушении непроницаемости

Все они обладают существенными недостатками:  
ориентировка на проведение расчетов вручную;  
низкая точность;  
обеспечение восстановления только посадки и, частично, остойчивости,  
что не позволяет применять их для программного обеспечения в рамках ERS.

В [1] предложена оперативная информация в виде графических материалов для оценки посадки, остойчивости и непотопляемости судов, с возможностью применения судовых ЭВМ.

В работе [3] был предложен алгоритм, в котором решалась задача сепарабельного программирования определения оптимального распределения балласта для заданной целевой функции, обеспечивающей либо минимум суммарной массы балласта, либо минимум опасного изгибающего момента с кусочно-линейной аппроксимацией нелинейных ограничений по прочности, дифференалу, крену и остойчивости, использованию линий влияния в ограничениях.

Оптимизация производилась с применением симплекс-метода линейного программирования. Сам алгоритм был реализован в пакете судовых программ "Ship.03–06".

Такой алгоритм обеспечивает решение задачи в оперативных условиях, с учетом требований остаточной прочности поврежденного корпуса судна и может быть рекомендован как для судовых программ, так и для программного обеспечения береговых центров.

Как следует из рис. 4, одной из главных задач ERS при обеспечении борьбы за живучесть судна, севшего на мель, является расчет оптимальной разгрузки судна, с целью недопущения перелома корпуса.

В работе [4] изложен подход, также использующий метод сепарабельного программирования. Он обеспечивает заданное уменьшение опорной реакции (вплоть до полного восстановления плавучести), минимизацию изгибающих моментов и перерезывающих сил (экстремальных и в поврежденном сечении) с целью недопущения разрушения корпуса и удержание посадки и остойчивости в допустимых пределах, как по окончании разгрузки, так и на этапе постановки судна на плаву.

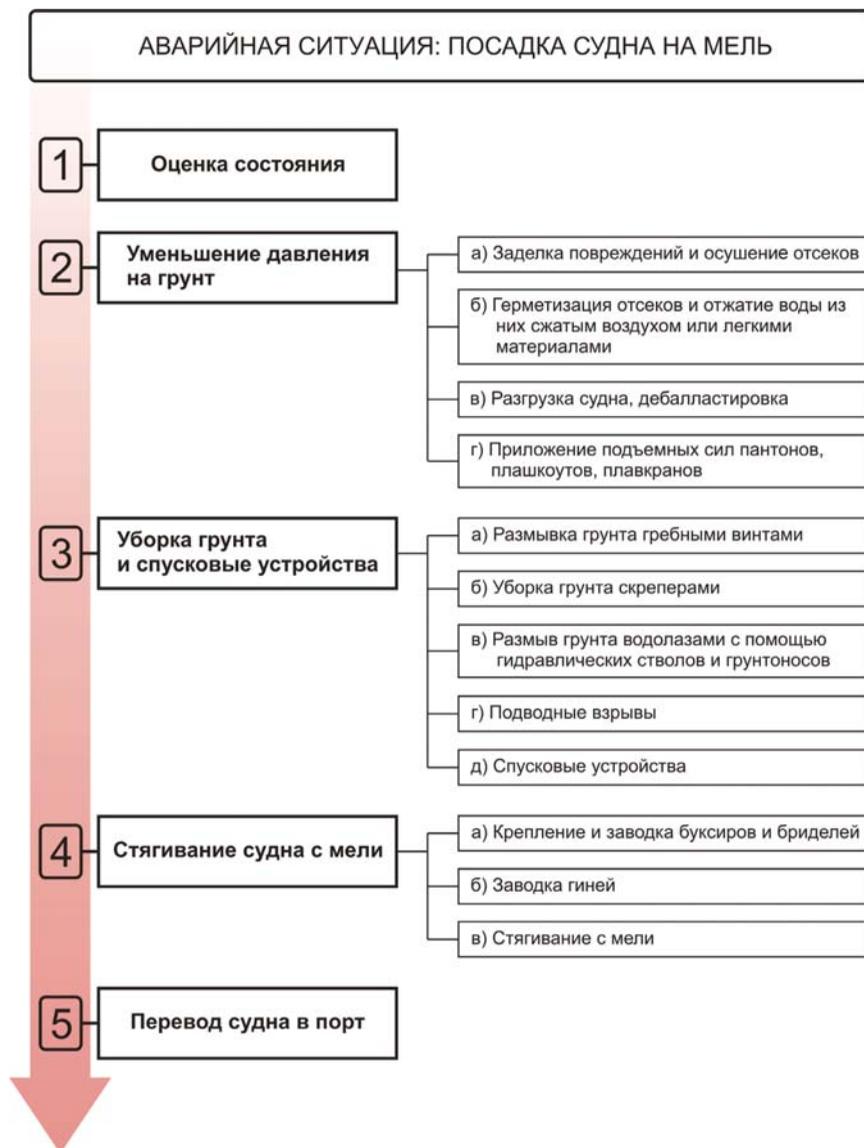


Рис. 4

Принципиальная схема борьбы за живучесть при посадке судна на мель

Использование методов линейного программирования для автоматизации расчетов балластировки и загрузки позволяет получить искомые распределения нагрузки аварийного судна в пределах требуемой точности и ограниченного времени.

Таким образом, можно сделать следующие выводы.

1. Береговой центр ERS должен иметь программное обеспечение, позволяющее производить расчеты аварийной остойчивости и остаточной прочности, оценивать возможный разлив нефти при столкновениях, посадках на мель, конструктивных разрушениях, пожарах, взрывах и др. подобных ситуациях, когда происходит аварийное изменение нагрузки и (или) несущей способности корпуса судна.

2. На основании результатов расчетов береговым центром ERS должны быть разработаны рекомендации капитану по борьбе за живучесть судна и уменьшению возможных ущербов вплоть до состава буксирного ордера для аварийной буксировки.

3. Для выполнения этих функций в ERS должна быть создана база данных по конкретным судам, включая заранее введенные теоретические корпуса и отсеки, типовые сечения, характеристики прочности при постройке, типовые загрузки.

4. При выходе каждого судна в море судовладелец должен сообщать в ERS фактическую загрузку судна на отход, которая, в свою очередь, должна фиксироваться в базе данных.

5. Время передачи результатов расчета и рекомендаций ERS на аварийное судно не должно превышать двух часов с момента получения аварийного вызова.

6. ERS должен работать в круглосуточном режиме, без выходных.

7. Информация должна дублироваться.

8. Для работы ERS должен иметь специальные каналы связи, предназначенные только для поставленной задачи.

### *Список литературы*

1. Бондарь В.М., Третьяк А.Г., Элис. Я.М. Типовая оперативная информация о непотопляемости судна // Безопасность мореплавания / Экспресс-информация «Морской транспорт». – М.: В/О «Мортехинформреклама». – 1988. – Вып. 8 (204).

2. Власов В.Г. Таблицы для спрямления корабля // Собрание трудов. – Т. 4 – Л.: Судпромгиз, 1959. – С. 227 – 255.

3. Егоров Г.В. Автоматизированный расчет спрямления поврежденного судна на бортовой ПЭВМ // Современные проблемы судостроения и судоремонта / Сб. ОИИМФ. – М.: В/О «Мортехинформреклама», 1990. – С. 26 – 30.

4. Егоров Г.В. Автоматизированный расчет разгрузки крупнотоннажного судна, севшего на мель // Судостроение и судоремонт / Сб. ОИИМФ. – М.: В/О «Мортехинформреклама», 1992. – С. 15 – 20.

5. Егоров Г.В. Остаточная прочность корпуса в расчетах непотопляемости и обеспечении борьбы за живучесть. Определения и накопленный опыт // Вестник ОНМУ. – Одесса: Одесский национальный морской университет, – Вып. 18. – 2005. – С. 57 – 72.

6. Егоров Г.В. Остаточная прочность корпуса в расчетах непотопляемости и обеспечении борьбы за живучесть. Размеры повреждений и условия аварий // Проблемы техники. – № 1. – 2006. – С. 3 – 23.

7. Егоров Г.В. Остаточная прочность корпуса в расчетах непотопляемости и обеспечении борьбы за живучесть. Критерии и примеры // Вестник ОНМУ. – Одесса: ОНМУ, – Вып. 19. – 2006. – С. 49 – 63.

8. Егоров Г.В. Остаточная прочность корпуса в расчетах непотопляемости и обеспечении борьбы за живучесть. Учет стесненного кручения и крена // Сб. науч. трудов НУК. – № 2. – Николаев: НУК, 2006. – С. 39 – 48.

9. Егоров Г.В., Козляков В.В. Определение предельной балльности волнения по критериям прочности для корпусов судов // Проблемы техники. – № 2. – 2004. – С. 10 – 27.

10. Козлов А.Н., Рыженко А.А. Основы борьбы за живучесть на кораблях ВМФ США. – Севастополь: СВМИ им. П.С. Нахимова, 2003. – 268 с.

11. Козляков В.В., Егоров Г.В. Об учете требований к общей прочности морских судов при обеспечении их живучести // Судостроение. – № 6. – 1991. – С. 7 – 10.

12. Крылов А.Н. Теория корабля // Избранные труды. – Том. IX. Часть первая. – Изд. АН СССР, 1958. – С. 260 – 312.

13. Макаров С.О. Разбор элементов, составляющих боевую силу корабля. – Морской сборник, 1890.

14. Муру Н.П. Основы непотопляемости корабля. – М.: Воениздат, 1990. – 223 с.

15. Павленко Г.Е., Чернышев В.К. Новый метод спрямления поврежденных кораблей // Судостроение и морские сооружения. – Харьков: Издательство ХГУ, 1971. – С. 77 – 83.

16. Damage stability information for oil tankers and offshore oil barge (33CFR 155.240). – Code of Federal Regulations. – Title 33, Part 155, Subpart D. – Response Plans. – 2001. – P. 374 – 375.

17. Interim Guidance for the development and review of Response Plans for Nontank vessels. – Navigation and Vessel Inspection Circular No. 01–05 (NVIC No. 01–05). – United States Coast Guard, 2006. – 32 p.

*А.С. Михайлов, А.Г. Овчинников*

## **РОЛЬ КЛАССИФИКАЦИОННЫХ ОБЩЕСТВ В РЕАЛИЗАЦИИ ТРЕБОВАНИЙ СВОДНОЙ КОНВЕНЦИИ О ТРУДЕ В МОРСКОМ СУДОХОДСТВЕ**

23 февраля 2006 года на конференции МОТ была принята Сводная конвенция о труде в морском судоходстве (Конвенция). Цель Конвенции – пересмотреть, дополнить и объединить в одном международном договоре ряд конвенций и рекомендаций Международной организации труда (МОТ), что будет способствовать дальнейшему улучшению условий труда моряков.

Согласно статье VIII, Конвенция вступает в силу через 12 месяцев после ратификации 30 государствами-членами МОТ, общая доля валовой вместимости торгового флота которых от мирового количества составляет 33 %. По мнению аналитиков, Конвенция может вступить в силу в течение ближайших 3 – 5 лет. По плану МОТ (ILO Action Plan) Конвенция будет ратифицирована 2010 году и вступит в силу в августе 2011 года. Однако на конференции была принята резолюция, предложенная правительствами Норвегии и Либерии, призывающая МОТ предоставить судам двухгодичный льготный период после ратификации Конвенции для подготовки Декларации о соблюдении трудовых норм в морском судоходстве и соответствия требованиям Конвенции, а также получения Международного свидетельства о соответствии трудовым нормам в морском судоходстве.

В соответствии с положениями разд. 5 Конвенции правительствам государств-членов МОТ необходимо провести комплекс научно-исследовательских работ по детальному анализу трудового законодательства, а также ряда нормативных документов, касающихся проектирования, постройки и эксплуатации судов под их флагом для оценки и определения конкретных мер по их дополнению, изменению; в случае отсутствия таких документов – разработки новых и гармонизации их требований с требованиями Кон-

венции. Необходимо дополнить нормативную базу по проведению и осуществлению портового контроля соответствия требованиям Конвенции судов как под своим флагом (flag state control), так и судов под иностранными флагами (port state control), а также разработать меры по реализации этой нормативной базы.

Согласно Правилу 5.1.2 Конвенции, проводить инспекции судов и выдавать Свидетельства о соответствии положениям Конвенции могут признанные организации. Стандарт А5.1.2 определяет требования к признанной организации, которая должна обладать необходимым техническим опытом в отношении соответствующих аспектов Конвенции, надлежащими знаниями судовых операций, включая минимальные требования к труду моряков на борту судна, вопросы, касающиеся условий найма моряков, жилых помещений для экипажа, условий для отдыха, питания и столового обслуживания, предупреждения несчастных случаев, охраны здоровья, медицинского и социально-бытового обслуживания и защиты в области социального обеспечения. Практически все эти вопросы рассматриваются при проведении освидетельствований по МКУБ судоходных компаний и судов, а также при проведении классификационных и конвенционных освидетельствований. Поэтому в Руководящем принципе Конвенции В5.1.3 приведена ссылка на Международный кодекс по управлению безопасностью и предотвращением загрязнения с судов (МКУБ), касающаяся использования документации, политики, процедур, а также отчетных документов Системы управления безопасностью. Признанная организация должна обладать возможностями для поддержания квалификации и совершенствования технических навыков своего персонала, обладать необходимыми знаниями в отношении требований настоящей Конвенции, национального законодательства, нормативных правовых актов и соответствующих международных актов. Признанная организация должна иметь надлежащие размеры, структуру, опыт и потенциал, сопоставимые с типом и уровнем предоставляемых полномочий в соответствии с требованиями Руководящего принципа В5.1.2 «Предоставление полномочий признанным организациям». Организация, стремящаяся к получению признания, должна продемонстрировать свою техническую, административную и управленческую компетентность и потенциал для обеспечения оказания своевременных услуг удовлетворительного качества.

При оценке потенциала организации, компетентный орган должен определить:

а) обладает ли организация надлежащим техническим, управленческим и вспомогательным персоналом;

б) обладает ли организация достаточным количеством квалифицированных специалистов для оказания требуемых услуг и обеспечения необходимого географического охвата;

в) доказала ли организация свою способность оказывать своевременные услуги удовлетворительного качества;

г) выполняет ли организация свои операции независимым и подотчетным образом.

Каждое государство-член МОТ должно установить систему, направленную на обеспечение надлежащей работы признанных организаций, процедур поддержания контактов с такими организациями, а также осуществления контроля их деятельности, т. е. периодических проверок признанных организаций на соответствие вышеуказанным требованиям. Кроме того, каждое государство-член МОТ должно требовать, чтобы признанные организации вели учет оказываемых ими услуг и чтобы они могли продемонстрировать достижение требуемых стандартов в областях, охватываемых их услугами, т. е. предполагается их соответствие международному стандарту по качеству предоставления услуг. Все это регламентируется резолюциями ИМО А.739(18) и А.789(19), поэтому в п. 6 Руководящего принципа В5.1.2 приведена ссылка на них.

В соответствии с Правилom 5.1.3 Конвенции, судно должно иметь и подтверждать Декларацию о соблюдении трудовых норм в морском судоходстве, которая должна состоять из двух частей. В первую часть Декларации включаются национальные требования государства-члена МОТ, касающиеся условий труда и жизни моряков. При этом в случае, если законодательство государства точно отражает требования Конвенции, в первой части Декларации допускается только ссылка на Конвенцию. Вторая часть Декларации разрабатывается судовладельцем (Компанией) и содержит следующие сведения:

каким образом выполняется законодательство, указанное в первой части Декларации;

процедуры судовладельца по проверке текущего соблюдения национальных требований;

лица, ответственные за осуществление таких проверок;  
способы оформления и хранения результатов проверок;  
процедуры, регламентирующие действия в случае вскрытия фактов нарушения. Во второй части Декларации могут быть приведены ссылки на процедуры Системы управления безопасностью, которые охватывают вопросы данной Конвенции.

При положительных результатах инспекции и после рассмотрения Декларации судну выдается Свидетельство о соответствии трудовым нормам в морском судоходстве сроком действия пять лет с условием проведения промежуточной инспекции между второй и третьей ежегодной датой выдачи Свидетельства, т. е. аналогично Свидетельству об управлении безопасностью или Свидетельству об охране судна. В настоящее время идет обсуждение гармонизации всех освидетельствований судна для сокращения нагрузки на экипаж. ИМО уже предусмотрела это в своей Резолюции А.948(23), содержащей Руководство по гармонизации освидетельствований и сертификации судов. По-видимому, гармонизация освидетельствований затронет в дальнейшем и инспекции на соответствие требованиям Сводной конвенции МОТ.

На конференции были приняты резолюции по созданию совместных рабочих групп ИМО\МОТ по пересмотру кодекса МКУБ и разработке соответствующих поправок к нему для эффективного и единообразного внедрения и применения положений Сводной конвенции и требований МКУБ, а также для решения вопросов относительно ответственности судовладельца и компенсаций морякам.

При проверках по МКУБ, проверяется компания (в тексте Сводной конвенции – судовладелец) которая является основным звеном в выполнении требований Сводной конвенции на борту судна.

Как известно, в настоящее время при конвенционных освидетельствованиях классификационные общества уже проверяют на соответствие требованиям таких конвенций МОТ, как Конвенция 147 (1976) «О минимальных нормах на торговых судах», Конвенции 92 (1949) и 133 (1970) «О помещениях для экипажа на борту судов».

В настоящее время МАКО создала экспертную группу по применению требований Сводной конвенции и активно разрабатывает унифицированные интерпретации и процедурные требования

по проведению инспекций судов и выдаче Свидетельств о соответствии требованиям Сводной конвенции по труду в морском судоходстве.

Экспертная группа МОТ приступила к разработке Руководства Администрациям флага по применению Сводной конвенции о труде в морском судоходстве.

### *Список литературы*

1. Labour Inspection, International Labour Office Geneva, 2006.

УДК 341.217:342.52:629.5.011:629.017:005

*В.И. Евенко, М.А. Гапноев, М.А. Кутейников*

### **АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩЕЙ МЕЖДУНАРОДНОЙ НОРМАТИВНОЙ БАЗЫ, ПРЕДНАЗНАЧЕННОЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ МОРЕХОДНОСТИ ПАССАЖИРСКИХ СУДОВ. ПЕРСПЕКТИВЫ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ И ДАЛЬНЕЙШЕГО РАЗВИТИЯ**

#### **Общие положения**

Мореходность является одной из важнейших характеристик безопасности и эффективной эксплуатации плавучего объекта (судна). Термин «мореходность» включает в себя следующие характеристики судна: плавучесть, статическую остойчивость, динамическую остойчивость, непотопляемость (плавучесть и остойчивость поврежденного судна), маневренность и т. п. Такие характеристики, как плавучесть, статическая остойчивость и статические аспекты непотопляемости, были прекрасно изучены и описаны в течение последних столетий. Требования к безопасности, определенные в соответствии с этими характеристиками, содержатся во всех основных международных конвенциях и кодексах, разработанных Международной морской организацией (ИМО), таких, как Международная конвенция СОЛАС-74 [1], Международная конвенция МАРПОЛ 73/78 [2], Международная конвенция о грузовой марке 1966 года [3], Кодекс по остойчивости в неповрежденном состоянии для судов всех типов, подпадающих под требования нормативных документов ИМО (Кодекс по остойчивости) [4] и кодексы по

безопасности для судов конкретных типов. Однако безопасность судна зависит не только от статических характеристик остойчивости. Очень важно учитывать и динамические аспекты остойчивости судна, такие, как волновая качка, ветровая качка, заливание на волнении и маневренность. Эти характеристики играют значительную роль в процессе эксплуатации судов, особенно пассажирских, рыболовных, контейнеровозов и других судов, перевозящих грузы на верхней палубе, накатных судов (ро-ро), плавучих буровых установок (ПБУ) и судов-снабженцев ПБУ.

ИМО, осознавая необходимость разработки единых международных требований к динамической остойчивости судна, уже начала работу по пересмотру Кодекса по остойчивости. Некоторые результаты этой работы представлены в настоящей статье.

Обобщая вышесказанное, мы можем заключить, что разработка новой методологии оценки безопасности судна с использованием положений динамической остойчивости является сегодня одной из наиболее важных задач для ученых, проектантов и судостроителей.

### **Требования к характеристикам мореходности морских судов и объектов, содержащиеся в основных международных конвенциях и кодексах.**

Требования к поддержанию минимального уровня безопасности процесса эксплуатации судов и добычи морских ресурсов, обеспечивающего в тоже время экономическую эффективность данного процесса, содержатся в международных нормативных документах, разрабатываемых ИМО, объединяющей в своем составе Морские Администрации стран, принимающих участие в освоении Мирового Океана на международном уровне. Эти требования постоянно совершенствуются с учетом опыта эксплуатации судов и других морских инженерных сооружений и достижений судостроительной науки и промышленности. Основными нормативными документами ИМО, регламентирующими, в том числе, и мореходные качества судов, являются международные конвенции и кодексы, выполнение требований которых обязательно для всех судов, занимающихся международными перевозками, и всех объектов, использующихся для добычи морских ресурсов в международном районе Мирового Океана.

Международная конвенция СОЛАС-74 (SOLAS – Safety of Life at Sea) в части нормирования мореходности содержит требования к элементам статической остойчивости судна, как в неповрежденном, так и в поврежденном состояниях [1].

Международная конвенция МАРПОЛ-73/78 (MARPOL – International Convention for prevention of pollution from ships) включает в себя правила, нормирующие параметры статической остойчивости в неповрежденном и поврежденном состояниях для нефтеналивных судов [2].

Международная конвенция о грузовой марке 1966 года, в части мореходности, содержит требования к статической остойчивости неповрежденного и поврежденного судна, а также конструктивные требования к обеспечению безопасного уровня заливаемости судна [3].

Однако, единственным на сегодняшний день документом, целиком посвященным вопросам остойчивости морских судов и объектов, является Кодекс по остойчивости [4].

#### **Кодекс ИМО по остойчивости [4]**

Этот документ был принят ИМО 4 ноября 1993 года в ходе 18 Ассамблеи как Резолюция А.749(18). Настоящий Кодекс состоит из введения, семи глав и трех приложений.

Первая глава «Общие положения» дает представление о целях применения Кодекса, области его распространения и содержит пояснения основных понятий и терминов, использованных в документе.

Вторая глава «Общие положения по предотвращению опрокидывания и Информация для капитана» содержит общие требования к оформлению основного судового документа по остойчивости – Информации об остойчивости для капитана, указания на специальные требования к информации об остойчивости для конкретных типов судов, общие положения по предотвращению опрокидывания, указания по укладке постоянного твердого балласта и описание эксплуатационных мероприятий, связанных с погодными условиями.

Третья глава «Критерии проектирования, применимые ко всем судам» устанавливает общие требования к остойчивости в непов-

режденном состоянии для всех судов, определяет способ учета качки от порывистого ветра при нормировании остойчивости (критерий погоды), содержит указания по учету влияния свободной поверхности жидких грузов в цистернах, по оценке соответствия судна критериям остойчивости, описывает типовые случаи нагрузки судна, которые необходимо проверить при разработке Информации об остойчивости и описывает методологию построения диаграмм статической остойчивости.

Четвертая глава «Специальные требования для конкретных типов судов» содержит описание требований к остойчивости следующих типов судов: грузовых, перевозящих лесной палубный груз; рыболовных; специального назначения; перевозящих зерно насыпью; судов-снабженцев буровых установок; ПБУ; понтонов; судов с динамическими принципами поддержания и контейнеровозов длиной более 100 м.

Пятая глава «Учет обледенения» содержит общие положения по учету обледенения судов и специальные требования к судам, перевозящим лесные палубные грузы, рыболовным судам и судам с динамическими принципами поддержания в условиях обледенения.

Шестая глава «Положения по учету общей водонепроницаемости корпуса» содержит требования к люкам, отверстиям машинного отделения, дверям, погрузочным и подобным им отверстиям, бортовым иллюминаторам, шпигатам, входным отверстиям, стокам, палубным отверстиям, вентиляторам, воздушным трубам и измерительным приборам, штормовым портикам и т. п., выполнение которых позволит учитывать объемы корпуса в расчетах остойчивости как водонепроницаемые.

Седьмая глава «Определение водоизмещения судна порожнем и координат его центра тяжести» описывает область распространения данного требования, поясняет определения и термины, использованные в настоящей главе, содержит требования по подготовке судна к опыту кренования, список требуемых чертежей и документов, необходимых при креновании, описание процедуры проведения опыта кренования, описание опыта кренования ПБУ, описание опыта по определению остойчивости понтонов.

В приложении 1 приводится подробное руководство по проведению опыта кренования.

В приложении 2 даны указания капитанам рыболовных судов по обеспечению способности судна находиться в условиях обледенения.

В приложении 3 приведены указания по определению остойчивости судна посредством измерения периода бортовой качки собственных колебаний судна (для судов длиной до 70 м).

Представляется необходимым более подробно остановиться на разделах Кодекса, связанных с учетом динамических характеристик остойчивости. Рассмотрим раздел 2.5 «Эксплуатационные мероприятия, связанные с погодными условиями» и раздел 3.2 «Требования к качке при порывистом ветре (критерий погоды)».

### **Эксплуатационные мероприятия, связанные с погодными условиями**

Данный раздел Кодекса содержит лишь самые общие указания на необходимость предотвращения заливания судна через открытые отверстия (см. пп. 2.5.1, 2.5.2, 2.5.3), образования значительной площади свободной поверхности в трюмах рыболовных и рыботранспортных судов (см. п. 2.5.4) и на верхней палубе (см. п. 2.5.9), заливания из-за недостаточного значения надводного борта (см. п. 2.5.6), поддержания безопасного с точки зрения погодных условий курса судна (см. п. 2.5.5), указания на опасность стоячих или коротких волн (см. п. 2.5.10), указания на необходимость уменьшения скорости хода при возникновении слеминга и оголении винта (см. п. 2.5.7) и указания на возможность возникновения параметрического резонанса, брочинга, ухудшения остойчивости на попутном волнении, которые могут привести к опрокидыванию судна (см. п. 2.5.8).

Таким образом, данный раздел не содержит требований, позволяющих избежать опасных воздействий внешней среды на динамические характеристики мореходности судна. А лишь рекомендует ряд мер, которые необходимо принять, если судно уже находится под действием опасных погодных условий.

### **Критерий погоды**

Раздел 3.2 Кодекса содержит методику оценки способности судна противостоять воздействию бокового ветра в условиях бор-

товой качки. Однако, изучив методологию представленной оценки, можно заметить, что она базируется на использовании диаграммы статической остойчивости судна, т. е. считать ее достаточно корректной с точки зрения динамической природы колебаний судна относительно поверхности воды не представляется возможным.

Оценка критерия погоды для конкретных типов судов, например для ПБУ и судов с динамическими принципами поддержания, выполнена по аналогичной методике.

Из вышеизложенного очевидно следует, что Кодекс по остойчивости нуждается в корректировке в части нормирования динамических характеристик мореходности с целью обеспечения безопасности мореплавания.

### **Требования к остойчивости пассажирских судов, содержащиеся в нормативных документах Международной ассоциации классификационных обществ (МАКО) и Европейского Сообщества (ЕС)**

В качестве основных документов, определяющих приемлемый уровень безопасности морских судов, в настоящей работе также были рассмотрены правила ведущих классификационных обществ-членов МАКО и директивы Совета ЕС.

В ходе анализа требований к остойчивости пассажирских судов, предъявляемых Правилами классификации и постройки морских судов ведущих классификационных обществ-членов МАКО, в частности, Американского бюро судоходства, Английского Регистра Ллойда, Французского Бюро Веритас, Германского Ллойда, Норвежского Веритас и Российского морского регистра судоходства, а также Директивой Совета ЕС «Правила и стандарты безопасности пассажирских судов» № 98/18/ЕС от 18 марта 1998 года было установлено, что в основе их заложен Кодекс ИМО по остойчивости, т. е. никаких дополнительных требований по учету динамической остойчивости ни МАКО, ни ЕС не предъявляет. Только одно из рассмотренных обществ, а именно Американское бюро судоходства, использует при классификации пассажирских судов два дополнительных руководства: Руководство по постройке и классификации пассажирских судов, 2001 г. [6] и Руководство по комфорту пас-

сажиров судов, 2001 г. [7]. Данные Руководства в дополнение к требованиям Кодекса ИМО по остойчивости содержат критерии, определяющие уровень комфорта, как пассажиров, так и экипажа. В Руководствах определены пять критериев: дизайн жилых помещений, общесудовая вибрация, уровень шума, внутренний климат и освещение.

По уровню комфорта для пассажиров суда делятся на две категории: **COMF** и **COMF+**. Более высокая категория **COMF+** отличается от категории **COMF** наличием дополнительного критерия оценки общесудовой вибрации и потенциального укачивания пассажиров (potential passenger motion sickness).

По уровню комфорта экипажа пассажирские суда аналогичным образом делятся на две категории: **НАВ** и **НАВ+**.

Очевидно, что из пяти указанных критериев с мореходными качествами судна, а именно с судовыми ускорениями, напрямую связан только один критерий – критерий общесудовой вибрации.

### Оценка уровня комфорта по критерию общесудовой вибрации

Уровень комфорта по критерию общесудовой вибрации определяется двумя показателями, зависящими от судовых ускорений: максимальным уровнем среднеквадратичных ускорений ( $a_w$ ) и уровнем укачивания ( $MSDV_z$ ). В качестве предельных значений для этих показателей Американское бюро судоходства рекомендует использовать следующие величины:

Таблица 1

Уровни общесудовой вибрации

Уровень комфорта	Допускаемый диапазон частоты общесудовой вибрации	Ускорения	Максимально допускаемые значения
<b>COMF</b>	0,5 – 80 Hz	$a_w$	0,315 м/см <sup>2</sup>
<b>COMF+</b>	0,1 – 0,5 Hz	$MSDV_z$	30 м/см <sup>1.5</sup>
	0,5 – 80 Hz	$a_w$	0,20 м/см <sup>2</sup>

Вибрация определяется на уровне пассажирской палубы/палуб и нормируется в трехмерной системе координат (x, y, z). Уровень вибрации по максимальным среднеквадратичным ускорениям ( $a_w$ ) проверяется, как для каждой оси отдельно, так и для суммарного ускорения по всем осям. Уровень вибрации по укачиванию проверяется только в вертикальном направлении (ось z).

### **Международная работа по корректировке требований Кодекса по остойчивости в части нормирования динамических характеристик мореходности**

Работа по корректировке Кодекса по остойчивости уже начата в ИМО, в рамках Подкомитета по остойчивости, грузовым маркам и по безопасности рыболовных судов (SLF –Sub-Committee on Stability, Load Lines and on Fishing Vessels Safety). В ходе 45-го заседания Подкомитета, состоявшегося в сентябре 2002 г., были рассмотрены материалы по пересмотру Кодекса [5], представленные Китаем, Польшей, Германией, Италией, Австралией и США.

Особый интерес представляют материалы, подготовленные Германией, о необходимости разработки динамических критериев остойчивости и материалы, подготовленные Германией и Италией, о необходимости корректировки критерия погоды. Также представляют интерес материалы, подготовленные Германией, по увеличению уровня безопасности судов на волнении и материалы, подготовленные США, касающиеся параметрической качки на встречном волнении и ее влиянии на системы крепления контейнеров.

Особенно ярко необходимость корректировки Кодекса по остойчивости освещена в документе «Предложения относительно масштаба пересмотра Кодекса по остойчивости и относящегося к нему циркуляра Комитета ИМО по безопасности на море MSC Circ.707» (Предложения), подготовленном Германией.

Этот документ обобщает направления работ по корректировке Кодекса, уточняет масштаб пересмотра и вносит предложение по приданию обязательности требованиям к параметрам остойчивости.

Основным разделом указанных Предложений является «База современных критериев остойчивости судна в неповрежденном состоянии».

В нем указывается, что требования к остойчивости, содержащиеся в Кодексе, разработаны на основе устаревшего опыта проектирования и постройки судов, более того, наблюдение за проектированием судов показало, что меры по улучшению динамических характеристик остойчивости для специализированных проектов не описаны, а в некоторых случаях запрещаются существующими правилами, несмотря на то, что модельные эксперименты или прямая динамическая симуляция демонстрирует их улучшение. Это позволяет сделать вывод о том, что существующие правила не связаны достаточно хорошо с характеристиками остойчивости современных судов. Было установлено, что для некоторых типов судов проблемы с остойчивостью могут возникать вопреки соответствию их всем существующим требованиям, это связано с разработкой абсолютно новых судовых обводов для таких судов как контейнеровозы, накатные суда (ро-ро), грузопассажирские накатные суда, паромы и круизные суда. Кроме того, выяснилось, что старые эмпирические критерии не представляют и не могут представлять физические свойства современных судов. Также в этом разделе сравниваются некоторые характеристики современных судов с традиционными проектами.

В ходе исследований было установлено, что соответствия требованиям Кодекса по остойчивости не обеспечивает безопасности судна от опрокидывания на нерегулярном волнении при длине волн, соизмеримой с длиной судна, при высоте значительных волн от порядка 6 м, при низких скоростях хода и при совпадении частот волновых колебаний с удвоенной частотой собственных колебаний судна на больших углах качки.

Многие операторы накатных судов, паромов, круизных судов и контейнеровозов выражают недовольство другими неблагоприятными мореходными характеристиками, такими, как очень короткий период качки, ведущий к большим ускорениям, особенно, если это сочетается с недостаточной способностью судна к компенсированию качки или/и недостаточной способностью поддерживать курс в неблагоприятных погодных условиях.

Обе эти проблемы необходимо серьезно рассматривать, так как они могут привести к серьезной опасности. Тем не менее, эти эффекты не учитываются в существующих требованиях к остойчивости.

Кроме того, Предложения содержат такие интересные для исследователей разделы как:

«Предложение о введении критериев остойчивости, основанных на эксплуатационных технических характеристиках»;

«Необходимость гармонизации методов расчета»;

«Разработка динамических критериев остойчивости» – по крайней мере, для конкретных типов судов. Здесь указывается, что динамическая остойчивость не должна ограничиваться рассмотрением явлений, напрямую связанных только с остойчивостью. Маневренность, ходкость и управляемость также должны быть учтены при разработке многозначных критериев динамической остойчивости;

«Разработка критерия погоды, основанного на физически изученных принципах».

Деятельность Подкомитета ИМО SLF по корректировке Кодекса по остойчивости в настоящий момент не закончена, в частности, на 49-ой сессии, состоявшейся в июле 2006 года, вниманию Подкомитета были предложены следующие документы [5].

1. Пересмотренный Кодекс ИМО по остойчивости, подготовленный корреспондентской группой в межсессионный период. Документ содержит законченный текст пересмотренного Кодекса с редакционными поправками, подготовленными корреспондентской группой.

2. Предложение вероятностного критерия остойчивости в неповрежденном состоянии.

В документе, подготовленном Германией, предложен вероятностный критерий оценки остойчивости для параметрической качки и явления чистой потери остойчивости. Германия предлагает обсудить этот критерий как первый шаг для разработки критериев динамической остойчивости.

3. Вторая часть отчета корреспондентской группы.

Документ содержит вторую часть отчета межсессионной корреспондентской группы по пересмотру Кодекса ИМО по остойчивости, связанную с рассмотрением следующих вопросов: пересмотр документа MSC/Circ. 707 «Руководство для капитана по предотвращению опасных ситуаций на попутном волнении», изучение явлений динамической остойчивости, временная пояснительная записка по альтернативной оценке остойчивости по критерию по-

годы, обсуждение части С Кодекса, разработка руководства по одобрению прибора контроля остойчивости, критерии остойчивости для дополнительных типов судов, а также большие ускорения и нагрузки на перевозимый груз.

4. Предложения по методологии прямой оценки остойчивости судна в состоянии «мертвое судно», т. е. судно в условиях отсутствия энергии.

В документе, подготовленном Японией, предлагается методология прямой оценки остойчивости для состояния «мертвое судно». Япония предлагает рассмотреть методологию как первый шаг к созданию эксплуатационных критериев остойчивости для последующего включения в Кодекс.

5. Методология прямой оценки опрокидывания в результате бросинга.

Документ подготовлен Японией и описывает состояние научной методологии прямой оценки опрокидывания в результате бросинга. Япония предлагает, чтобы модельные испытания для проведения прямой оценки опрокидывания рассматриваемых судов были согласованы в качестве альтернативы обязательным критериям Кодекса.

6. Пояснения к численному моделированию параметрической качки.

Документ подготовлен Японией и содержит описание попытки подтверждения численного моделирования параметрической качки. Япония предлагает продолжать дальнейшие исследования для подтверждения правильности численного моделирования и реализации прямой оценки в качестве альтернативы обязательным критериям Кодекса.

7. Безопасность контейнеровозов.

Документ подготовлен Нидерландами и содержит информацию об изучении краткосрочной и долговременной вероятностей опрокидывания малых контейнеровозов на волнении. Нидерланды предлагают рассмотреть документ на рабочей группе по пересмотру Кодекса ИМО по остойчивости.

8. Долгосрочный подход к разработке критериев остойчивости.

Документ содержит комментарии Польши по долгосрочному проекту разработки эксплуатационных критериев остойчивости. Польша считает возможным разработать альтернативный под-

ход в форме рекомендаций, использующих анализ риска, взамен предписывающих критериев, однако, такой подход может быть использован только в случае, когда Морская Администрация флага судна считает, что обязательные критерии недостаточно учитывают существующие опасности.

9. Пересмотр документа MSC/Circ.707 – Параметрическая качка на встречном волнении. Комментарии к отчету корреспондентской группы.

В документе, совместно подготовленном Австралией и Испанией, указаны фрагменты, которые необходимо улучшить по результатам работы корреспондентской группы и приводится информация о результатах австралийских исследований параметрической качки на встречном волнении.

10. Комментарии к отчету корреспондентской группы.

Документ подготовлен Китаем и содержит комментарии и предложения к отчету межсессионной корреспондентской группы в отношении критериев остойчивости для дополнительных типов судов.

11. Комментарии, связанные с возможным обязательным применением Кодекса ИМО по остойчивости.

Документы указывают на то, что проект текста Кодекса не содержит раздела «Эквивалентные замены» и до сих пор не включает в себя предложений или указаний по применению обязательной части А Кодекса.

12. Тестирование в целях подготовки предложения вероятностного критерия остойчивости неповрежденного судна.

Документ подготовлен Германией и содержит результаты тестирования вероятностного критерия остойчивости для параметрической качки и явления чистой потери остойчивости.

13. Сильная параметрическая качка больших пассажирских судов в состоянии «мертвое судно».

Документ подготовлен Японией и представляет результаты экспериментов для сильной параметрической качки судна в состоянии «мертвое судно», в штормовых условиях, в положении лагом к волне, которые показывают однозначное влияние существующего критерия погоды. Исследования также показывают, что это опасное явление может быть устранено путем применения соответствующих успокоителей качки.

## Заключение

Проанализировав существующую международную нормативную базу по вопросам обеспечения мореходных качеств морских судов и объектов и результаты работы ИМО в этом направлении можно сделать следующие выводы.

1. Основным международным документом, нормирующим остойчивость морских судов всех типов, является Кодекс ИМО по остойчивости неповрежденного судна (Резолюция ИМО А.749(18)). Настоящий документ содержит общие требования к остойчивости, обязательные для всех судов независимо от типа, и специальные требования к остойчивости в зависимости от типа и назначения судна. В качестве общих критериев остойчивости Кодекс предписывает использовать такие характеристики статической остойчивости как: протяженность, максимальное плечо и площадь диаграммы статической остойчивости; значение начальной метацентрической высоты и критерий погоды. В качестве дополнительного критерия для пассажирского судна предлагается использовать угол крена от скопления пассажиров на одном борту. Для судов с динамическими принципами поддержания в качестве дополнительных критериев предложены: минимальный запас плавучести, величина угла крена на циркуляции, величина угла крена от воздействия ветра и величина опрокидывающего момента, кроме того, перед вводом судна в эксплуатацию рекомендуется определять экспериментальным путем возможные величины бортовой, килевой и вертикальной качки для судна в основном (не водоизмещающем) режиме движения.

2. Только один критерий Кодекса по остойчивости связан с динамической остойчивостью. Это критерий погоды. Но и этот критерий базируется на анализе диаграммы статической остойчивости, что не позволяет нам считать его в полном смысле динамическим критерием остойчивости. Следовательно, представляется возможным заключить, что требования Кодекса на сегодняшний момент не гарантируют безопасность судна с точки зрения динамической остойчивости.

3. Проведение исследований и накопление научных данных о динамических характеристиках мореходности судов является на сегодняшний день весьма актуальной задачей.

## *Список литературы*

1. Международная конвенция по охране человеческой жизни на море 1974 г. – СПб.: ЗАО ЦНИИМФ, 2002. – 926.
2. Международная конвенция по предотвращению загрязнения с судов 73/78. – СПб.: ЗАО ЦНИИМФ, 1995.
3. Международная конвенция о грузовой марке 1966 года. – М., 1968.
4. Code on Intact Stability for All Types of Ships Covered by IMO Instruments, Resolution. A.749(18), International Maritime Organization, London, 1995.
5. Материалы отчета Подкомитета SLF о ходе работ на 45 и 49 сессиях.
6. Passenger Vessels. Guide for Building and Classing, American Bureau of Shipping, 2001.
7. Guide for Passenger Comfort on Ships, American Bureau of Shipping, 2001.

*Р.В. Борисов, М.А. Ганноев, М.А. Кутейников*

## **АНАЛИЗ АВАРИЙНЫХ СЛУЧАЕВ НА ПАССАЖИРСКИХ СУДАХ, СВЯЗАННЫХ С ПОТЕРЕЙ МОРЕХОДНЫХ КАЧЕСТВ**

Очевидно, что для назначения судну каких-либо эксплуатационных ограничений, направленных на обеспечение безопасной и комфортной эксплуатации, необходимо выполнить анализ известных аварийных случаев с учетом их вида и причин возникновения.

В качестве аварийной статистики была использована база данных Российского морского регистра судоходства по учету аварийных случаев. Были рассмотрены аварийные случаи, произошедшие в период с 1 января 1993 года по 13 августа 2004 года. В качестве объекта исследования рассматривались два вида аварийных случаев: кораблекрушение и потеря мореходных качеств. К кораблекрушениям были отнесены все аварийные случаи, результатом которых явилась потеря (гибель) судна. К потере мореходных качеств были отнесены случаи, когда судно в результате аварии утратило хотя бы одно из своих мореходных качеств, но осталось на плаву и, в последующем, было возвращено в эксплуатацию. Кроме того, были отдельно рассмотрены аварийные случаи, вызванные потерей остойчивости (например, из-за смещения или неверного размещения груза).

В результате анализа аварийной статистики было установлено, что за рассматриваемый период произошло 101 кораблекрушение, из них 12 кораблекрушений были вызваны потерей остойчивости. Потеря мореходных качеств была зафиксирована у 38 судов, из них у 5 судов наблюдалась потеря остойчивости.

Было также установлено следующее: в 12 кораблекрушениях, вызванных потерей остойчивости, погибло одно пассажирское судно и один грузопассажирский паром (в обоих случаях наиболее вероятной причиной гибели признана неправильная загрузка судна);

ни один из 5 случаев потери остойчивости не имеет отношения к пассажирским судам, пассажирским паромам или круизным судам.

Основываясь на результатах проведенного анализа, представляется возможным сделать вывод о том, что существующий в Правилах классификации и постройки морских судов Регистра [1] уровень требований к остойчивости пассажирского и приравненного к нему судна обеспечивает надлежащий уровень безопасности при эксплуатации. Таким образом, становится очевидным, что повышение уровня безопасности и комфорта при эксплуатации пассажирского судна или парома может быть обеспечено благодаря нормированию других характеристик мореходности (таких, например, как качка судна на волнении).

Для более доказательного выбора характеристик мореходности пассажирского судна, оказывающих существенное влияние на безопасность плавания, были рассмотрены наиболее известные аварии и кораблекрушения пассажирских судов, произошедшие в прошлом столетии [2]:

**22 февраля 1901 г.** американский пассажирский пароход «Риоде-Жанейро» погиб на подводных камнях при входе в пролив Золотые Ворота;

**1 апреля 1901 г.** турецкий транспорт «Аслана» разбился на подводных камнях в Красном море;

**7 июня 1903 г.** французский пароход «Либау» затонул у Марселя в результате столкновения с другим судном;

**28 июня 1904 г.** норвежский пассажирский пароход «Могде» затонул на рифах острова Рок-Олл;

**4 августа 1906 г.** итальянский парусный корабль «Зино» погиб на камнях у мыса Палас;

**23 марта 1908 г.** японский пассажирский пароход «Мацу Мару» затонул в результате столкновения с другим судном у Хакодате;

**28 июля 1908 г.** английский пароход «Уюд Кошид» затонул во время шторма;

**14 ноября 1909 г.** французский пароход «Скупе» затонул после столкновения с другим судном у Сингапура;

**29 мая 1914 г.** канадский лайнер «Empress of Ireland» затонул на реке Св. Лаврентия после столкновения с другим судном;

**24 июня 1915 г.** американский экскурсионный пароход «Eastland» опрокинулся при отходе от причала в Чикаго;

**29 августа 1916 г.** китайский пассажирский пароход «Hsin Yu» затонул у берегов Южного Китая;

**1917 г.** английский пароход «Mendi» затонул после столкновения в тумане с другим судном;

**25 апреля 1918 г.** китайский пассажирский пароход «Kang Kwan» затонул близ Ханькоу после столкновения с другим судном;

**6 октября 1918 г.** английский пароход «Otranto» затонул у берегов Шотландии в результате столкновения с другим судном;

**25 октября 1918 г.** канадский пассажирский пароход «Принцесса София» затонул в водах Аляски;

**17 января 1919 г.** французский пассажирский пароход «Chaouia» затонул в Мессинском проливе;

**17 января 1920 г.** французский пассажирский пароход «Африка» затонул в Бискайском заливе, после того, как получил пробоину, налетев на плавучий маяк;

**28 марта 1921 г.** китайский пассажирский пароход «Гонконг» затонул, ударившись о подводную скалу у Сватуо;

**март 1921 г.** китайский пароход «Hong Moh» во время шторма ударился о подводную скалу и переломился на две части;

**1921 г.** испанский пароход «Santa Isabel» разбился на скалах у Виллагарсии;

**23 апреля 1923 г.** португальский пароход «Massamedes» разбился на мысе Фрио;

**28 августа 1926 г.** российский пассажирский пароход «Буревестник» ударился о пирс в Кронштадте и затонул;

**21 декабря 1929 г.** китайский пароход «Lee Cheong» затонул во время шторма около Гонконга;

**10 июля 1933 г.** китайский пароход «Тунан» столкнулся в тумане близ Шантунга с другим судном и затонул;

**8 апреля 1942 г.** греческий пароход «Enderania» разбился на камнях у берегов Турции;

**29 октября 1946 г.** японский теплоход «Ebisu Maru» ударился у берегов Кореи о затонувшее судно и разломился на три части;

**1948 г.** американский бриг «Charles Bartlett» затонул в результате столкновения с другим судном;

**27 января 1949 г.** китайский пассажирский пароход «Taiping» погиб в результате столкновения с другим судном;

**декабрь 1952 г.** французский лайнер «Champollion» выскочил на подводные камни и переломился пополам;

**26 июля 1956 г.** итальянский лайнер «Andrea Doria» затонул в результате столкновения с другим судном;

**8 сентября 1966 г.** норвежский автопаром «Skagerrak» затонул в проливе Скагеррак;

**11 октября 1968 г.** филиппинский паром «Damedent» затонул близ острова Минданао;

**1980 г.** филиппинский морской паром «Don Yuan» погиб в проливе Таблас;

**16 февраля 1986 г.** советский теплоход «Михаил Лермонтов» ударился о подводные камни и затонул;

**24 апреля 1986 г.** филиппинский морской паром «Dona Jozephine», выйдя из порта Изабел, получил внезапный крен и затонул в течении нескольких минут;

**31 августа 1986 г.** советский лайнер «Адмирал Нахимов» затонул в результате столкновения с другим судном;

**6 марта 1987 г.** английский пассажирский паром «Геральд оф фри Энтерпрайз», при выходе из порта Зеебрюгге, опрокинулся из-за попадания забортной воды в корпус через открытые ворота аппарели;

**20 декабря 1987 г.** филиппинский паром «Dona Paz» во время тайфуна столкнулся с другим судном и затонул;

**1988 г.** филиппинский морской паром «Dona Mariiun» погиб в Висаянском море;

**1988 г.** филиппинский морской паром «Rosalia» погиб в проливе Сан-Бернардино;

**20 июня 1989 г.** советский теплоход «Максим Горький» получил тяжелые повреждения корпуса в результате столкновения с ледяным полем;

**1990 г.** морской паром «Scandinavian Star» затонул в проливе Скагеррак;

**28 сентября 1994 г.** эстонский пассажирский паром «Эстония» затонул вблизи острова Утре во время шторма из-за нарушения герметичности закрытия носовых ворот.

В результате рассмотрения причин выше упомянутых аварий было установлено, что из 43 пассажирских судов в результате столкновения с другим судном погибли 14 судов, 14 судов погиб-

ли/получили тяжелые повреждения в результате удара о подводные камни, лед, затопленные объекты и т. п., 2 судна затонули во время шторма, 2 судна погибли вследствие потери остойчивости, 2 судна погибли вследствие нарушения экипажем эксплуатационных судовых процедур и для 9 судов причину гибели установить не удалось.

Учитывая изложенное, можно сделать вывод о том, что только два судна могли погибнуть в результате воздействия, главным образом, внешних факторов (шторм), в то время, как причиной гибели 32 судов, с большой долей вероятности, можно считать ошибку экипажа (навигационная пробоина, нарушение судовых процедур, неправильная загрузка и т. п.).

Таким образом, наиболее частой причиной возникновения аварийных ситуаций (причин, носящих первичный характер) для пассажирских судов являются ошибки экипажа, т. е. так называемый «человеческий фактор». Очевидно, что при нахождении судна в порту вероятность ошибки экипажа определяется, в основном, уровнем его подготовки. Для уменьшения вероятности ошибки экипажа в море, во время рейса, необходимо, помимо надлежащей подготовки, обеспечить приемлемый уровень воздействия окружающих факторов на состояние здоровья членов экипажа. К таким воздействиям, связанным с природой движения судна, можно отнести судовую качку и вибрацию корпусных конструкций, вызывающих укачивание и быструю утомляемость. Таким образом, введение требований к физиологическому комфорту экипажа представляется необходимым условием обеспечения безопасной эксплуатации судна и является одной из самых приоритетных задач при проектировании судна.

### *Список литературы*

1. Правила классификации и постройки морских судов. – СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2005.
2. Жук в А.А. Море и ... трагедии. – Одесса: КП ОГТ, 2003.

УДК 629.123

*В.И. Алферов, В.М. Шапошников*

## ПРИМЕНЕНИЕ РЕШЕНИЯ ТЕРМОПЛАСТИЧЕСКОЙ ЗАДАЧИ ДЛЯ РАСЧЕТОВ СВАРОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ СУДОВЫХ КОРПУСНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

### Введение

Сварочные деформации, как правило, приводят к большим объемам пригоночных, правочных и монтажных работ [2, 3]. Вместе с тем остаточные сварочные деформации оказывают существенное влияние на напряженное состояние пластин и продольных связей корпуса [4–6], негативно влияют на мореходные качества судов, на работу валопровода, усложняют докование [9] и пр. Поэтому дальнейшее развитие и совершенствование методов расчетов сварочных напряжений и деформаций является весьма актуальным.

Существующие методы расчетов остаточных сварочных деформаций, регламентируемые РД 5.9807-93 [1], имеют следующие недостатки.

1. Указанные методы применимы для расчетов сварочных деформаций сравнительно простых типовых узлов и плоских секций. Главный недостаток методики [1] заключается в том, что упрощенные теоретические зависимости для температурных полей [7–9] вынуждено применялись при исследовании деформационных процессов, происходящих при сварке относительно простых элементов конструкций типа массивных стальных изделий или пластин и др. Однако необходимо иметь в виду, что реальные конструкции неизмеримо сложнее. Конструкции имеют конечные, а не бесконечные размеры.

Температурное поле зависит не только от режима сварки, теплофизических характеристик материала, но и от толщин конструктивных элементов сварного узла, от протяженности и геометрии сложной конструкции, от коэффициента теплоотдачи в окружающую среду.

2. Имеется множество геометрически сложных пространственных конструкций (секций оконечностей и др.), для которых упомянутые расчетные методы либо недостаточны точны, либо вообще неприменимы. Так, например, они неприменимы при расчетах сварочных деформаций корпуса в процессе его сборки и сварки на стапеле и в случаях модернизации корпусов судов с большим объемом замены секций и др.

3. В последние 20–25 лет разработаны новые конструктивные материалы и новые способы сварки, к которым не применимы рекомендации РД [1].

Для частичного исправления некоторых недостатков, а именно, для учета жесткостных характеристик сложных пространственных конструкций, были приняты другие подходы [10–12], основанные на использовании метода конечных элементов (МКЭ) в статической постановке. В методическом плане применение МКЭ открыло новые возможности для моделирования процесса сборки и сварки сложных пространственных конструкций. Так, расчеты сварочных деформаций, выполненные в процессе проектирования или модернизации кораблей и судов, позволили разработать практические рекомендации по уменьшению сварочных деформаций корпусных конструкций. Однако точность расчетных оценок внутренних усилий в сварных швах остается недостаточной, так как базируется по-прежнему на положениях действующего РД 5Р.9807-93 [1].

Дальнейшее усовершенствование расчетных методов оценки сварочных деформаций и напряжений предполагается с применением решений термопластической задачи, позволяющей осуществить более детальное моделирование очень сложного сварочного процесса.

## **1 Основные допущения алгоритма термопластической задачи и применение ее для расчетов напряжений и деформаций судовых корпусных конструкций**

Основное преимущество решения термопластической задачи с применением МКЭ заключается в максимальном приближе-

нии свойств модели к свойствам реальной конструкции.

1. Модель МКЭ воспроизводит реальную геометрию и жесткость конструкции (размеры балок, толщины листов, размеры и расположение сварных швов и пр.).

2. Теплофизические и механические свойства металла определяются зависящими от температуры во всем диапазоне  $T = -40^\circ \div T_{\text{пл}} + 100^\circ \text{C}$  [8]. Для сталей, применяемых в судостроении,  $T_{\text{пл}} = 1430 - 1570^\circ \text{C}$  [1].

3. Свойства материала задаются идеальной упругопластической диаграммой Прандтля; металлургические процессы при сварке, в том числе, изменения структуры и химического состава металла в зоне шва не моделируются с применением МКЭ и не рассматриваются, но их влияние на механические свойства оценивается с помощью зависимости  $\sigma_T = f(T)$ .

4. Учитывается теплообмен конструкции с окружающим пространством.

5. Процесс распространения тепла в конструкции определяется с уравнением нестационарной теплопроводности [13]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \ddot{q} = c \rho \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (1)$$

где  $\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$  – коэффициенты теплопроводности материала в направлении осей  $x, y, z$ , Дж/см  $^\circ\text{C}$ ;  
для стали  $\lambda_x = \lambda_y = \lambda_z$ .

6. Первые три члена в левой части уравнения выражают результирующую скорость переноса тепла вследствие теплопроводности (на единицу объема). Четвертый член в левой части уравнения – скорость внутреннего тепловыделения в единице объема. Правая часть уравнения (1) выражает скорость изменения внутренней энергии на единицу объема. Каждый из членов имеет размерность энергии, отнесенной к единице времени и единице объема, Вт/м<sup>3</sup>.

7. Моделирование теплового воздействия на конечные элементы (КЭ), входящие в состав сварных швов, осуществляется с применением специальных генераторов тепла. Поступление тепла в сварной шов соответствует режимам сварки. Правильность задания теплового режима оценивается по результатам расчетов

тепловых полей. Температура в зоне сварки регулируется на уровне  $T = T_n^+$  (75–100 °С) [8].

8. В расчетах тепловых полей тепловыделением при фазовых превращениях и теплоизлучением пренебрегается. Скрытая теплота фазовых превращений может быть учтена в кривой коэффициента теплоемкости материала [15].

Решение термопластической задачи, определяемое уравнением теплопроводности (1), не требует задания приближенных теоретических зависимостей для температурного поля (например, для быстродвижущегося точечного или линейного источника). На самом деле температурное поле определяется режимом сварки, теплофизическими характеристиками материала [14], геометрией сложной конструкции и коэффициентом теплоотдачи в окружающую среду.

9. Последовательность выполнения сварных швов осуществляется в соответствии с выбранной технологией сборки и сварки.

Расчет тепловых полей составляет первую часть решения термопластической задачи. При составлении баланса энергии возможно генерирование энергии внутри материала с применением источников тепла различной протяженности (точечных, линейных, объемных). Количество энергии, аккумулированное в твердом теле, может увеличиваться, если температура со временем повышается, и уменьшаться, если температура соответственно снижается. При наличии конвективного обмена на границе твердого тела внутренняя энергия уменьшается и снижается температура тела.

В общем случае дифференциальное уравнение (1) имеет множество решений. В то же время решение конкретной задачи должно быть единственным. Поэтому решение конкретной задачи должно удовлетворять не только дифференциальному уравнению теплопроводности, но и краевым условиям: начальному распределению температуры в теле и условиям теплообмена на его границах. Начальное распределение температуры задается во всем объеме тела в определенный момент процесса  $t = 0$ , принимаемый за начало отсчета времени:

$$T(x, y, z, t) = T_0(x, y, z). \quad (2)$$

От этого исходного состояния и рассматривается последующий процесс распределения тепла. Граничные условия выражают тепловое взаимодействие тела с окружающей средой. В общем случае задается теплообмен поверхности  $S$  с окружающей средой по закону Ньютона

$$\bar{q}|_s = \alpha_T(T_s - T_0) \quad (3)$$

или согласно закону Фурье

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_s = \alpha_T(T_s - T_0), \quad (4)$$

где  $\alpha_T$  – коэффициент поверхностной теплоотдачи, Дж/см<sup>2</sup>с·°С;  
 $T_s$  – температура поверхности;  
 $T_0$  – температура окружающей среды, °С.

Вторая часть решения термопластической задачи – определение напряжений в механической системе при воздействии на нее температурных полей. Переменное температурное поле создает в каждом КЭ тепловые деформации. Поскольку модель конструкции пространственная, температурные деформации также носят трехмерный характер.

Изложенных основ теории тепловых процессов, программы МКЭ и мощной ЭВМ, в принципе, вполне достаточно для решения термопластической задачи применительно к сложным корпусным конструкциям с целью определения остаточных сварочных напряжений и деформаций с учетом нелинейных физических и механических свойств материала, зависящих от температуры. При этом нет необходимости в упрощающих допущениях расчетной модели, которые применялись многие десятилетия в методиках расчета остаточных сварочных деформаций [1, 7]. Также нельзя искусственно отделять подробное моделирование конструкции по МКЭ от моделирования теплового процесса сварки и сводить его к расчету отдельного сварного шва. Ниже рассмотрены примеры таких решений для сварки балки и бортовой секции.

## 2 Примеры расчетов остаточных сварочных напряжений и деформаций с использованием решения термопластической задачи

### 2.1 Расчет НДС тавровой балки при автоматической сварке под слоем флюса

На рис. 1 приведена расчетная модель тавровой балки (1/4 часть) длиной  $L = 9,0$  м для расчета напряжений и деформаций при автоматической сварке под слоем флюса. Сварка производится с двух сторон. Параметры сварочного процесса:  $J_{cb} = 313A$ ;  $u_d = 33B$ ;  $V_{cb} = 20$  м/с;  $q_n = 8000$  кал/см.

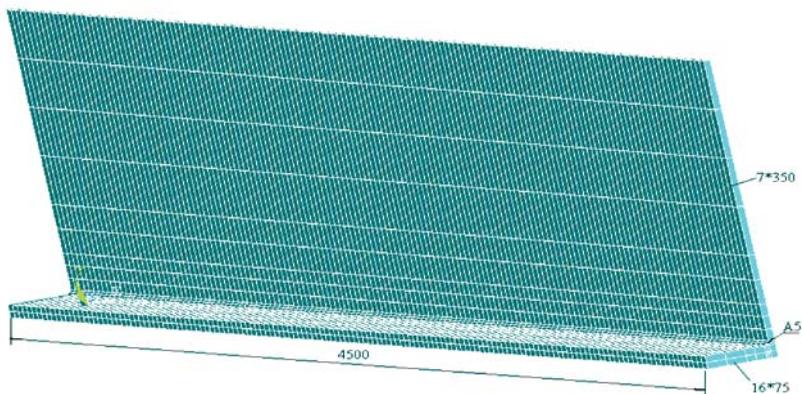


Рис. 1

Конечно-элементная модель тавровой балки (1/4 часть) длиной  $L = 9,0$  м для расчета остаточных напряжений и деформаций при автоматической сварке под слоем флюса.

Параметры сварочного процесса:

$J_{cb} = 313A$ ;  $U_d = 33B$ ;  $V_{cb} = 20$  м/с;  $q_n = 8000$  кал/см.

Сварка одновременно с двух сторон

Максимальная температура в зоне сварки согласно расчету при заданном режиме сварки составляла  $1550$  °С, а после завершения сварки и остывания балки ее температура понизилась до приемлемой величины ( $93$  °С). На рис. 2 показано распределение

остаточных вертикальных перемещений  $U_y$  после приварки пояса к стенке. Максимальное вертикальное перемещение  $U_y^{\max} \approx 1,47$  см. Следует отметить также угловые деформации пояса, что не позволяют учесть методы расчета, рекомендуемые РД [1].

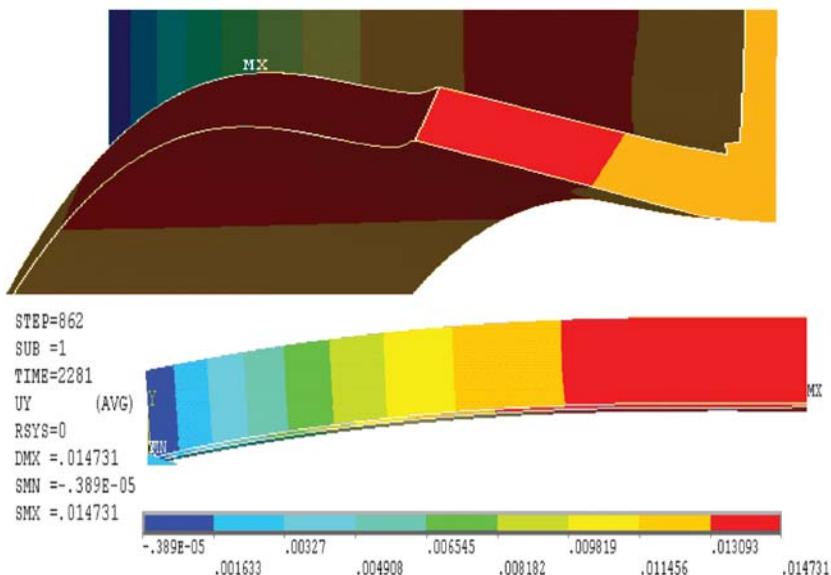


Рис. 2

Расчетные остаточные вертикальные перемещения  $U_y$  в тавровой балке (рис. 1) после приварки пояса к стенке под слоем флюса. Параметры сварочного процесса:  $J_{св} = 313A$ ;  $U_d = 33B$ ;  $V_{св} = 20$  м/ч;  $q_n = 8000$  кал/см. Сварка одновременно с двух сторон

На рис. 3 приведены эпюры напряжений  $\sigma_z$  и  $\sigma_{eqv}$  вдоль сварного шва. Их величины почти по всей длине балки равны примерно  $\sigma_z \approx \sigma_{eqv} \approx 300$  МПа, то есть соответствуют  $\sigma_T$  материала. На том же рисунке представлена эпюра напряжений  $\sigma_z$  в поперечном сечении балки, причем область максимальных растягивающих напряжений ( $\sigma_z \approx 300$  МПа) наблюдается на протяжении около 6 см, а в остальной части сечения эти напряжения являются сжимающими

за исключением верхней части стенки. В целом эпюра напряжений  $\sigma_z$  характерна для изогнутой балки. Интеграл напряжений  $\sigma_z$  по-

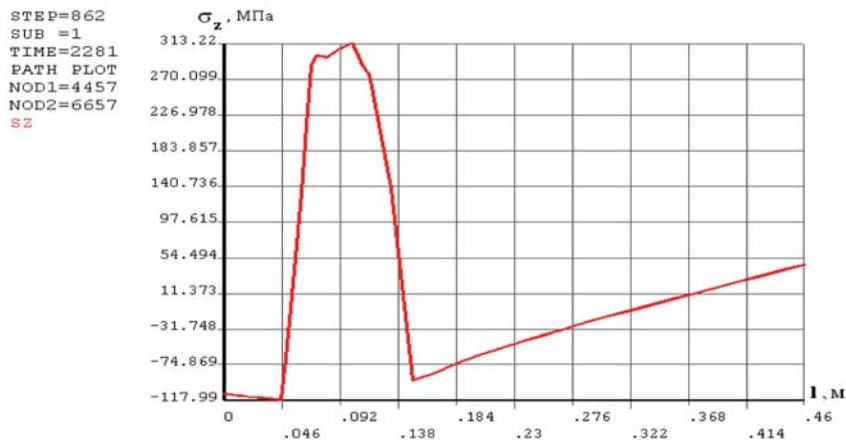
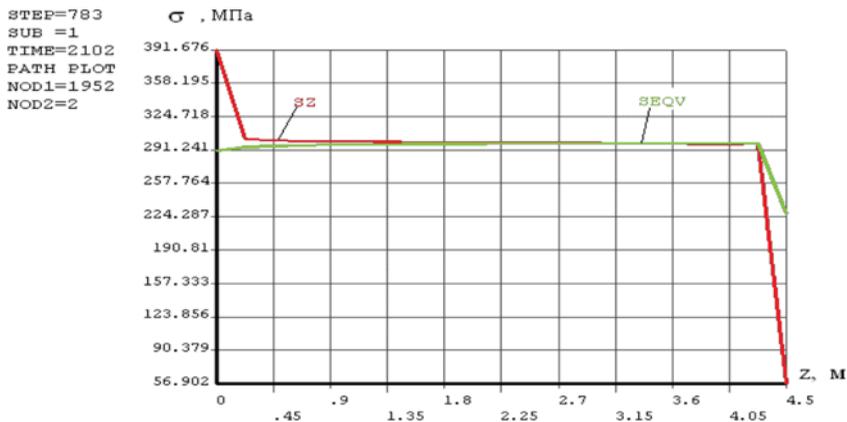


Рис. 3

Распределение расчетных остаточных напряжений  $\sigma_z$  и  $\sigma_{egv}$  в сварном шве тавровой балки (рис. 1), а также напряжений  $\sigma_z$  в поперечном сечении балки после приварки пояска к стенке.

Параметры сварочного процесса под слоем флюса:

$$J_{cb} = 313\text{А}; U_d = 33\text{В}; V_{cb} = 20 \text{ м/ч}; q_n = 8000 \text{ кал/см.}$$

Сварка одновременно с двух сторон

перечному сечению представляет силу  $F$ , которая приложена на некотором расстоянии от нейтральной оси балки, что и вызывает ее изгиб.

С целью оценки влияния некоторых технологических факторов на остаточные напряжения и деформации были выполнены три дополнительных расчета при следующих условиях:

а) при закреплении балки на стенде с помощью скользящих соединений (гребенок), исключая вертикальные перемещения (при этом осевые деформации и перемещения разрешены);

б) при закреплении балки от вертикальных перемещений и последующей механической обработке шва и ЗТВ (давлением до  $p = 350$  МПа);

в) при низкотемпературном отпуске ( $T \approx 650$  °С) или кратковременной тепловой нагрузке с заданной температурой.

### 2.1.1 Оценка влияния на НДС балки закреплений от вертикальных перемещений с помощью гребенок.

При условии закрепления балки от вертикальных перемещений максимальная величина остаточных напряжений  $\sigma_z$  в сварном шве практически не изменилась. Однако, закрепление от верти-

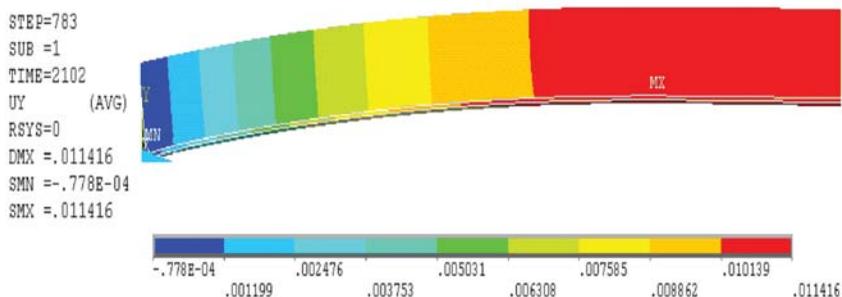


Рис. 4

Расчетные остаточные вертикальные перемещения  $U_y$  в тавровой балке (рис. 1) после приварки пояска к стенке под слоем флюса с учетом закрепления балки на стенде с применением гребенок и последующего освобождения от креплений.

Параметры сварочного процесса:

$$J_{св} = 313\text{А}; U_{д} = 33\text{В}; V_{св} = 20 \text{ м/ч}; q_n = 8000 \text{ кал/см.}$$

Сварка одновременно с двух сторон

кальных перемещений не дает возможности изгибаться балке, которая в результате находится в сжатом состоянии под действием внутренних усилий (относительные деформации  $\varepsilon_z$  являются отрицательными во всем поперечном сечении). После освобождения от гребенок, закрепляющих балку на стенде, происходит перераспределение внутренних усилий в поперечном сечении и балка получает изгиб (рис. 4), величина которого, однако, не превышает  $U_y = 1,14$  см, что на 22 % меньше, чем в 1-ом случае. Эпюра относительных деформаций  $\varepsilon_z$  в поперечном сечении становится снова характерной для изогнутой балки; также имеет место снижение на 5–7 % напряжений  $\sigma_z$  и  $\sigma_{eqv}$  по линии вдоль сварного шва.

Эти данные позволяют сделать вывод, что применение технологического приема закрепления балки на стенде от вертикальных перемещений с помощью гребенок дает незначительный эффект в части снижения остаточных деформаций и напряжений.

### 2.1.2 Оценка влияния на НДС балки механической обработки шва и ЗТВ.

В случае механической обработки шва (давлением до  $p = 350$  МПа) и ЗТВ и последующего освобождения балки от закреплений в вертикальном направлении максимальная величина перемещений  $U_y$  не превышает 0,49 см (рис. 5). При этом заметно

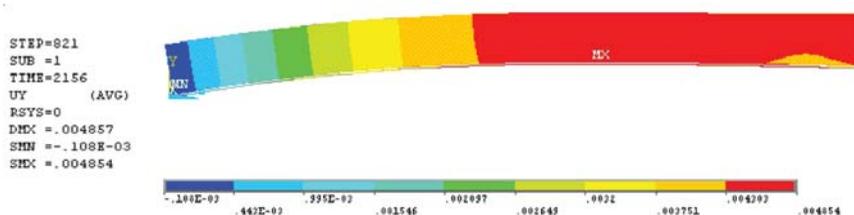


Рис. 5

Расчетные остаточные вертикальные перемещения  $U_y$  в тавровой балке (рис. 1) после приварки пояска к стенке с учетом закрепления балки на стенде с применением гребенок, механической обработки шва и ЗТВ и последующего освобождения от креплений.

Параметры сварочного процесса:

$$J_{cb} = 313A; U_d = 33B; V_{cb} = 20 \text{ м/ч}; q_n = 8000 \text{ кал/см.}$$

Сварка одновременно с двух сторон

уменьшаются (на 30–50 %) напряжения  $\sigma_z$  и  $\sigma_{eqv}$  как вдоль сварного шва, так и в поперечном сечении балки.

Таким образом, подтверждается полезность известного приема уменьшения остаточных деформаций и напряжений при механической обработке сварных швов и ЗТВ.

### 2.1.3 Оценка влияния на НДС балки низкотемпературного отпуска.

Согласно выполненному расчету балка была нагрета до 647 °С, выдержана при этой температуре около 30 с и затем охлаждена в течение 316 с до температуры 206 °С. Такое кратковременное воздействие нагрева балки, произведенное после ее сварки, привело к большому снижению остаточных деформаций  $U_y$  от 1,47 см до 0,15 см (рис. 6). Напряжения  $\sigma_z$  и  $\sigma_{eqv}$  вдоль шва уменьшились примерно на 20–30 %. Произошло также перераспределение напряжений  $\sigma_z$  в поперечных сечениях балки, что способствовало уменьшению остаточных деформаций.

В целом рассмотренные примеры не только показывают полезность технологических приема уменьшения остаточных напряже-

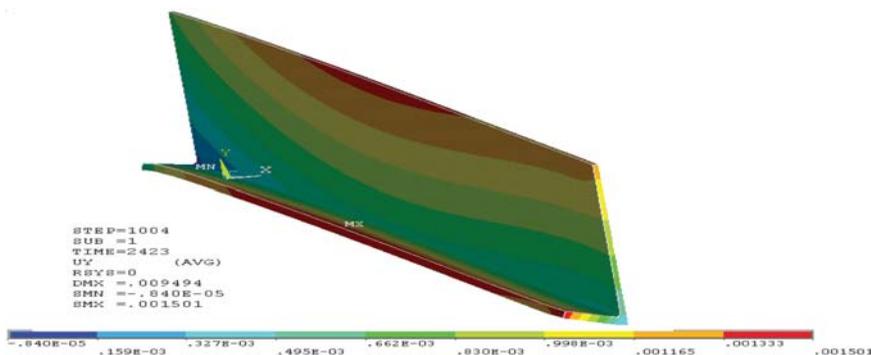


Рис. 6

Расчетные остаточные перемещения  $U_y$  в тавровой балке (рис. 1) после приварки пояска к стенке под слоем флюса и последующей операции низкотемпературного отпуска.

Параметры сварочного процесса:

$$J_{cb} = 313\text{А}; U_d = 33\text{В}; V_{cb} = 20 \text{ м/ч}; q_n = 8000 \text{ кал/см.}$$

Сварка одновременно с двух сторон

ний и деформаций с применением низкотемпературного отпуска, но и дают возможность оценить расчетным путем его эффективность.

## 2.2 Решение термопластической задачи для бортовой секции

На рис. 7 представлена расчетная модель МКЭ бортовой секции (1/4 часть) с размерами 5700×12000. Основные геометрические размеры конструкции и тепловые характеристики сварных швов взяты из работы [9]. Четвертая часть секции рассматривается в связи с симметрией конструкции относительно двух осей (оси Z в плоскости сечения Д-Д и оси X в плоскости сечения В-В).

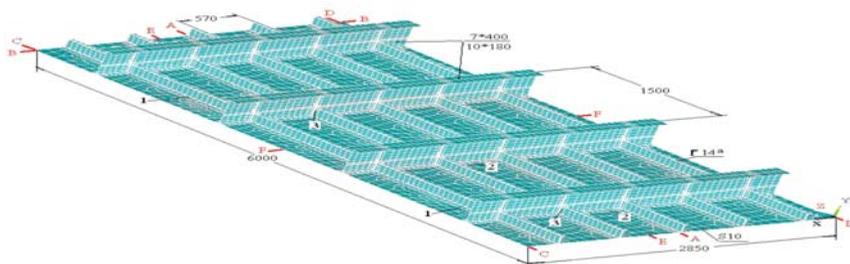


Рис. 7

Конечно-элементная модель бортовой секции (1/4 часть) длиной  $L = 12,0$  м для расчета напряжений и деформаций.

Секция свободно оперта вдоль поперечной кромки С-Д, не закреплена от вертикальных перемещений в сечениях С-С и D-D.

Условие симметрии задано в сечении В-В.

Обозначения: 1 – односторонние швы продольных связей;  
2 – двусторонние швы поперечных связей; 3 – вертикальные двусторонние швы, соединяющие набор двух направлений между собой.

Параметры процесса сварки под слоем флюса:  $q_n = 10$  КДж/см.

Параметры полуавтоматической сварки:  $q_n = 15$  КДж/см

Согласно известной технологии [9] сборка и сварка секции включает следующие основные технологические этапы:

1-й этап: установка и приварка к полотнищу балок главного направления (полособульбов Г14<sup>а</sup>);

2-й этап: установка поперечных рамных связей (шпангоутов) и сварка продольных и поперечных балок между собой;

3-й этап: приварка к полотнищу поперечных балок (шпангоутов).

В настоящей работе выполнен расчет сварочных деформаций бортовой секции в соответствии с тремя вышеперечисленными технологическими этапами.

Расчетная модель МКЭ на рис. 7 имеет геометрию достаточно близкую к реальной конструкции. Сварные швы (1–3) состоят из блоков объемных конечных элементов протяженностью, равной половине шпации поперечного набора или величине шпации продольного набора, или высоте продольного набора. В соответствии с последовательностью сварки в течение нескольких секунд подавалось тепло в первый блок КЭ. Затем подача тепла прекращалась и начиналась в очередном блоке КЭ. Таким образом, происходило нагревание и последующее остывание сварных швов. Информация о тепловом поле, включающая узловые температуры для всей конструкции, записывалась во внешнюю память ЭВМ. По результатам расчета тепловых полей можно было проконтролировать температуру в зоне сварки на всех этапах. Эта температура не должна была превышать величину  $T = 1600\text{--}1650\text{ }^{\circ}\text{C}$ . После завершения сварки секции ее остывание обеспечивалось до температуры  $T = 99\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

В результате расчета 1-го технологического этапа максимальные вертикальные перемещения  $U_y$  на оси симметрии В-В составили  $U_y = -3,65$  см. Укорочение полотнища секции были равны:  $\Delta L_z = -0,38$  см;  $\Delta B_x = -0,18$  см. Максимальные эквивалентные напряжения на кромке вдоль сварных швов достигли величины  $\sigma_{eqv} \approx 300$  МПа.

На рис. 8 представлены результаты расчетов перемещений и напряжений в секции после завершения ее сварки. Некоторая несимметрия величин перемещений  $U_y$  связана с разницей температур в различных частях конструкции после ее остывания. Максимальное значение вертикальных перемещений составило  $U_y = 0,58$  см. Укорочение полотнища с учетом основных габаритов секции в продольном направлении достигает  $\Delta L_z = -0,82$  см и в поперечном достигает  $\Delta B_x = -0,48$  см. В сечении В-В на оси симметрии секции наряду с прогибом продольных связей следует

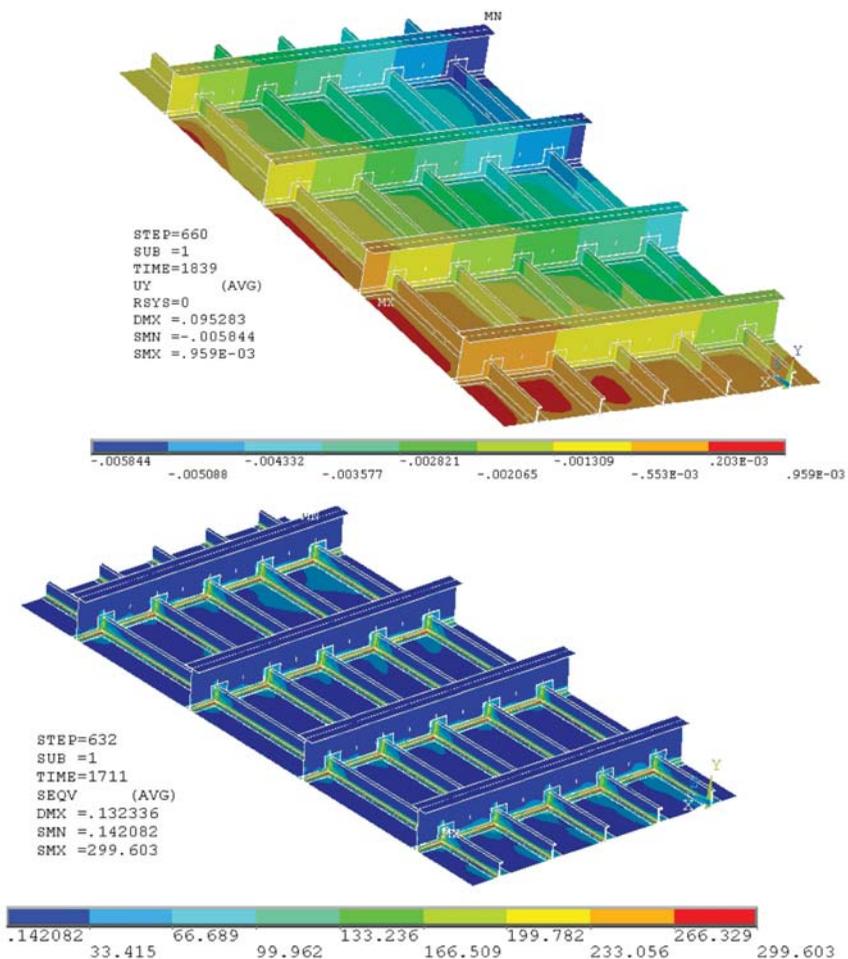


Рис. 8  
 Распределение расчетных величин остаточных перемещений  $U_y$  и напряжений  $\sigma_{eqv}$  после сварки бортовой секции.  
 Параметры процесса сварки под слоем флюса:  $q_n = 10$  КДж/см.  
 Параметры полуавтоматической сварки:  $q_n = 15$  КДж/см

также отметить местную бухтиноватость полотнища, хотя она и не превышает величины 0,3 мм.

Эквивалентные напряжения  $\sigma_{eqv}$  в сварных швах бортовой секции повсеместно близки к величине  $\sigma_T = 300$  МПа. Распределение напряжений  $\sigma_z$  вдоль сварного шва носит несколько неравномерный характер, их средние значения равны  $\sigma_T$ ; а в районах пересечений с поперечными связями наблюдается повышение величины  $\sigma_z$  примерно на 10 %.

### **3 Дальнейшее совершенствование методики расчета сварочных напряжений и деформаций с применением решения термопластической задачи и разработка рекомендаций по снижению остаточных деформаций при постройке кораблей и судов**

Полученные в настоящей работе результаты расчетов остаточных сварочных напряжений и деформаций с применением решения термопластической задачи позволяют предположить возможность дальнейшего расширения этого подхода и применения его в практике изготовления и модернизации корпусных конструкций с целью разработки рекомендаций по уменьшению сварочных деформаций. Применение предложенной методики целесообразно для решения нижеследующих задач:

- расчетов сварочных напряжений и деформаций пространственных секций оконечностей;

- расчетов сварочных деформаций при постройке корпуса судна на стапеле;

- оценки сварочных напряжений и деформаций цилиндрических и торосферических оболочек, включающих многопроходные швы;

- при модернизации или ремонте сильно изношенных судов, где предполагается замена большого числа секций;

- обоснования технологических мероприятий по правке конструкций, по снижению остаточных напряжений и деформаций с помощью механической обработки сварных швов и ЗТВ, а также с применением низкотемпературного отпуска;

- расчетов сварочных напряжений и деформаций конструкций из новых материалов и при применении новых методов резки и сварки.

Методика расчета сварочных напряжений и деформаций с применением термопластических решений, конечно, нуждается в дальнейшем развитии и совершенствовании. Она также необходима для исследования влияния остаточных напряжений на местную и общую прочность конструкций корпуса. В частности, остаточные напряжения, как и местные деформации, могут привести к редуцированию пластин и к снижению несущей способности продольных и поперечных связей корпуса. Работа в направлении совершенствования методики расчета сварочных напряжений и деформаций позволит при накоплении опыта поставить вопрос о переработке соответствующих руководящих документов [1].

### *Список литературы*

1. Корпуса металлических судов. Методы определения и предотвращения остаточных сварочных деформаций. РД 5Р.9807-93.
2. Алферов В.И., Мацкевич В.Д. Требования к точности соединений секций при сборке корпусов судов // Судостроение. – № 9. – 1970.
3. Alferov V.I., Matskevich V.D. Investigation of technological errors in welded ship hulls assembly joints. International institute of welding, 1974.
4. Алферов В.И. Расчетное определение влияния технологических смещений на усталостную прочность сварных соединений // Труды ЛКИ. – Вып. 66. – 1969.
5. Алферов В.И., Мацкевич В.Д. Усталостные испытания сварных соединений с технологическими смещениями элементов // Труды НТО Судпром. – Вып. 146. – 1970.
6. Алферов В.И., Мацкевич В.Д. Исследование изгиба пластин крестового соединения со смещением и непрямолинейностью // Труды ЛКИ. – Вып. 71. – 1970.
7. Кузьминов С.А. Сварочные деформации судовых корпусных конструкций. – Л.: Судостроение, 1974.
8. Петров Г.Л., Тумарев А.С. Теория сварочных процессов. – М.: Высшая школа, 1967.
9. Андреев С.А., Головченко В.С., Горбач В.Д., Руссо В.Л. Основы сварки судовых конструкций. – СПб.: Судостроение, 2006.
10. Алферов В.И., Михайлов В.С. Математическое моделирование процесса накопления сварочных деформаций при изготовлении конструкций танкера с применением метода конечных элементов // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. Вып. «Прочность судов транспортного флота». – 1996.
11. Михайлов В.С., Алферов В.И. Математическое моделирование остаточных сварочных деформаций при изготовлении корпусов судов // Судостроение. – № 2. – 1998.

12. Алферов В.И., Михайлов В.С. Методика расчета сварочных деформаций с использованием метода конечных элементов при сварке изделий насыщения в цилиндрические и сферические конструкции // 4-я Международная конференция по морским интеллектуальным технологиям. Сборник тезисов докладов. – СПб., 2001.
13. Крейн Ф., Блэк У. Основы теплопередачи. – М.: Мир, 1983.
14. Физические свойства сталей и сплавов, применяемых в энергетике // Справочник / Под ред. Б.Е. Неймарка. – М-Л.: Энергия, 1967.
15. Wen S.W., Farrugia D.C. Finite Element Modeling of Residual Stress in Pipe Welds, Swinden Technology Centre, Moorgate, Rothham, S60 3AR.

*Е.М. Анполонов, А.Б. Нестеров, О.Я. Тимофеев, А.В. Дидковский,  
М.А. Кутейников*

## **СИСТЕМА ФОРМИРОВАНИЯ ПРИНЦИПАЛЬНЫХ ИНЖЕНЕРНЫХ РЕШЕНИЙ ПО ОБЕСПЕЧЕНИЮ ЛЕДОВОЙ ПРОЧНОСТИ И БЕЗОПАСНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ СУДОВ В РОССИЙСКИХ АРКТИЧЕСКИХ И ЗАМЕРЗАЮЩИХ МОРЯХ**

### **Введение**

В настоящее время наблюдается увеличение объема морских перевозок на акваториях российских арктических и замерзающих морей. Это связано как с необходимостью вывоза углеводородного и рудного сырья с арктического шельфа и побережья России, так и с общим улучшением экономической ситуации. При этом возникает необходимость в создании судов новых типов, для которых еще не накоплен соответствующий опыт проектирования, постройки и эксплуатации. Здесь в первую очередь следует отметить необходимость создания крупнотоннажных арктических танкеров и газовозов.

На каждой из стадий проектирования, постройки и эксплуатации судна ледового плавания должны решаться задачи как технического, так и экономического характера. При этом на ранних стадиях проектирования (при формировании технического задания, на стадии разработки концепт-проекта) часто нет возможности использовать достаточный объем исходных данных. На стадии технического проектирования при отсутствии близкого прототипа необходимы дополнительные исследования и проработки, так как формальное следование требованиям Правил классификации и постройки морских судов Регистра (Правил) еще не гарантирует создания оптимальной по весу конструкции. На стадии эксплуатации для судов новых типов целесообразно проведение мониторинга ледовых нагрузок с целью накопления опыта, а также выработки рекомендаций по допустимым режимам плавания во льдах

таких судов (что будет способствовать повышению надежности и расширению эксплуатационных возможностей).

Научная база для решения перечисленных задач в комплексе с регламентационной методологией Регистра позволяет повысить надежность и эффективность создаваемых судов ледового плавания для эксплуатации в российских арктических и замерзающих морях. В настоящей работе кратко освещены основные научные положения этой системы.

## **1. Выбор ледового класса на стадии формирования технического задания и решение задачи об эквивалентности ледовых классов различных классификационных обществ**

Для выбора ледового класса на стадии формирования технического задания необходима как достаточно полная информация о ледовых условиях в районе предполагаемой эксплуатации (а также информация о степени использования ледокольного обеспечения), так и данные о возможностях судов различных ледовых классов (категорий). Необходимо отметить, что приемлемый для этого уровень подробности данных об эксплуатационных возможностях ледовых категорий представлен только в Правилах Российского морского регистра судоходства [1]. Другие классификационные общества указывают только предельную толщину или тип льда. С другой стороны, в ряде случаев иностранному проектанту проще, используя предыдущий опыт, задать ледовый класс иностранного классификационного общества. Указанные обстоятельства делают весьма актуальной задачу определения эквивалентности ледовых классов различных классификационных обществ.

Условность и субъективизм любого сопоставления классов различных классификационных обществ связаны как с объективной сложностью и многопараметричностью задачи, так и с вполне понятными субъективными факторами. Тем не менее, авторы попытались в максимально возможной степени обеспечить разумный выбор критериев сопоставления.

Представляется достаточно очевидным, что непосредственная проверка соответствия рассматриваемым Правилам ледовых усилений судна, спроектированных по другим Правилам, в данном случае неприменима. Такой подход, как правило, позволяет вы-

явить те элементы, требования к которым резко различаются в сопоставляемых Правилах, однако редко дает возможность корректного сопоставления ледовых категорий, поскольку в большинстве случаев вынужденно приводит к тому, что ледовые усиления, спроектированные по «чужим» Правилам, соответствуют достаточно низкой ледовой категории из-за расхождения в структуре требований. Так, например, категория IA Super Финско-Шведских Правил [2], которая согласно результатам [3] по требованиям к конструкциям ледового пояса несколько превосходит российскую категорию ЛУ4, не предъявляет требований к ледовой прочности днища в носовом районе и по этому параметру соответствует российской категории ЛУ3. Если также учесть требования к борту ниже ледового пояса, то можно сделать достаточно парадоксальный вывод о соответствии IA Super российской категории ЛУ2.

Более объективным кажется сопоставление по номинальной допустимой толщине льда  $H_{nom}$ ; попытка выполнить такое сопоставление сделана на рис. 1. Для того чтобы показать на одной диаграмме все классы, выполнено приведение к толщине ровного зимнего арктического льда и предпринята попытка замены описательных характеристик числовой (по представлениям авторов настоящей статьи). Для классов, предназначенных для плавания во льдах без ограничений, принято  $H_{nom}=4$  м. Авторы понимают значительную степень условности и субъективизма таких оценок и будут благодарны всем специалистам, которые попытаются уточнить полученный результат (особенно в части своих национальных Правил). Однако любые уточнения не избавят это сопоставление от основного недостатка: величина  $H_{nom}$  в каждом случае определяется по данным разработчика соответствующих Правил, то есть на основе различных расчетных моделей.

С тем чтобы избежать этого недостатка, следует перейти от сопоставления  $H_{nom}$  к сравнению размеров связей ледовых усилений. Этот путь представляется авторам более объективным, хотя и в нем использовались элементы российского подхода: построение стандартной сетки судов, выбор типовых конструкций для тестирования и др.

Авторами предлагается способ сопоставления, более подробно изложенный в [3], основанный на последовательном осреднении требований, что должно обеспечить их комплексный учет. Так,

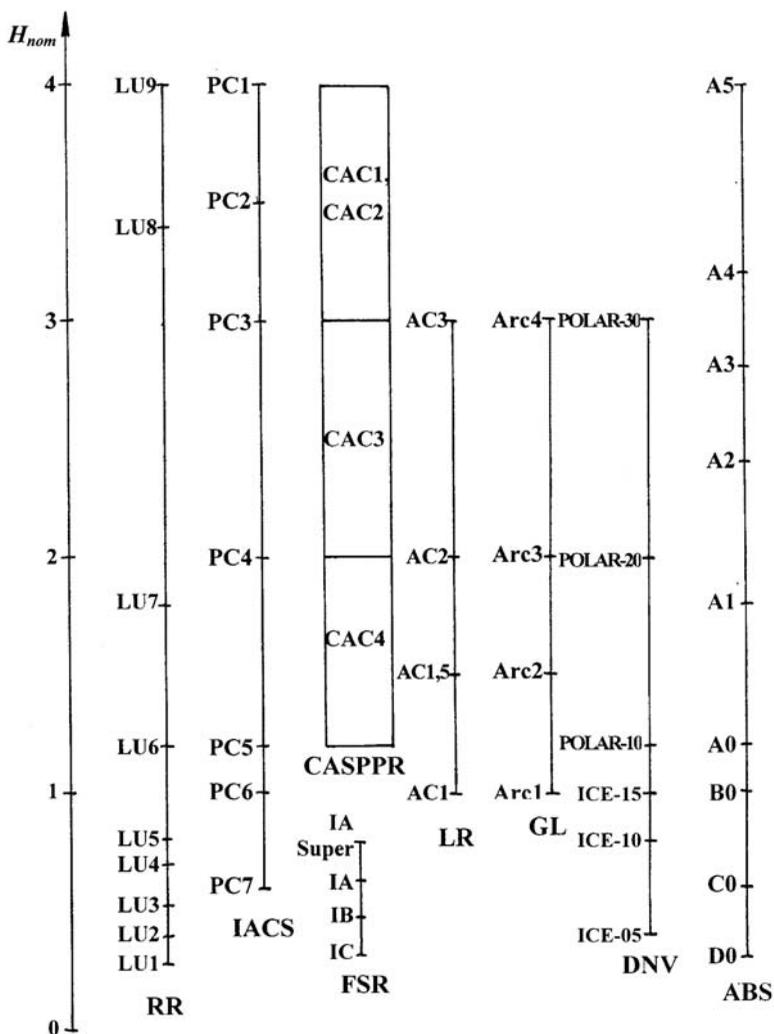


Рис. 1

Сопоставление ледовых классов по номинальной толщине льда:  
**RR** – Russian Register; **UR IACS** – Unified Requirements of International Association Classification Societies (Draft); **CASPPR** – Canadian Arctic Shipping Pollution Prevention Regulation; **FSR** – Finnish-Sweden Rules; **LR** – Lloyd's Register; **GL** – Germanischer Lloyd; **DNV** – Det Norske Veritas;  
**ABS** – American Bureau of Shipping

вместо традиционно используемых трех конструктивных параметров – толщины обшивки, площади стенки и пластического момента сопротивления шпангоута вводится единая, имеющая очевидный физический смысл характеристика – площадь поперечного сечения  $F$  шпангоута (при монотонной системе набора) с пояском обшивки шириной в одну шпацию.

Районирование ледовых усилений в различных Правилах может весьма существенно различаться, однако практически везде могут быть выделены требования к носовому, среднему и кормовому районам ледового пояса. При этом необходимо учесть, что наибольшее количество ударов о лед характерно для носового района ледового пояса, поэтому он наиболее важен для определения эквивалентности. На основании изложенного предлагается определять осредненный по районам показатель прочности ледовых усилений по формуле:

$$F_c = (2F_{нос} + F_{ср} + F_{корм}) / 4, \quad (1)$$

где  $F_{нос}$ ,  $F_{ср}$ ,  $F_{корм}$  – площади сечения шпации ледовых усилений в носовом, среднем и кормовом районах ледового пояса.

Поскольку различные требования по-разному учитывают влияние размеров судна, важно грамотно осреднить показатель  $F_c$  для судов различной длины, что предлагается для арктических классов осуществлять по формуле:

$$F_{AC} = (F_{100} + F_{120} + F_{150} + F_{170} + F_{200} + F_{250}) / 6, \quad (2)$$

где  $F_{L_i}$  – показатель  $F_c$ , вычисленный согласно (1) для судна длиной  $L_i$ .

Роль весовых коэффициентов в (2) выполняет шаг расчетных длин  $L_i$ , учитывающий тот факт, что большинство существующих арктических судов имеют длину от 100 до 200 м, а более крупные суда лишь проектируются.

Результаты расчетов по формулам (1), (2) показаны на диаграмме рис. 2. Высокий уровень металлоемкости ледовых усилений высших арктических классов по канадским и международным Правилам вызван их повышенными требованиями к площади стенок шпангоутов ледовых усилений.

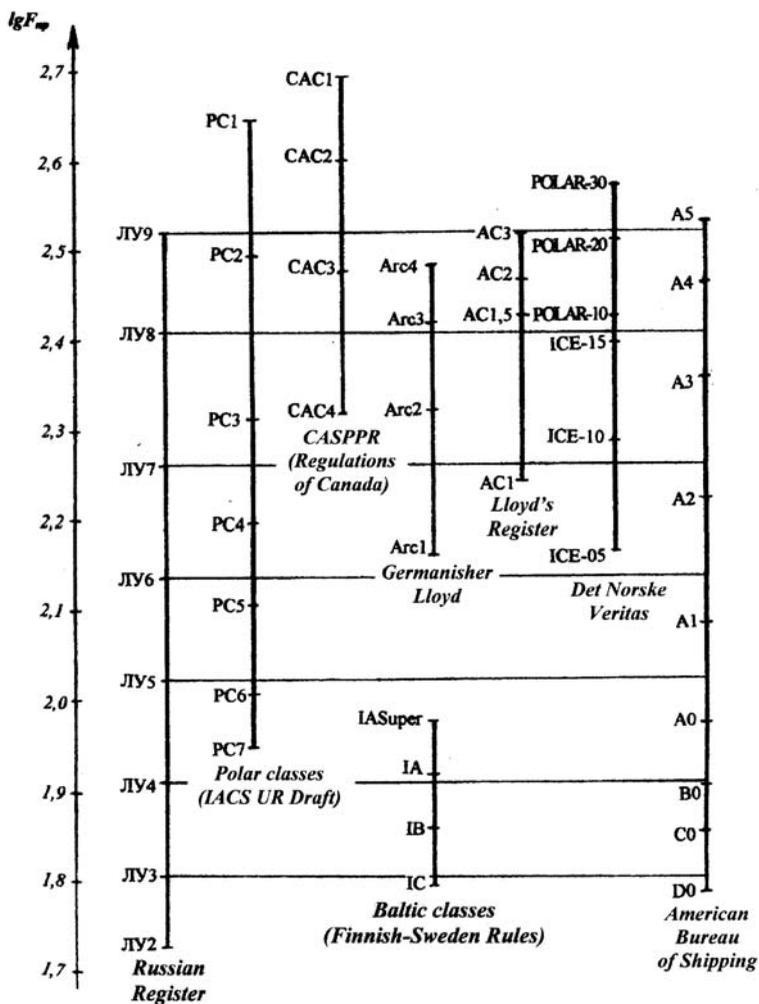


Рис. 2

Физическая номограмма эквивалентности ледовых классов по  $F_{пр}$  – приведенной площади поперечного сечения шпангоута и наружной обшивки на ширине одной шпации

Современный подход к сопоставлению классов требует также рассмотреть возможность разработки комплексного критерия,

учитывающего также требования к мощности ЭУ. При решении проблемы учитывается, что уровень ледовой прочности корпуса является более важным параметром, чем уровень мощности, как с позиций безопасности судна в ледовых условиях, так и по влиянию на показатели эффективности судна. Отмеченное обстоятельство отражает следующий комплексный критерий для сопоставления арктических классов:

$$K_{AC} = 0,714 F_{FR} / F_{RR} + 0,286 N_{FR} / N_{RR}, \quad (3)$$

где  $F_{FR}$ ,  $F_{RR}$  – осредненный параметр ледовой прочности согласно (2) по иностранным требованиям и требованиям Правил Регистра;

$N_{FR}$ ,  $N_{RR}$  – осредненная аналогично (2) требуемая мощность по иностранным и российским Правилам.

Сопоставительная диаграмма, построенная на основании критерия (3), приведена на рис. 3.

Сравнивая различные способы сопоставления ледовых классов, показанные на рис. 1–3, необходимо отметить, что сопоставление по номинальной толщине льда (рис. 1) в большей степени опирается на декларируемые Правилами возможности судна, но менее объективно в силу различия расчетных моделей национальных Правил. Сопоставление по металлоемкости (2) и комплексному критерию (3) с учетом мощности ЭУ (рис. 2, 3) более объективны, так как используют единую методологию для всех Правил. Недостатком этих сопоставлений является их нелегитимность, то есть отсутствие сопоставляемых параметров (соответственно  $F_{AC}$  и  $K_{AC}$ ) непосредственно в национальных Правилах, что позволяет подвергать сомнению результаты, показанные на рис. 2, 3.

## **2. Экспресс определение массы корпуса на стадии разработки концепт-проекта путем расчета предварительного необходимого объема ледовых подкреплений**

Задача оценки веса конструкций ледовых усилений на ранних стадиях проектирования возникает для любого судна, предназначенного для плавания во льдах, но особенно большое значение приобретает для арктических судов ледового плавания и ледоколов, у которых вес конструкций ледовых усилений составляет зна-

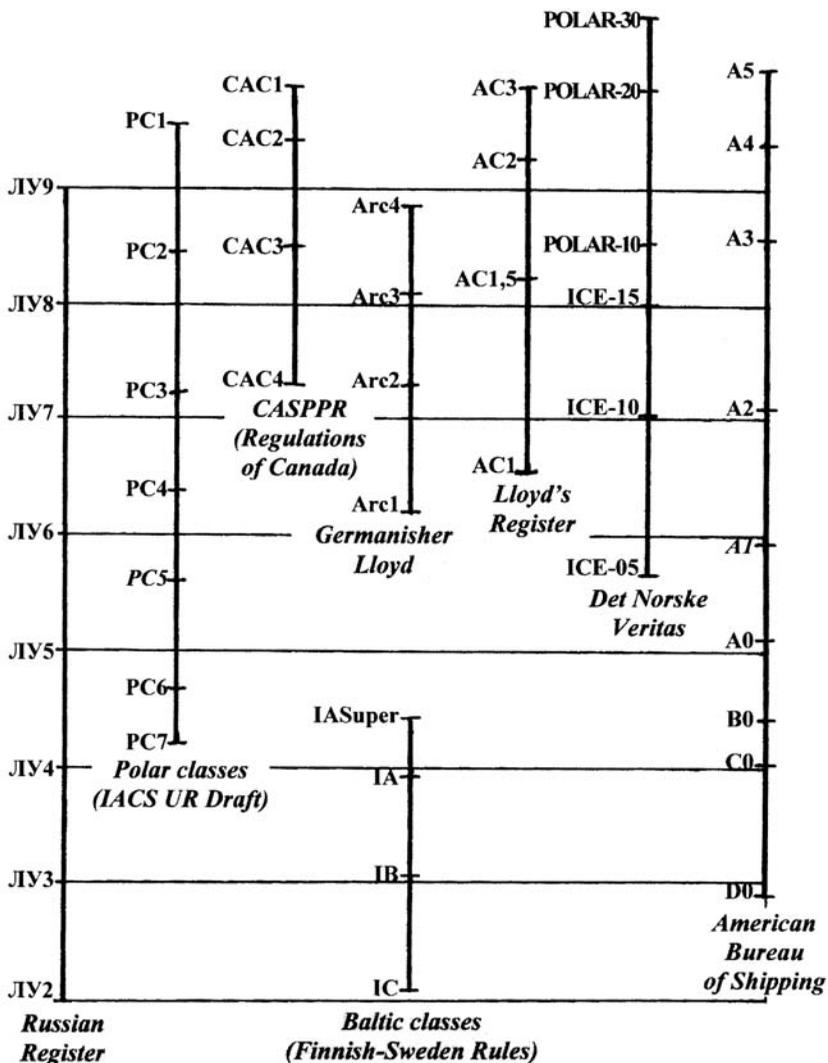


Рис. 3  
 Комплексная относительная номограмма,  
 устанавливающая эквивалентность ледовых классов  
 (с учетом как условий прочности и металлоемкости конструкций  
 ледовых усилений так и мощности энергетической установки)

чительную долю веса металлического корпуса. Важно отметить, что проблема оценки веса ледовых усилений особенно остра для судов новых типов, не имеющих близких аналогов, таких как крупнотоннажные арктические танкеры или газовозы. Для экспресс оценки веса ледовых усилений в этом случае разработан подход, в котором использованы результаты исследований эквивалентности ледовых классов, описанные в п.1, и применявшиеся там алгоритмы.

В рамках данного подхода предполагается, что в первом приближении определены параметры судна, необходимые для расчета ледовой нагрузки, заданы шпация и пролет балок основного набора. Наличие перечисленных данных позволяет определить три основных параметра конструкции ледовых усилений (толщину обшивки, площадь стенки и пластический момент сопротивления балки основного набора) и найти приведенную площадь обшивки на ширине одной шпации  $F_i$  по алгоритму, блок-схема которого показана на рис. 4. Весовая доля рамных балок и листовых конструкций оценивается экспертно, по результатам расчета ледовых усилений той же или близкой категории. Площадь каждого из районов ледовых усилений  $A_i$  устанавливается с помощью измерений по растяжке наружной обшивки. После этого вес конструкций ледовых усилений определяется по формуле:

$$P_{ice} = k_w \cdot \sum_i A_i F_i \quad (4)$$

где  $k_w$  – коэффициент, учитывающий вес рамных балок и листовых конструкций.

### **3. Выбор стали для ледовых усилений и решение нестандартных инженерных проблем на стадии разработки концепт-проекта**

Вопросы выбора стали для ледовых усилений также приобретают большое значение в основном для арктических судов ледового плавания и ледоколов, у которых вес конструкций ледовых усилений составляет заметную долю веса корпуса. Если водоизмещение проектируемого судна избыточно (такая ситуация возможна для судов, не являющихся транспортными: ледоколов, научно-ис-

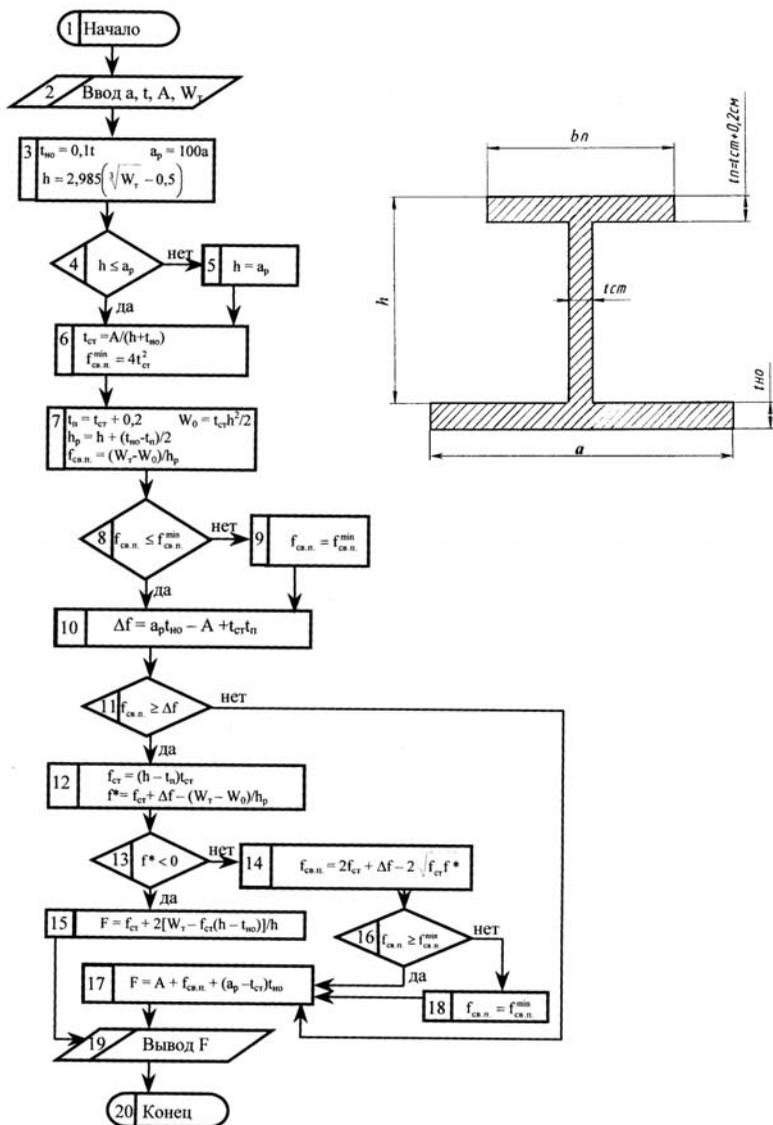


Рис. 4  
Блок-схема алгоритма вычисления приведенной площади обшивки на ширине одной шпации  $F_i$

следовательских судов и т. п.), то имеется возможность снизить затраты на материал корпуса за счет применения стали с более низким пределом текучести. Если же при проектировании следует снизить массу корпуса (дефицит водоизмещения), то необходимо применить сталь с более высоким пределом текучести. Стоимость затрат на материалы при этом, как правило, возрастает. Эта ситуация проиллюстрирована на рис. 5 для судна категории ЛУ7 водоизмещением 16 000 т. Следует отметить, что в рамках этой общей тенденции могут быть исключения: так, как видно из рис. 5, при переходе от стали с пределом текучести  $R_{eH} = 315$  МПа к стали с  $R_{eH} = 355$  МПа стоимость затрат на материалы, наоборот, уменьшается, так как стоимость одной тонны стали при этом увеличивается незначительно, а общий вес конструкций ледовых усилений

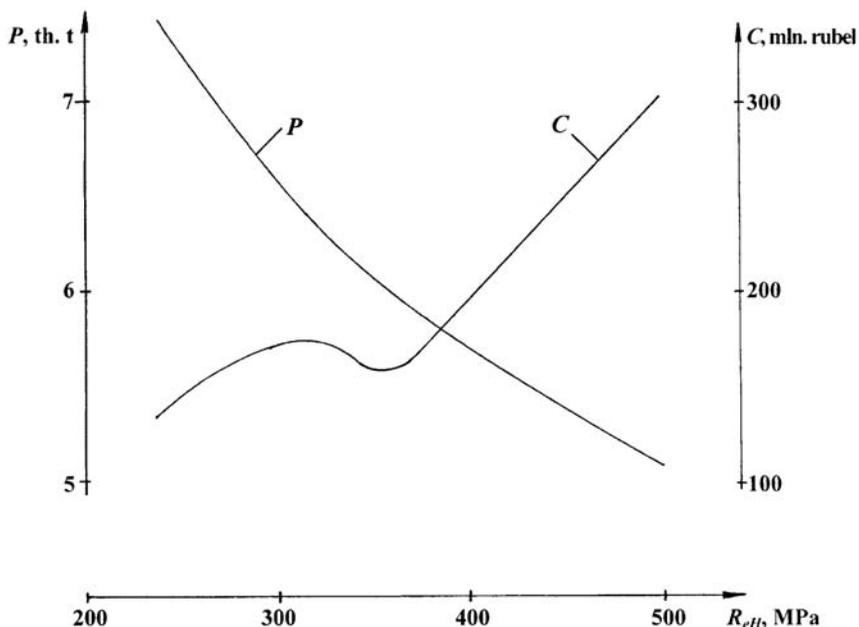


Рис. 5

Зависимость веса  $P$  и стоимости материала ледовых усилений  $C$  от предела текучести применяемой стали для судна категории ЛУ7 водоизмещением 16 000 т

снижается. Таким образом, корректное решение вопроса выбора стали для ледовых усилений также требует проведения расчетного анализа.

Решение нестандартных инженерных проблем на стадии разработки концепт-проекта актуально применительно к судам новых типов, для которых нельзя подобрать адекватный прототип. Примером могут служить арктические газовозы с мембранными емкостями для сжиженного газа, для которых возникает проблема оценки деформаций внутреннего борта под действием ледовых нагрузок. Повышенная ответственность конструкций мембранных емкостей для сжиженного газа определяет необходимость рассмотрения аварийных ледовых нагрузок, которые могут возникнуть хотя бы один раз за период жизненного цикла судна. Поэтому применительно к указанной задаче рассматриваются иные сценарии взаимодействия со льдом, чем при проектировании ледовых усилений. К числу таких сценариев относятся: удар корпуса на высокой скорости о лед большой толщины (аварийные режимы движения), вторичный (отраженный) удар о лед при плавании в канале за ледоколом, интенсивные сжатия во льдах большой толщины при попадании судна в «ледовый плен». Для обеспечения необходимого уровня жесткости и предельной прочности двойного борта в этом случае может потребоваться увеличение размеров рамных шпангоутов.

#### **4. Оптимизация конструкции ледовых усилений на стадии технического проектирования**

На стадии технического проектирования может потребоваться оптимизация конструкции ледовых усилений, направленная на снижение их веса по сравнению с вариантом проектирования на основе формального применения Правил Регистра, а также, в случае необходимости, на обоснование допустимости отдельных отступлений от требований Правил. В этом случае следует использовать уточненные методы расчета, в частности метод расчетного определения ледовых нагрузок на основе базовых опасных режимов движения во льдах (БОРД), а также метод определения предельной нагрузки конструкции ледовых усилений на основе конечного элементного анализа.

Необходимо пояснить, что в основу Правил Регистра положена методология обеспечения ледовой прочности корпуса, в которой в качестве основного сценария рассматривается касательный удар корпуса судна, движущегося по прямолинейной траектории, о кромку ледового поля [4, 5]. Соответствующая этому сценарию модель удара корпуса о лед позволяет определять параметры ледовой нагрузки при заданных скорости движения судна и толщине льда. При этом полагается, что в результате удара под действием ледовой нагрузки в конструкции ледовых усилений судна возникает некоторое заданное опасное (критериальное) состояние, описываемое принятым критерием прочности. В основу Правил Регистра положен критерий предельной прочности, определяющий в качестве опасного состояния превращение конструкции в кинематически изменяемую систему, называемую пластическим механизмом [6]. Предельная нагрузка, вызывающая превращение конструкции в пластический механизм, определяется на основании аппарата теории предельного равновесия (ТПР), базирующейся на гипотезе идеального жесткопластического материала.

Для каждой ледовой категории задается единая кривая «скорость судна – толщина льда», ассоциированная с критерием предельной прочности и называемая базовым опасным режимом движения (БОРД). Превышение БОРД может привести к появлению в конструкциях фиксируемых остаточных пластических деформаций, поскольку ледовым нагрузкам, воздействующим на корпус судна при движении по базовому режиму, ставятся в соответствие критерии и методы расчета прочности, учитывающие резервы пластического деформирования материала. Зависимости для расчетных ледовых нагрузок, регламентируемые Правилами Регистра, являются упрощенными аппроксимациями результатов расчета ледовых нагрузок при движении по БОРД судов различных размерений. Они обеспечивают приемлемую для практики проектирования достоверность по сравнению с прямыми расчетами для судов с водоизмещением до 20 000 – 30 000 т, реально эксплуатирующихся в арктических и замерзающих морях с классом Регистра. Поэтому расчет ледовых нагрузок непосредственно по БОРД с использованием принятой модели удара корпуса о лед позволяет уточнить ледовые нагрузки.

Предельные нагрузки, характеризующие несущую способность конструкций ледовых усилений с учетом резервов пластического

деформирования материала, определяются в Правилах Регистра на основании упрощенных аналитических решений ТПР. Для анализа предельного состояния сложных пространственных конструкций в качестве альтернативы ТПР целесообразно рассматривать конечноэлементный анализ в упруго-пластической области деформирования.

Для выполнения конечноэлементного анализа могут быть сформулированы следующие рекомендации. Конечноэлементная модель включает участок двойного борта в пределах отсека. В качестве поперечных опорных конструкций рассматриваются поперечные переборки. Продольными опорными конструкциями являются верхняя палуба и двойное дно. Граничные условия на опорных конструкциях предполагают фиксацию всех перемещений кроме вертикальных перемещений на верхней продольной опорной конструкции (верхней палубе). В конечноэлементной модели должны быть отражены все конструктивные элементы (рамные балки (продольные и поперечные диафрагмы двойного борта с подкрепляющими ребрами жесткости), балки основного набора, пластины обшивки, кницы). Рекомендуется использование пластинчатой идеализации конструктивных элементов. Прямой расчет прочности выполняется путем приложения ледовой нагрузки, распределенной согласно эпюре рис. 6. Нагру-

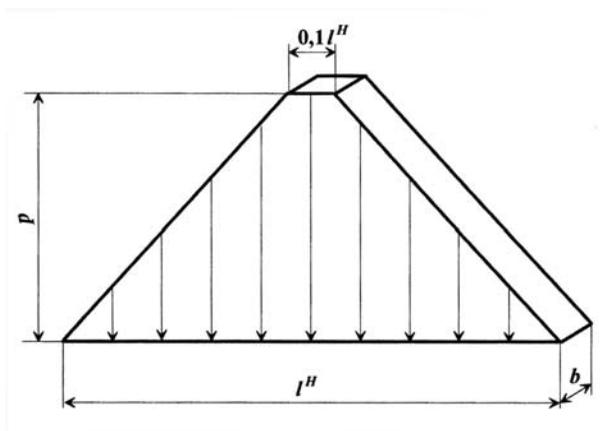


Рис. 6

Вид эпюры ледовой нагрузки для прямых расчетов прочности перекрытий

жение конечноэлементной модели осуществляется путем пошагового увеличения давления  $p^i$  в зоне действия ледовой нагрузки. По результатам расчета строятся зависимости изменения параметров деформированного состояния конструкции в процессе увеличения давления. Нелинейность материала конструкции допускается моделировать упруго-пластической кривой «напряжение-деформация» с линейным кинематическим упрочнением. Конечноэлементный анализ выполняется в геометрически линейной постановке. Для проверки прочности ледовых усилений используется предельная нагрузка, которая должна быть не менее расчетной ледовой. Схема определения предельной нагрузки показана на рис. 7.

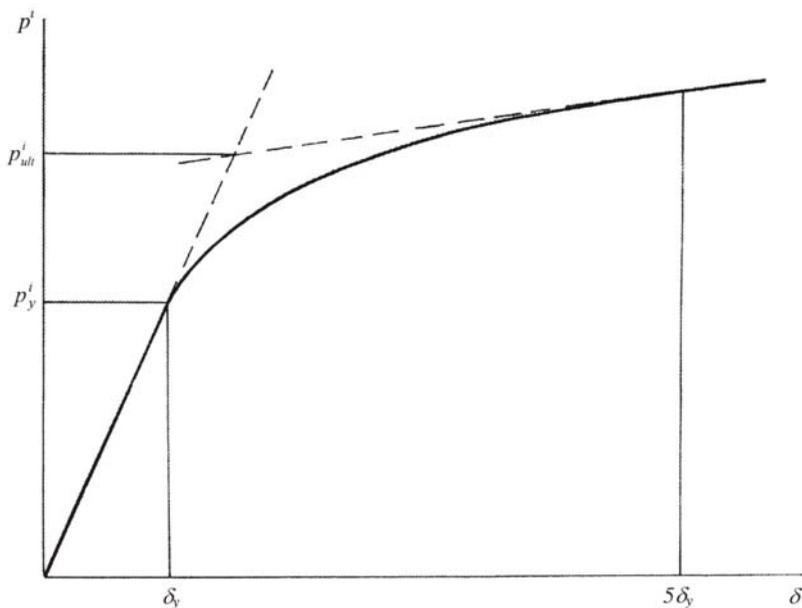


Рис. 7

Схема определения предельного давления  $p_{ult}^i$  на основании конечноэлементного расчета:

$\delta$  – максимальный прогиб рамной балки;  $p_y^i, \delta_y$  – давление и прогиб, при которых появляются первые пластические деформации в рамных балках; пунктиром проведены касательные к кривой  $p^i(\delta)$ .

Изложенные выше рекомендации определяют минимальный объем процедуры конечноэлементного анализа. Естественно, они не исключают использования более точных конечноэлементных моделей. Например, вместо модели участка борта в пределах отсека может рассматриваться модель пространственного отсека, более широкий набор вариантов расположения центра эпюры нагрузки и т. д. Ориентация на минимизацию объема конечноэлементных моделей и числа расчетных вариантов обусловлена тем обстоятельством, что трудоемкость выполнения конечноэлементных расчетов с учетом факторов физической нелинейности существенно превышает трудоемкость аналогичных расчетных процедур в упругой области деформирования материала.

## **5. Использование мониторинга ледовых воздействий для формирования рекомендаций по выбору безопасных режимов движения во льдах**

В российской практике в качестве эффективного способа повышения эксплуатационной надежности судов ледового плавания используются ледовые паспорта, представляющие судоводителю количественную информацию для выбора безопасного режима движения судна в различных ледовых условиях. Научная методология, положенная в основу ледового паспорта, разрабатывалась эволюционным путем и в значительной степени отражает опыт ледовой эксплуатации судов малого и среднего водоизмещения (до 20 000 – 30 000 т). В настоящее время практические потребности освоения российского арктического шельфа определяют необходимость создания нового поколения ледового флота, включающего в качестве основного элемента крупнотоннажные танкеры и газовозы водоизмещением более 100 000 т. Теоретический анализ показывает, что чисто расчетная экстраполяция существующей методологии обеспечения безопасности ледового плавания на указанные суда, отличающиеся не только значительными размерами, но и повышенным риском экологических катастроф, не может дать надежного результата. В то же время, наблюдаемые темпы проектирования и строительства указанных типов судов практически исключают возможности реализации эволюционного пути, основанного на долговременном накоплении опыта эксплу-

атации и данных о повреждаемости корпусов. Одним из эффективных путей преодоления складывающейся кризисной ситуации является революционное развитие методологии обеспечения безопасности арктических танкеров и газовозов, ориентированное на органическое сочетание накопленного опыта составления ледовых паспортов с современными возможностями мониторинга ледовых воздействий.

Описание основных положений новой методологии целесообразно предварить исторической справкой. Первоначально, в 70-х гг. прошлого века, процедура создания ледового паспорта включала обязательное проведение прочностных испытаний каждого конкретного судна. По мере развития моделей силового взаимодействия корпуса судна со льдом и методов регламентации ледовой прочности, а также накопления опыта использования ледовых паспортов необходимость в проведении дорогостоящих и трудоемких натуральных испытаний постепенно отпала.

На настоящем этапе роль натуральных испытаний для арктических танкеров и газовозов должна сыграть новая технология мониторинга внешних силовых воздействий на корпус судна. Под системой мониторинга в общем случае понимается программно-аппаратный комплекс, позволяющий судоводителю оценивать силовые воздействия внешней среды на корпус в реальных физических или относительных величинах, отслеживать тенденции изменения такого воздействия и выдавать рекомендации по управлению судном [7, 8]. Как правило, система мониторинга состоит из следующих компонентов:

- сенсорный блок, или блок получения первичной информации о физических показателях взаимодействия отдельных подсистем и элементов корпуса судна;

- программный блок обработки полученных сигналов, получения абсолютных или относительных обобщенных показателей взаимодействия;

- программный блок обработки обобщенных показателей воздействия и формирование рекомендаций судоводителю.

Применительно к морским судам данная технология в последние годы получила существенное развитие. Однако силовое воздействие ледового покрова на корпуса судов ледового плавания имеет существенные особенности, принципиально затрудняющие

возможности создания универсальных мониторинговых систем. В рамках настоящего доклада целесообразно обратить внимание на два существенных отличия ледовых воздействий.

Первое отличие связано с локальным характером ледовых воздействий. Площадь эпюры ледовой нагрузки от единичного удара о ледовое поле, представляющей опасность для прочности корпусных конструкций, на 2 – 3 порядка меньше площади поверхности корпуса, потенциально подвергающейся ледовым воздействиям. Поэтому для уверенной фиксации большей части ударных ледовых нагрузок сенсорный блок должен обеспечивать запись силовых воздействий на всей площади районов ледовых усилений, что практически абсолютно невозможно.

Второе отличие определяется сценариями реализации опасных для прочности воздействий, способных вызвать ледовые повреждения корпуса. Основным сценарием опасных воздействий является удар о кромку ледового поля на относительно высокой скорости при движении в канале за ледоколом или самостоятельном плавании в разреженных льдах. При таком сценарии опасные воздействия носят неожиданный характер, им не предшествуют сопоставимые по величине удары о лед. Соответственно, до реализации опасного воздействия система мониторинга не получает количественной информации о имеющейся опасности и не способна сформировать объективные рекомендации судоводителю.

Изложенные соображения позволяют сделать следующие выводы относительно перспектив создания эффективных систем ледового мониторинга.

На начальном этапе система ледового мониторинга должна органически дополнять ледовый паспорт, фактически выполняя роль мониторинга ледовых нагрузок при движении судна в различных ледовых условиях. Накапливаемая в ней статистическая информация о зафиксированных опасных воздействиях для конкретных ледовых условий и режимов движения судна создаст базу данных для совершенствования методологии определения ледовых нагрузок.

В дальнейшем, после накопления опыта эксплуатации, система ледового мониторинга будет дополняться новыми блоками, позволяющими прогнозировать реализацию опасных ледовых воздействий на основании сформированной базы данных и текущих

замеров, а также включающими математическую модель движения арктических танкеров и газовозов во льдах. Взаимодействие блоков прогнозирования с усовершенствованной математической моделью движения судна во льдах позволит формировать для судоводителя обоснованные рекомендации по выбору безопасных режимов ледового плавания.

В части конкретных способов реализации системы ледового мониторинга на начальном этапе могут рассматриваться следующие положения.

В качестве сенсоров определения мгновенного состояния элементов судна наибольшее распространение получили датчики деформаций, которые отличаются большим конструктивным разнообразием. Датчики угловых перемещений широко используются для контроля мобильных технических средств. Контроль углов поворота в вертикальных плоскостях возможен с помощью инклинометров различной конструкции. Контроль угла поворота судна в горизонтальной плоскости возможен магнитометром. Акселерометры так же широко используются в системах мониторинга состояния. Преимущество акселерометров заключается в том, что интегрирование по времени ускорения позволяет получать скорости перемещения и собственно перемещения.

Все сигналы, поступающие с датчика любого типа, должны предварительно обрабатываться с помощью следующих процедур:

- сглаживание для уменьшения влияния внутренних помех информационного канала;

- приведение сигнала к нулевому уровню (центрирование), т. е. нейтрализация естественного дрейфа сигнала.

После предварительной обработки проводится анализ сигнала на его значимость или значимость воздействия для дальнейшего сопоставления с некоторым предельным значением абсолютной физической величины. Системы, разрабатываемые в настоящее время для мониторинга локальной ледовой нагрузки, преобразуют сигналы датчиков в значение параметров ледовой нагрузки. Относительно описания локальной ледовой нагрузки делаются некоторые предложения.

Оценка глобальной нагрузки по показаниям акселерометров и датчиков угловых перемещений базируется на использовании об-

щих уравнений движения судна. Глобальные ледовые нагрузки на технический объект представляются в виде шестикомпонентного вектора  $\{F\}$ : вертикальная сила, продольная горизонтальная сила, поперечная горизонтальная сила, моменты, действующие относительно координатных осей

$$\{F\} = \{F_x, F_y, F_z, M_x, M_y, M_z\}.$$

Получение компонент глобальной нагрузки возможно с использованием общего уравнения движения твердого тела

$$M \cdot \ddot{x} + C \cdot \dot{x} + K \cdot x = \{F(t)\},$$

где  $M$  – матрица масс;  
 $C$  – матрица демпфирования;  
 $K$  – матрица жесткости;  
 $t$  – время.

Относительно конфигурации системы мониторинга на последующих этапах ее совершенствования в настоящий момент можно сформулировать только положения достаточно общего характера.

Анализировать полученные силовые факторы для дальнейшего формирования рекомендаций экипажу целесообразно, сравнивая их значения с лимитирующими силами. Лимитирующая локальная ледовая нагрузка задается минимум тремя независимыми параметрами: среднее ледовое давление, длина и высота пятна контакта. В указанной координатной системе  $(p, b, l)$  лимитирующая нагрузка представляет собой поверхность. Восстановленная на основании анализа результатов замеров и расчетного моделирования движения судна ледовая нагрузка характеризуется параметрами  $(p_o, b_o, l_o)$ . Степень опасности ледового воздействия определяется положением восстановленной ледовой нагрузки  $(p_o, b_o, l_o)$  относительно поверхности лимитирующей нагрузки. Мерой опасности режима эксплуатации может служить вероятность попадания точки  $(p_o, b_o, l_o)$  выше поверхности лимитирующей нагрузки. Формирование рекомендаций судоводителю осуществляется в зависимости от расположения точки  $(p_o, b_o, l_o)$  относительно поверхности  $(p, b, l)$  на основании математической модели движения судна во льдах.

В отношении перспектив создания систем ледового мониторинга важно отметить следующее обстоятельство. В настоящее время трудно ожидать, что необходимость создания систем ледового мониторинга будет регламентирована МАКО или отдельными национальными классификационными обществами. Как и в ситуации с ледовыми паспортами, инициатива должна исходить от судостроительных и судовладельческих организаций, заинтересованных в создании сложных арктических судов нового поколения, способных надежно эксплуатироваться в тяжелых ледовых условиях Северного морского пути. Разработка научного обеспечения системы ледового мониторинга должна включать:

обоснование конфигурации системы;

разработку математической модели движения судна в различных ледовых условиях, учитывающей особенности эксплуатации арктических танкеров и газозовозов;

разработку алгоритмов и программного обеспечения для обработки данных замеров реакций корпуса на ледовые воздействия, прогнозирования опасных ледовых воздействий и формирования рекомендаций судоводителю по выбору безопасных режимов ледового плавания.

## **Заключение**

В работе представлены основные положения комплексной системы формирования принципиальных инженерных решений по обеспечению ледовой прочности и безопасности перспективных судов ледового плавания. Использование системы на различных стадиях проектирования и эксплуатации будет способствовать повышению эффективности и надежности нового поколения ледового флота.

## *Список литературы*

1. Правила классификации и постройки морских судов. – СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2005.
2. Finnish maritime administration. Regulation on the structural design and engine output requirements of ship for navigation in ice “Finnish-Sweden ice class rules”. – Helsinki, 2002.

3. Апполонов Е.М., Головкин А.А., Нестеров А.Б., Палий О.М. Оценка эквивалентности существующих ледовых классов применительно к условиям эксплуатации в районах месторождений на российском арктическом шельфе // Труды RAO/CIS OFFSHORE 2005. – СПб., 2005.

4. Appolonov E.M., Nesterov A.B., Timofeyev O.Y. Ice strength in connection with classification of ships and icebreakers // Proceeding International Conference «The Centenary the Krylov SRI». Section C. – St.Petersburg, Russia, 1994.

5. Апполонов Е.М., Нестеров А.Б., Копилец Н.Ф., Дидковский А.В. О проекте новой редакции требований Правил Российского Морского Регистра Судоходства к ледовой прочности судов и ледоколов // Судостроение. – № 5. – 1997.

6. Апполонов Е.М. Проектирование конструкций ледовых усилений по критерию предельной прочности // Судостроение. – № 2. – 1992.

7. Тимофеев О.Я., Чернов А.В. Комплексное исследование ледовых качеств НЭС «Академик Федоров» во время высокоширотного рейса 2005 года // Тезисы докладов конференции памяти академика А.Н.Крылова. – СПб., 2006.

8. Звягин П.Н., Нечаев Ю.И., Тимофеев О.Я. Применение аппарата нечеткой логики в системах мониторинга ледовых воздействий // Тезисы докладов конференции памяти академика А.Н.Крылова. – СПб., 2006.

## **Морские стационарные платформы и плавучие буровые установки**

---

УДК 629.061.6:622.242.424.2:553.98

*В.И. Евенко, В.Г. Чернов, С.В. Балагура*

### **ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ РЕГИСТРА В КАЧЕСТВЕ ИНСПЕКЦИОННОГО ОРГАНА, ПРЕДОСТАВЛЯЮЩЕГО УСЛУГИ «ТРЕТЬЕЙ СТОРОНЫ» В РАМКАХ ПРОЕКТОВ ОСВОЕНИЯ УГЛЕВОДОРОДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ НА ШЕЛЬФЕ МОРЕЙ**

Соответствие Российского морского регистра судоходства (Регистр) положениям Европейского стандарта EN ISO/IEC 17020:2004 «Общие требования к деятельности различных типов органов, осуществляющих инспекционный контроль» (за исключением идентификационного номера настоящий стандарт идентичен аннулированному EN 45004:1995), как организации, выполняющей функции органа, производящего инспекционный контроль в рамках классификационных и конвенционных услуг по поручениям Администраций и представляющей собой тип А (инспекционный орган, обеспечивающий услуги «третьей стороны»), а в отношении независимости и беспристрастности, полностью отвечающей критериям, предъявляемым вышеуказанным стандартом, подтверждено заключением Всероссийского научно-исследовательского института классификации, терминологии и информации по стандартизации и качеству.

Начиная с 1976 года, то есть с начала освоения нефтяных месторождений континентального шельфа бывшего СССР, Российский морской регистр судоходства осуществляет классификацию и

техническое наблюдение в процессе проектирования, постройки и эксплуатации плавучих буровых установок различных типов. Под техническим наблюдением Регистра построены десятки плавучих буровых установок.

После распада СССР строительство ПБУ на отечественных предприятиях было прекращено. Последние пять лет, можно смело сказать, стали прорывом в области строительства плавучих буровых установок (ПБУ) и морских стационарных платформ (МСП) на предприятиях России.

Опыт наблюдения Регистра последних лет за реализацией проектов на континентальном шельфе РФ показывает, что в настоящее время в России научно-технический и производственный потенциал, необходимый для создания таких сложных инженерных сооружений, каковыми являются ПБУ/МСП, в полной мере имеется на предприятиях судостроительной промышленности.

Учитывая накопленный Регистром опыт, распоряжением Правительства РФ № 1377-р от 30 сентября 2000 года на Регистр возложены функции:

технического наблюдения за морскими стационарными платформами различного назначения;

головной организации по унификации оборудования, материалов и изделий для морских судов и МСП.

Приказом Министерства транспорта РФ № 160 от 9 июля 2003 года, на Регистр возложены функции классификации МСП.

Наличие классификационных и конвенционных документов, выданных Регистром, является одним из условий регистрации объекта ПБУ/МСП в Государственном судовом реестре Российской Федерации, а выдаваемые Регистром сертификаты и свидетельства признаются ведущими страховыми компаниями.

В настоящее время под техническим наблюдением Регистра строится ледостойкая стационарная платформа для нефтяного месторождения им. Ю. Корчагина в Северной части Каспия (рис. 1), стационарный морской ледостойкий отгрузочный причал в Печерском море в составе Варандейского нефтяного отгрузочного терминала (рис. 2), а также морская ледостойкая стационарная платформа «Приразломная» для Приразломного нефтяного месторождения в Баренцевом море (рис. 3).



Рис. 1



Рис. 2



Рис. 3

Понимая сложность задач, решаемых при строительстве и вводе в эксплуатацию ПБУ и МЛСП, совместно с услугами по классификации Регистр оказывает комплекс услуг по сертификации в системе ГОСТ Р, экспертизе промышленной безопасности, а также в соответствии с EN ISO/IEC 17020:2004, как инспекционный орган (ИО), услуги «третьей стороны» на следующих этапах:

- проектирование (все стадии проекта);
- наблюдение при изготовлении материалов и изделий;
- входной контроль на предприятии-строителе;
- наблюдение в процессе строительства и монтажа;
- наблюдение за строительными технологическими операциями на плаву, включая работы по установке МСП на точке эксплуатации;
- освидетельствование готовности объектов к началу пуско-наладочных работ;
- освидетельствование пуско-наладки и передачи объектов;
- проверка исполнительной документации;
- оформление документов.

Услуги могут оказываться как на любом из описанных ниже типовых этапов работ, так и в других случаях по заявке Заказчика. После заключения Договора разрабатывается План качества по оказанию услуг, который определяет порядок оказания услуг.

Услуги «третьей стороны» не являются классификационным техническим наблюдением, то есть проверкой соответствия объектов наблюдения требованиям Регистра (требованиям Правил Регистра, международных конвенций и соглашений, рекомендаций Международной морской организации и дополнительным требованиям). Выдаваемые документы не являются документами Регистра, оформляемыми при проведении технического наблюдения на класс.

Описываемые услуги являются добровольными и не заменяют обязательного подтверждения соответствия продукции и/или производства, требуемого законодательством РФ. Осуществление обязательного надзора (сертификации) за продукцией и/или производством со стороны уполномоченных Федеральных органов, наличие свидетельств Регистра на объекты технического наблюдения Регистра и/или сертификатов, выданных другими признанными сертификационными органами не отменяют наблюдения ИО. Результаты инспекций, проверок, испытаний и т. п. при обязательной сертификации учитываются при оценке и подтверждении соответствия в рамках услуг оказываемых ИО.

Работа ИО направлена на оценку и подтверждение соответствия, технически сложных объектов обустройства морских месторождений требованиям национальных и международных норм и правил, применяемых при проектировании и строительстве данных объектов. Деятельность ИО совместно с аппаратом контроля Заказчика призвана обеспечить высокий контроль качества выполнения работ на всех стадиях проекта.

## **Проектирование**

На стадии проектирования проводится верификация проекта, проверка разработанной технической документации на соответствие требований нормативно-технической базы, используемой в данном проекте.

## Наблюдения при изготовлении материалов и изделий

На стадии изготовления оборудования и материалов проводится инспектирование по следующим позициям:

материалы специальных и основных конструкций, технологических систем;

основное оборудование (буровой, технологический, энергетический комплексы, котлы и нагреватели, компрессоры, механическое оборудование, системы безопасности, взрыво-защищенное электрооборудование, телекоммуникации, оборудование и арматура вентиляции и кондиционирования);

основная арматура технологических систем, особенно изготовленная методом сварки;

сосуды высокого давления;

автономное технологическое блочное оборудование;

системы КИП и А, АСУ ТП;

прочее на усмотрение Регистра (по согласованию с Заказчиком).

Порядок наблюдения при изготовлении оборудования и материалов включает следующее.

### 1. Анализ заказных ведомостей:

получение от Заказчика заказных ведомостей с указанием поставщиков (по объектам);

определение в заказных ведомостях объектов технического наблюдения Регистра;

определение в заказных ведомостях материалов и изделий, требующих наличия разрешений Ростехнадзора на применение;

определение материалов и изделий, не требующих наблюдения ИО при изготовлении и согласование перечня с Заказчиком.

### 2. Получение от Заказчика графиков поставок.

3. Изготовление материалов и изделий, не требующих наблюдения ИО при изготовлении:

направление перечня в Подразделение Регистра, осуществляющее наблюдение ИО при строительстве, с указанием необходимости контроля при поставке на соответствие документации изготовителя.

### 4. Изготовление материалов и изделий под наблюдением ИО:

рассмотрение технической документации;

проведение освидетельствований.

#### 5. Отчетность:

предоставление сведений о проведенных освидетельствованиях, выданных актах, свидетельствах и сертификатах;  
предоставление Отчетов о несоответствии.

### **Входной контроль на предприятии-строителе**

Закупленные изделия и материалы подлежат наблюдению ИО на предприятии-строителе (строительной площадке), включая следующие стадии:

- освидетельствование при поступлении на склад;
- инспекционные проверки условий хранения, системы идентификации и учета;
- приемка-передача оборудования в монтаж.

По результатам наблюдения оформляются:

- отчет ИО на месте строительства;
- отчеты о несоответствии изделий и материалов (оформляются и направляются Заказчику);

визуируется оформленные Покупателем Акты о приеме (поступлении) оборудования и Акты о выявленных дефектах оборудования.

### **Наблюдения во время строительства и монтажа**

Для выполнения работ на месте строительства организуется группа наблюдения, в которую включаются инспекторы/эксперты, аттестованные в системе сертификации ГОСТ Р, добровольной системе сертификации Регистра и в области промышленной безопасности.

При наблюдении во время строительства и монтажа контролируется следующее:

- соответствие выполненных работ рабочему проекту и нормативной документации;
- квалификация сварщиков;
- технологические процессы сварки, спецификации процессов сварки;
- методы неразрушающего контроля, результаты и отчеты;

соблюдение технологических процессов сборки и монтажа;  
проведение испытаний;  
грузоподъемные операции с крупногабаритными и тяжеловесными конструкциями;  
наличие сертификатов на материалы и оборудование;  
выполнение Подрядчиками требований системы качества;  
обеспечение требований пожарной безопасности и охраны труда;  
выполнение мероприятий по устранению выявленных несоответствий;  
соблюдение Подрядчиками графика строительства.

До начала работ должна проводиться оценка производства и систем качества Подрядчиков на основе представленных документов. При работе ИО на данном этапе ведется наблюдение за:  
корпусными конструкциями;  
конструктивной противопожарной защитой и системами пожаротушения;  
буровым комплексом с обслуживающими системами и факельной установкой;  
технологическим комплексом с обслуживающими системами;  
системой отгрузки нефти и подводными трубопроводами;  
энергетическим комплексом с обслуживающими системами;  
механическим оборудованием;  
системами трубопроводов общего назначения;  
котлами, теплообменными аппаратами, сосудами под давлением;  
электрооборудованием и электромонтажом;  
АСУ и КИПиА;  
дельными вещами и устройствами;  
грузоподъемными устройствами;  
спасательными средствами;  
радио- и навигационным оборудованием, средствами связи;  
оборудованием по предотвращению загрязнения;  
лакокрасочными покрытиями наружной поверхности и цистерн.

Для следующих конструкций, оборудования и систем во время монтажа и строительства проводятся только приемки скрытых ра-

бот и периодические проверки соблюдения технологических процессов и требований пожарной безопасности и охраны труда:

изоляция и зашивка помещений (кроме конструктивной противопожарной защиты);

оборудование помещений;

системы: бытового водоснабжения, парового отопления, кондиционирования;

грузоподъемные средства SWL < 1,0 т, лифты грузоподъемностью < 250 кг;

оборудование вертолетной площадки;

комплекс охранных технических средств;

средства гидрометеорологического наблюдения;

окраска внутренних помещений, покрытия палуб.

### **Наблюдение за строительными технологическими операциями на плаву и морскими операциями**

Строительные технологические операции на плаву включают операции по сборке, транспортировке, стыковке и установке на место объекта или его частей (блоков, ярусов, колонн, модулей, систем удержания и др.), совершаемые при нахождении на плаву сооружения или каких-либо его частей.

#### **1. Заводские операции на плаву.**

На данной стадии контролируются операции на плаву, проводимые у достроечной набережной (пирса) или на заводской, полностью защищенной акватории. Спуск на воду, стыковка отдельных частей объекта на плаву и установка крупногабаритных и тяжеловесных конструкций должна производиться в соответствии с технической документацией, разработанной проектантом или заводом-строителем. При рассмотрении документации и освидетельствовании готовности объектов или их частей к заводским операциям на плаву в первую очередь контролируется обеспечение плавучести и остойчивости. Операции подготовки к транспортировке (буксировке) и погрузки на транспортное средство должны выполняться в соответствии с проектом, одобренным Регистром или другим Классификационным Обществом. Гидрометеоусловия в период проведения операций должны соответствовать принятым в проекте.

## 2. Морские операции.

На данной стадии контролируются операции на плаву, совершаемые в полузащищенной акватории или открытом море. Транспортировка (буксировка) объекта или его частей должна производиться в соответствии с проектом морской операции, одобренным Регистром.

Геологические изыскания на месте установки, подготовка основания, посадка на грунт, установка систем удержания, забивка свай и цементировка (или иной способ закрепления) оголовков, отсыпка бермы и другие подобные общестроительные работы должны производиться в соответствии с Проектом организации строительства (ПОС) и Планом производства работ (ППР).

При наблюдении за сборочно-монтажными работами на точке установки контролируется соблюдение требований безопасности, при этом особое внимание обращается на следующее:

- проведение дополнительного инструктажа персонала по технике безопасности;

- организация связи между всеми участниками работ в месте установки и с береговыми подразделениями;

- организация мероприятий по борьбе с чрезвычайными ситуациями;

- организация работы плавсредств в месте установки;

- планирование работ в соответствии с прогнозом гидрометеословий.

## **Освидетельствование готовности объектов к началу пуско-наладочных работ**

Освидетельствование производится для оценки и подтверждения готовности оборудования, систем и объектов обустройства месторождения в целом к началу пуско-наладочных работ и заводских испытаний. При этом проверяется:

- наличие паспортов и сертификатов на оборудование и материалы;

- наличие оформленных приемочных удостоверений на монтаж и испытания систем и оборудования;

- устранение ранее выявленных несоответствий;

- готовность систем ТОС, наличие обученного персонала, соб-

людение правил взрыво-пожаробезопасности и охраны труда;  
наличие одобренной программы испытаний и утвержденного графика испытаний.

### **Освидетельствование пуско-наладки и передачи объектов**

Освидетельствование пуско-наладки и заводских испытаний должно выполняться в соответствии с одобренной программой и утвержденным графиком. Представитель ИО в первую очередь контролирует пуско-наладку и заводские испытания систем и оборудования, влияющих на безопасность. Заказчик включает представителей ИО в состав рабочих комиссий и приемочной комиссии.

### **Проверка документации**

В процессе и по окончании строительства проверяется исполнительная документация (журналы стройплощадки и авторского надзора, акты приемки скрытых работ и промежуточной приемки ответственных конструкций, комплект рабочих чертежей с надписями о соответствии выполненных в натуре работ этим чертежам и т. п.).

### **Оформление документов**

Документы, выдаваемые ИО формализованы. Выдача документов осуществляется, как правило, при завершении Генеральным Подрядчиком по строительству определенных этапов работ.

В качестве примера предоставления услуг Регистром, как ИО, предоставляющим услуги «третьей стороны», можно рассмотреть участие Регистра в проекте обустройства месторождения им. Ю. Корчагина.

*Справка:*

*Месторождение, носящее имя бывшего председателя совета директоров ОАО «НК ЛУКОЙЛ» Юрия Корчагина, расположено в российском секторе северной части Каспийского моря на струк-*

туре Широтная, в 180 км от Астрахани и 240 км от Махачкалы; глубина моря составляет 11–13 м (рис. 4). Месторождение было открыто в 2000 году. Владелец лицензии на разработку месторождения – ООО «ЛУКОЙЛ–Нижневолжскнефть».

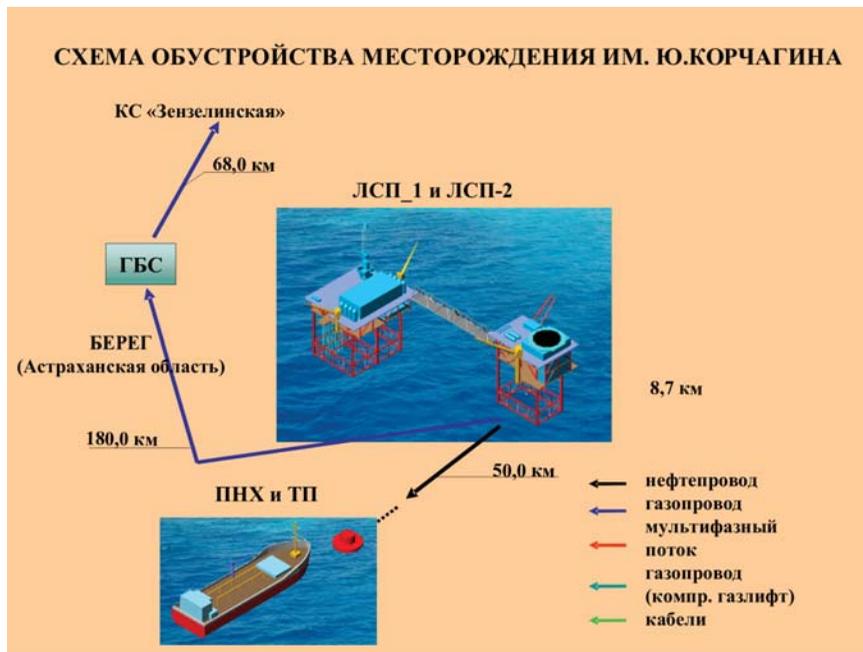


Рис. 4

Накопленная добыча нефти за 38 лет разработки месторождения составит 28229000 т и нефтяного газа – 30004 млн. м<sup>3</sup>.

Район строительства относится к зоне континентального климата, характеризующейся низкой влажностью воздуха, малым количеством осадков и большой амплитудой перепада температур воздуха.

Акватория подвержена неперiodическим ветровым сгонно-нагонным и сезонным колебаниям уровня моря.

*Абсолютная минимальная температура воздуха – минус 28 °С;*

*абсолютная максимальная температура воздуха – плюс 35 °С;*

*средняя максимальная температура наиболее жаркого месяца – плюс 25,1 °С;*

*средняя минимальная температура наиболее холодной пятидневки – минус 18 °С .*

*Проектируемые для обустройства месторождения им. Ю. Корчагина объекты и размещаемые на них технические средства должны обеспечить одновременное бурение и эксплуатацию скважин, сбор продукции скважин и ее разделение на нефть, газ и пластовую воду. Нефть, подготовленная до товарной кондиции, должна транспортироваться по подводным трубопроводам на плавучее нефтехранилище (ПНХ), газ, также по подводным трубопроводам, – на головные береговые сооружения (ГБС), пластовая вода – утилизироваться в поглощающие скважины. Также предусмотрен прием по подводному газопроводу газа с месторождения «Хвалынское», пластовой продукции с блок-кондуктора и транспорт по подводному газопроводу газа на газлифт блок-кондуктора.*

*В состав объектов обустройства месторождения входят:*

*ледостойкая стационарная платформа с буровым и технологическим комплексами (ЛСП-1);*

*ледостойкая стационарная платформа с жилым комплексом (ЛСП-2);*

*переходной мост между ЛСП-1 и ЛСП-2;*

*подводные трубопроводы;*

*точечный причал (ТП);*

*плавучее нефтехранилище (ПНХ).*

Участие в данном проекте признанного классификационного общества – Регистра, предоставляющего услуги «третьей стороны» в качестве ИО, обусловлено необходимостью страхования данного проекта с привлечением страховой компании «Капитал Страхование» и группы зарубежных перестраховочных компаний.

На первом этапе проекта Регистром, как ИО, были осуществлены обоснование инвестиций и экспертиза технического задания на

проектирование с выдачей соответствующих заключений и рекомендаций.

На втором этапе, на основании заключенного договора между ООО «ЛУКОЙК-Нижневожскнефть» и Регистром, силами подразделений ГУР были предоставлены услуги по контролю качества и верификация на стадии разработки технико-экономического обоснования (ТЭО) первой очереди обустройства месторождения им. Ю. Корчагина. Результаты верификации ТЭО (проекта), в соответствии с EN ISO/ IEC 17020:2004, нашли свое отражение в Техническом отчете и Свидетельстве о соответствии проекта, выданном Регистром, как ИО.

К последующим этапам программы реализации проекта подключился Астраханский филиал Регистра, предоставивший, как ИО, услуги по контролю качества при выполнении работ первого этапа реконструкции ЛСП-1, включающего наблюдение за изготовлением и монтажом ледовой защиты, изготовлением направляющих кронштейнов для свай, дополнительных подкреплений кронштейнов, металлоконструкций второго дна в понтонах на базовом полупогружном несущем корпусе (БПНК) «Шельф-7» (ЛСП-1) на соответствие техническим условиям. В ходе предоставления услуг Астраханским филиалом Регистра оформлялись отчетные документы, предварительно согласованные с ГУР, в виде ежемесячных технических отчетов. По окончании первого этапа реконструкции подготовлены и направлены в адрес Заказчика Итоговый технический отчет и Свидетельство о соответствии объекта.

В настоящий момент Регистр в качестве ИО силами ГУР, Астраханского и Калининградского филиалов продолжает участие в проекте на следующих объектах: ЛСП-2 и точечный причал.

С учетом накопленного опыта ГУР разработана и проходит согласование «Инструкция по оказанию услуг «третьей стороны» при строительстве объектов обустройства нефтегазовых месторождений на шельфе».

### *Список литературы*

1. Общие требования к деятельности различных типов органов, осуществляющих инспекционный контроль. Стандарт EN ISO/IEC 17020:2004.

2. Правила технического наблюдения за постройкой судов и изготовлением материалов и изделий для судов. – СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2004.

# **Судовые механические установки, валопроводы и двигатели**

---

УДК 531.789.1:531.781:629.5.035.8

*А.А. Попов*

## **ОПЫТ ТОРСИОГРАФИРОВАНИЯ СУДОВЫХ ВАЛОПРОВОДОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ СОВРЕМЕННЫХ СРЕДСТВ И МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЙ**

Достоверность данных, полученных в результате проведения экспериментального исследования крутильных колебаний валопровода, во многом зависит от применяемого измерительного оборудования и способов обработки результатов измерений.

В настоящее время, в мировой практике для измерения крутильных колебаний широко используются специализированные конвертеры (демодуляторы «частота-напряжение») с оптическими или электромагнитными датчиками (рис. 1).

Как известно, крутильные колебания вала, возникающие при его вращении, проявляются в виде неравномерности угловой скорости вращения. Эту неравномерность можно определить путем измерения мгновенной угловой скорости вращения вала. При измерении мгновенной угловой скорости широко применяется метод отсчета времени между импульсами. Обычно, для получения импульсов от вращающегося вала, используется бесконтактный электромагнитный датчик (датчик тахометра) и зубчатое колесо, прикрепленное к валу. В момент прохождения зубьев колеса возле датчика в нем генерируются электрические импульсы, которые являются отметчиками для вычисления мгновенной угловой скорости вращения вала.

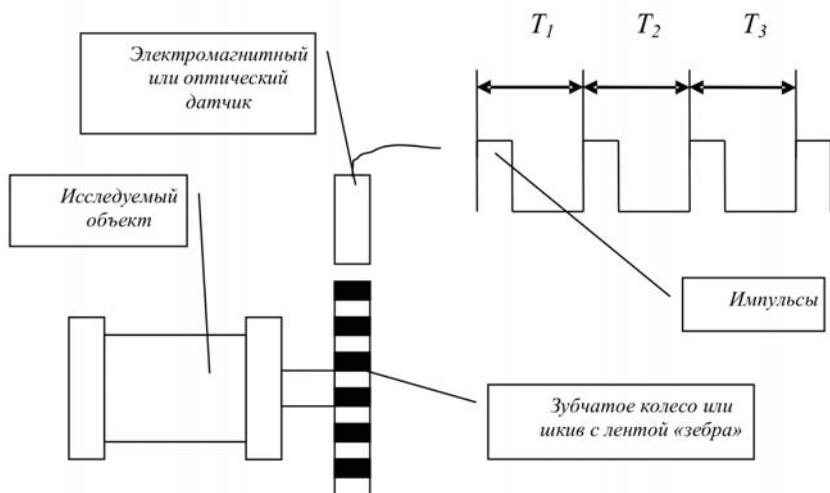


Рис. 1  
Принцип измерения крутильных колебаний

При отсутствии крутильных колебаний вала (равномерное вращение) время  $T_1 = T_2 = T_3$ . В случае проявления крутильных колебаний вала время  $T_1 \neq T_2 \neq T_3$ . Таким образом, при наличии крутильных колебаний вала время следования импульсов будет непостоянным, оно будет изменяться с частотой крутильных колебаний, т. е. выходящий поток импульсов с датчика будет модулирован по частоте.

Для выделения сигнала модуляции (крутильных колебаний) используется преобразователь (конвертер) «частота-напряжение». Переменная составляющая сигнала на выходе конвертера будет соответствовать переменной угловой скорости вращения вала. Далее, сигнал поступает на электронный интегратор, который встроен в конвертер. Таким образом, значение измеренной мгновенной угловой скорости преобразуется в угловое смещение.

Применение индуктивных или фотоэлектрических датчиков позволяет выполнять измерения бесконтактным способом, что значительно упрощает процедуру измерений.

На основе этого же принципа работает и измерительный комплекс (см. рис. 2), который используется в организации ООО «Тест Инжиниринг» для измерения крутильных колебаний судовых валопроводов с 2002 года.

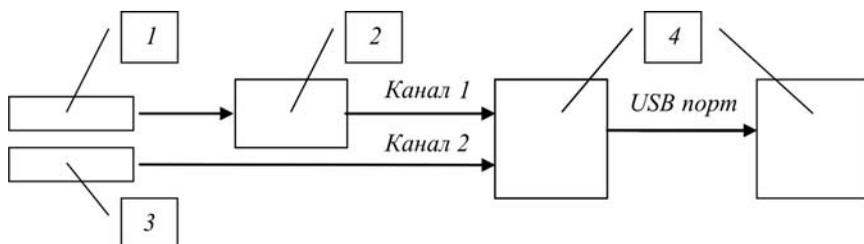


Рис. 2

Общая блок-схема измерительного комплекса:

- 1 – измерительные датчики; 2 – преобразователь сигнала;  
3 – отметчик оборотов; 4 – устройство регистрации и записи сигнала

В состав измерительного комплекса входят:

1. измерительные датчики –  
электромагнитный датчик 5N9292, изготовитель – CATERPIL-  
LAR (США);  
оптический энкодер H20DB-254-SS-100-A, изготовитель – BEI  
(США);  
лазерный тахометр LT-850, изготовитель – Terahertz Technolo-  
gies Inc. (США);
2. преобразователь сигнала –  
конвертер крутильных колебаний 4C9022, изготовитель – CAT-  
ERPILLAR (США);
3. отметчик оборотов –  
фотоэлектрический датчик 4C6918, изготовитель – CATERPIL-  
LAR (США);
4. устройство регистрации и записи сигнала –  
аналого-цифровой преобразователь HandyScope4, TIE PIE  
(Нидерланды);  
персональный компьютер.

Конвертер 4С9022 выпускается фирмой CATERPILLAR (США). В комплекте с конвертером поставляется электромагнитный датчик 5N9292 для измерения крутильных колебаний и фотоэлектрический датчик 4С-6918 для получения отметки оборотов.

Однако, применение электромагнитного датчика для измерения крутильных колебаний возможно только при наличии доступа к шестерне, которая установлена на коленчатом вале либо на маховике двигателя. Поэтому, для выполнения измерений с торца коленчатого вала двигателей требуется специальный датчик – оптический энкодер, который вырабатывает 100 импульсов за 1 оборот вала. Этот датчик жестко соединяется с коленчатым валом двигателя при помощи валика и муфты.

Оптический энкодер состоит из пяти компонентов: источника света, пошагового диска, маски, фотодетекторной сборки, и сигнального процессора. Диск, энкодера подразделен на точно позиционированные слоты или отметки. Количество слотов или отметок определяет количество импульсов за один поворот.

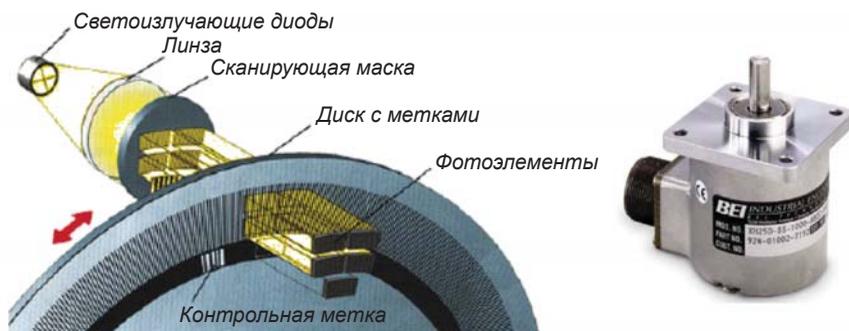


Рис. 3  
Устройство и внешний вид оптического энкодера

В связи с тем, что на некоторых силовых установках отсутствует возможность подсоединения энкодера к носовому торцу коленчатого вала двигателя из-за наличия носового устройства отбора мощности (гидронасос, валогенератор и т. д.), а также для выпол-

нения измерений крутильных колебаний на валопроводе силовой установки возникла необходимость в применении бесконтактного оптического метода. При подборе датчика основное внимание было уделено его рабочему частотному диапазону.

После проведения интенсивного анализа Интернет-ресурсов был выбран лазерный тахометр LT-850 (рис. 4), который изготавливается фирмой Terahertz Technologies Inc. (США). Частотный диапазон этого тахометра составляет от 2 Гц до 40 кГц. Оптиково-волоконный кабель длиной 5 м позволяет установить датчик и измерительную аппаратуру на значительном расстоянии друг от друга.



Рис. 4  
Лазерный тахометр

Регистрация и запись сигнала от конвертера крутильных колебаний осуществляется при помощи 4-х канального аналого-цифрового преобразователя (АЦП) HandyScope 4, который подключается к компьютеру через высокоскоростной USB порт. Поставляемая вместе с АЦП HandyScope 4 программа позволяет превратить компьютер в записывающий осциллограф, вольтметр, частотомер и анализатор спектра. Это позволяет одновременно отслеживать запись сигнала во временной области, выполнять его спектраль-

ный анализ и контролировать частоту вращения вала для сверки штатного тахометра двигателя (рис. 5).

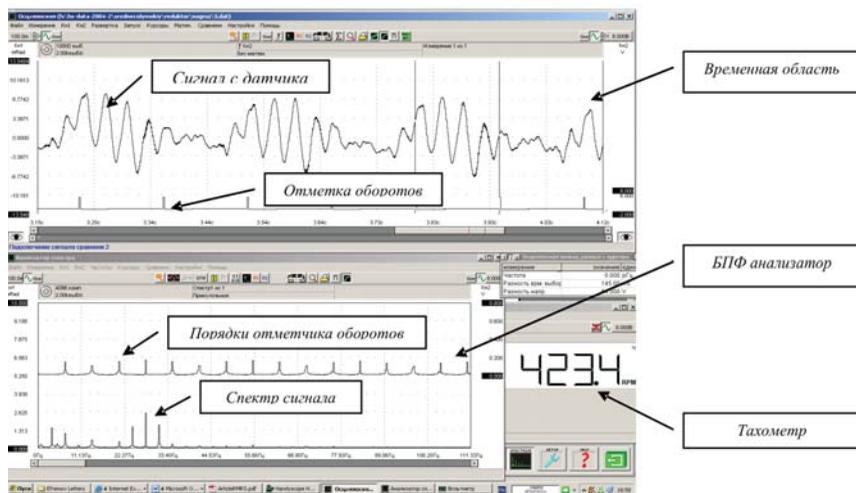


Рис. 5  
Вид экрана компьютера в процессе выполнения измерений

Программа позволяет выполнять непрерывную запись сигнала в файл для дальнейшего просмотра и анализа, а также использования в отчетной документации. Записываемые файлы сохраняются в бинарном формате и занимают небольшой объем жесткого диска компьютера. Вместе с тем, в программе HandyScore предусмотрена возможность экспорта данных из бинарных файлов в текстовый файл в формате ASCII или CSV. Такая возможность позволяет использовать данные измерений в различных программах, которые предназначены для последующей цифровой обработки и анализа сигнала.

С данным измерительным комплексом были выполнены измерения крутильных колебаний более чем на 100 двигателях различных моделей. При проведении торсиографирования применялись все имеющиеся типы датчиков, т. е. оптический энкодер, электромагнитный датчик и лазерный датчик.

### Измерение с применением оптического энкодера.

Основная часть измерений выполнялась при помощи оптического энкодера, т. е. с носового торца коленчатого вала (рис. 6).



Рис. 6  
Установка энкодера на двигателе

Энкодер соединяется с коленчатым валом через валик и соединительную муфту (жесткую на скручивание). Наличие муфты позволяет жестко закрепить энкодер на корпусе двигателя и устранить воздействие вибрации, возникающей в результате некоторой расцентровки с осью коленчатого вала. Кроме того, энкодер вырабатывает один прямоугольный импульс за один оборот вала, который является отметчиком оборотов.

Запись сигнала, выполненная при использовании энкодера, получается практически без каких-либо искажений (рис. 7).

На ее качество оказывает влияние только точность центровки энкодера с осью коленчатого вала и техническое состояние двигателя (в первую очередь регулировка топливной аппаратуры).

### Измерение с применением электромагнитного датчика и зубчатого колеса.

Наличие шестерни валоповоротного устройства на маховиках двигателей типа NVD48 (Германия), которые используются в качестве главных на различных типах судов, позволило отказаться

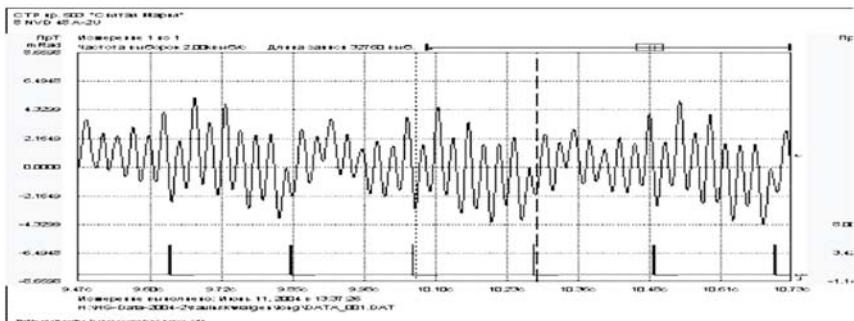


Рис. 7

Пример торсионграммы при использовании энкодера (на судне СТР пр. 503)

от выполнения измерений с торца коленчатого вала. В результате этого удалось значительно сократить время и трудоемкость при подготовке судна к испытаниям. На рис. 8 показано расположение измерительного (электромагнитного) датчика и отметчика оборотов (фотоэлектрический датчик) при выполнении измерений на двигателе 8 NVD 48A-2U.

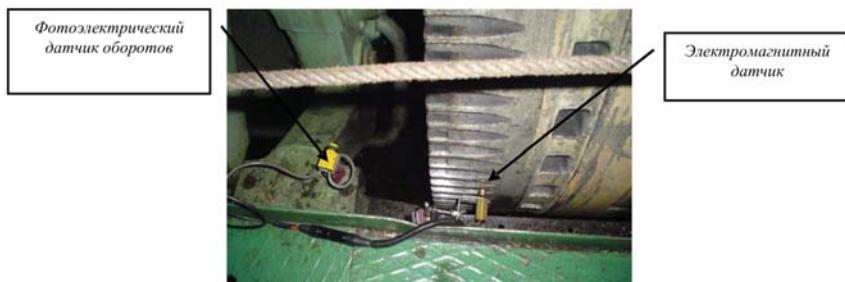


Рис. 8

Установка электромагнитного датчика для выполнения измерений на двигателе 8NVD 48A-2U

Запись, выполненная при использовании электромагнитного датчика, также, как и с применением оптического энкодера, получается практически без искажений (рис. 9).

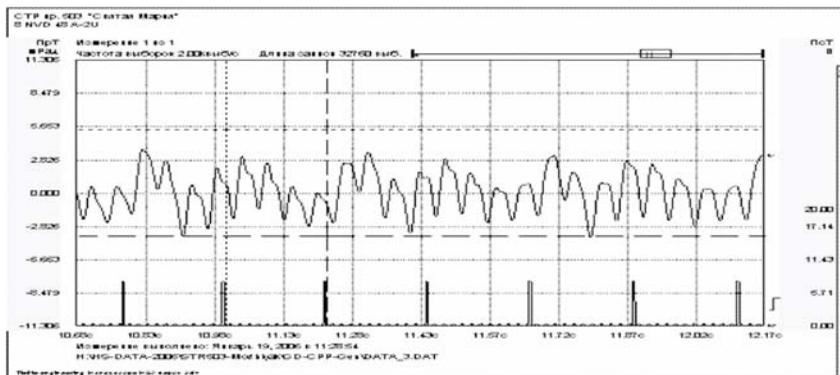


Рис. 9

Пример торсионграммы при использовании электромагнитного датчика (на судне СТР пр. 503)

В связи с тем, что измерение осуществляется бесконтактным способом, удается избежать искажений вызываемых расцентровкой жестко прикрепленного датчика (например, оптического энкодера) с осью коленвала двигателя.

Основными источниками искажений записываемых торсионграмм при использовании электромагнитного датчика являются:

вибрация датчика;

поломанные или сильно изношенные зубья измерительного колеса.

В случае проявления вибрации датчика относительно измерительного колеса, характер искажений будет проявляться в увеличенной амплитуде постоянной составляющей отдельных частот регистрируемого сигнала, которые оказывают наибольшие возмущающие усилия на место крепления датчика. При правильном выборе места крепления датчика удастся полностью устранить подобные искажения торсионграммы.

При наличии поломанных зубьев колеса на торсионграмме будут появляться периодические одиночные всплески амплитуды.

Измерение с применением лазерного датчика и ленты типа «зебра».

Эксперименты, которые были предварительно проведены на испытательном стенде, показали, что данный лазерный тахометр

может быть использован в качестве датчика при измерении крутильных колебаний. Так, используя шкив с лентой имеющей черные полосы шириной 1 мм через 1 мм, возможно получение непрерывного сигнала при плавном изменении частоты вращения от 30 об/мин до 1100 об/мин (больше не позволял электродвигатель стенда) с расстояния до 90 – 100 мм.

Выполненные на судне испытания с использованием лазерного датчика подтвердили его пригодность для измерения крутильных колебаний валопроводов. С помощью лазерного датчика и ленты «зебра» были выполнены измерения на ряде судов, где отсутствовала возможность применения оптического энкодера или электромагнитного датчика (рис. 10).



а



б

Рис. 10

Примеры установки лазерного датчика:

а) на валопроводе за редуктором;

б) перед носовым устройством отбора мощности

На рис. 11 показан фрагмент торсиограммы, записанной при выполнении измерений на двигателе Cummins KTA19 с помощью лазерного датчика. Для получения сигнала использовалась лента «зебра» наклеенная на шкив диаметром 215 мм, прикрепленный непосредственно к демпферу крутильных колебаний двигателя.

Практика показала, что при торсиографировании двигателей небольших размеров, демпферы которых установлены снаружи (двигатели фирм Caterpillar, Cummins, MAN и др.), в качестве шки-



Рис. 11

Пример торсиограммы при использовании лазерного датчика

ва для наклеивания ленты удобно использовать наружную поверхность самого демпфера.

Основными источниками искажений записываемых торсиограмм при использовании лазерного датчика являются:

- вибрация датчика;
- погрешности, возникшие при изготовлении ленты «зебра»;
- погрешности, возникшие при монтаже ленты «зебра» на вал или шкив.

Проявление искажений, вызванных вибрацией датчика аналогично тем, которые могут возникнуть при использовании электромагнитного датчика.

Погрешности, которые могут возникнуть при изготовлении ленты «зебра», характеризуются неравномерностью расстояния между полосами или отклонениями в ширине полос. Причиной их возникновения является оборудование, на котором они изготовлены. На торсиограммах эти погрешности обычно проявляются в возникновении гармонических составляющих различных порядков. В связи с этим возникает необходимость проверки качества изготовления ленты. Одним из средств проверки лент, которые изготовлены самостоятельно, может служить спектроанализатор и стенд, который обеспечивает максимально возможное равномерное вращение ротора.

Искажения торсиограмм, которые вызваны некачественным монтажом ленты на вал или шкив, обычно проявляются в виде синусоиды 1-го порядка либо появления одиночного всплеска амплитуды сигнала за один оборот вала. Возникновение синусоидального искажения торсиограммы вызвано отклонением перпендикулярности расположения ленты относительно оси вращения вала. Возникновение одиночного всплеска амплитуды сигнала за один оборот вызвано неточностью при стыковке начальной и конечной полос наклеиваемой ленты.

#### Применение программ обработки и анализа результатов измерений.

Запись данных в цифровом виде на компьютер позволяет существенно ускорить их обработку и анализ за счет применения специальных программ. Имеющиеся на сегодняшний день программные средства цифровой обработки данных позволяют выполнить их фильтрацию от различных искажений и помех, которые могут возникнуть в процессе выполнения измерений, произвести спектральный анализ, выполнять различные математические действия с несколькими сигналами и многое другое.

При использовании таких программ в практике торсиографирования к наиболее важным их функциям обработки сигнала можно отнести возможность фильтрации, спектрального анализа и гармонического (порядкового) анализа.

Однако, большинство программных средств обработки сигналов разрабатывается для универсального применения в самых различных областях техники и содержит множество функций, которые не используются в практике измерения крутильных колебаний. Универсальность подобных программ делает их довольно объемными и дорогостоящими.

В связи с этим, для анализа данных, автором статьи была разработана программа на языке программирования Visual Basic for Application (VBA), которая встроена в MS Excel. Примененный в программе алгоритм совместной обработки сигналов с датчика отметки оборотов и измерительного датчика позволяет автоматически обрабатывать данные с целью получения графиков гармонического анализа. Применение программы позволило значительно сократить время обработки и процедуру анализа результатов торсиографирования.

Особенно полезным оказалось применение этой программы для анализа торсиограмм, которые были получены при выполнении измерений с помощью электромагнитного датчика и зубьев шестерни валоповоротного устройства на маховике двигателей NVD 48 (SKL). Примеры торсиограмм, показанные на рис. 7 (запись с носового торца коленвала) и рис. 9 (запись со стороны маховика) существенно отличаются друг от друга по внешнему виду, хотя отображают один и тот же процесс перехода через резонанс в районе 280 об/мин («моторная» форма колебаний на судах типа СТР пр. 503). Если на рис. 7 отчетливо выделяется 8-й порядок колебаний, то на рис. 9 этот порядок практически не виден из-за сильной амплитуды 4-го порядка. Присутствие этих колебаний на торсиограмме обусловлено неравномерностью вращения всей системы, т. е. наличием «жестких» колебаний [1], а колебания 8-го порядка имеют очень маленькую амплитуду из-за близко расположенного узла колебаний.

Если торсиограмму, которая записана с носового торца коленвала, можно достаточно точно обработать без применения программных средств, то для обработки торсиограммы записанной с зубьев маховика, необходимо использовать специальные программы, позволяющие выполнять порядковый анализ сигнала. Результаты применения подобной программы показаны на рис. 12 и рис. 13.

Неоспоримым преимуществом компьютерных программ анализа является то, что их применение позволяет избежать появления ошибок при анализе результатов испытаний.

#### Источники погрешностей измерений.

Опыт применения различных датчиков в составе современного оборудования для измерения крутильных колебаний судовых силовых установок показывает, что соблюдение всех условий, необходимых для выполнения торсиографирования (состояние двигателя, погодные условия, состояние измерительного оборудования и т. д.), гарантирует возможность получения «идеальных» торсиограмм, которые почти полностью совпадают с теоретическими.

Однако, в действительности, нередко торсиограмма имеет искажения в сравнении с «идеальной», т. е. измеренный сигнал с датчика крутильных колебаний содержит составляющие, которые не должны присутствовать в нем. Причиной этого могут служить

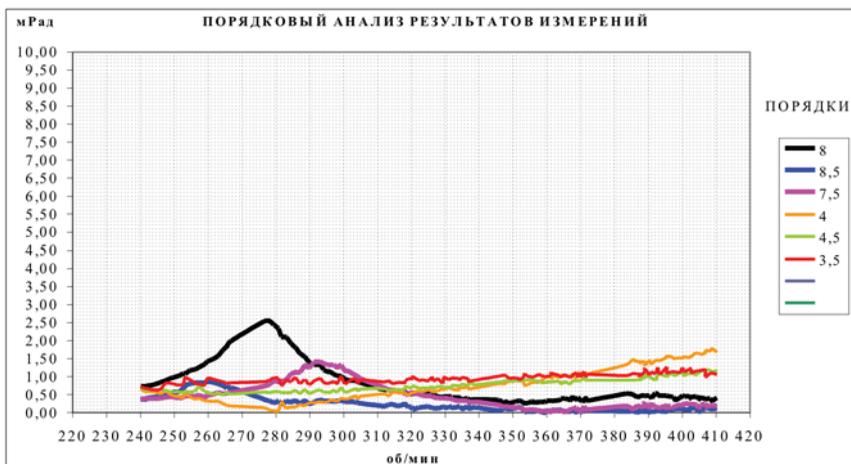


Рис. 12  
Порядковый анализ сигнала, записанного с торца коленвала (СТР пр. 503)

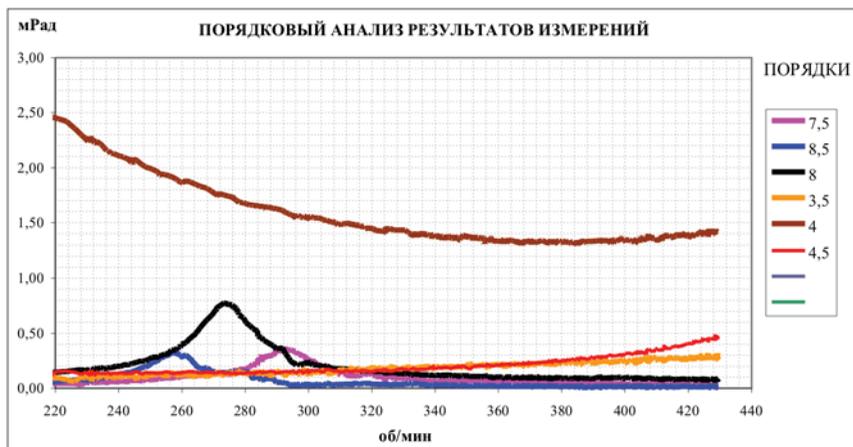


Рис. 13  
Порядковый анализ сигнала, записанного с зубьев шестерни установленной на маховике двигателя (СТР пр. 503)

различные источники колебаний, которые вызывают искажение сигнала. Условно, все эти источники колебаний можно разделить на три категории.

**К первой категории** следует отнести источники колебаний, вызванные техническим состоянием двигателя. Так, например, неудовлетворительная работа топливной аппаратуры вызывает у 4-тактных ДВС довольно значительные колебания 0,5-го порядка. Вместе с тем, появление этой составляющей на торсиограмме можно использовать для диагностики качества регулировки распределения нагрузки по цилиндрам двигателя или состояния привода ТНВД. Например, по результатам торсиографирования главного двигателя 8VD 26/20 на судне типа «Атлантик-333» было указано на необходимость проверки состояния шестерни привода ТНВД. Проведенный осмотр шестерни распределительного вала показал неудовлетворительное состояние демпфирующих пружин, установленных на данной шестерне. После устранения данного дефекта, колебания 0,5-го порядка исчезли.

**Ко второй категории** можно отнести источники колебаний, возникающие в результате неправильного монтажа измерительного датчика или измерительного элемента.

При использовании оптического энкодера в качестве измерительного элемента причиной возникновения искаженной торсиограммы является только его неудовлетворительная центровка с осью коленчатого вала двигателя. В результате этого, как правило, в наблюдаемой торсиограмме будет присутствовать гармоническая составляющая 1-го порядка. При хорошей центровке датчика с коленчатым валом эта гармоническая составляющая практически отсутствует, если только она не обусловлена крутильными характеристиками валопровода.

При бесконтактном методе торсиографирования с использованием электромагнитного или лазерного датчиков правильный выбор места их установки в районе расположения измерительного элемента имеет существенное влияние на качество торсиограммы. Опытным путем было установлено, что при креплении датчика непосредственно к блоку двигателя либо к корпусу подшипника валопровода измеряемый сигнал имеет хорошее качество. Хорошие результаты были получены при установке датчика на судовом фундаменте, при условии, что двигатель установлен на нем без амор-

тизаторов. Неправильный выбор места крепления измерительного датчика может привести к тому, что в наблюдаемом спектре сигнала будут присутствовать составляющие, которые не характерны для данного режима работы установки.

Применение бесконтактного метода торсиографирования с использованием лазерного датчика и ленты «зебра» в качестве измерительного элемента требует особой тщательности при наклеивании ленты на выбранный участок валопровода.

В результате совершенствования практики применения оптического метода для измерения крутильных колебаний было установлено, что необходимо тщательно подготовить поверхность, на которую будет наклеиваться лента. На ней не должно быть краски или ржавчины, поскольку это вызовет нарушение равномерности между полосами ленты и соответственно искажение сигнала. Желательно, чтобы подготовленный участок вала первоначально был обернут самоклеящейся лентой на бумажной или тканевой основе, которая является подложкой для измерительной ленты. Затем на подложку наклеивается измерительная лента. Необходимо, чтобы измерительная лента располагалась строго перпендикулярно оси вала. Одним из наиболее важных моментов при наклеивании измерительной ленты на вал является стыковка полос. При недостаточной точной их подгонке в спектре сигнала будет присутствовать составляющая 1-го порядка, амплитуда которой растет с увеличением неточности стыковки.

**К третьей категории** относятся источники колебаний, которые генерируются «измерительным» элементом.

Источники колебаний этой категории не проявляются при использовании оптических энкодеров, которые являются прецизионными приборами и проходят соответствующую поверку на заводах-изготовителях.

В меньшей степени колебания этой категории возникают при использовании электромагнитных датчиков, поскольку «измерительным» (или чувствительным) элементом в данном случае является шестерня. При изготовлении шестерен, как правило, используются станки, которые обеспечивают достаточно высокую точность при нарезке зубьев. Однако, перед установкой измерительного датчика необходимо внимательно осмотреть шестерню на отсутствие поломанных или сильно изношенных зубьев, т. к. это является ис-

точником искажения измеряемого сигнала. Обычно, поломка или значительный износ зубьев шестерни наблюдаются не по всей длине зуба, а только с одной стороны. В связи с этим, практически всегда удается выбрать участок, который будет являться источником «качественного» сигнала. Кроме того, уменьшению влияния конструктивной неравномерности расстояния между зубьями шестерни способствует ее диаметр, т. е. с увеличением диаметра шестерни уменьшается чувствительность к различным погрешностям, возникающим при нарезке зубьев.

При выполнении торсиографирования с помощью лазерного датчика, главным источником колебаний, которые искажают сигнал с датчика, является измерительная лента «зебра». В связи с отсутствием стандартного производства таких лент, приходится изготавливать их самостоятельно. Практика показала, что лучше всего изготавливать ленту с применением программы «AUTOCAD» и струйного плоттера с высокой разрешающей способностью, который предназначен для печати конструкторских чертежей. Обычные лазерные или струйные принтеры могут давать существенную погрешность в равномерности распределения полос при распечатке из-за неравномерной подачи листа или перемещения каретки картриджа. Кроме того, ленту необходимо печатать на достаточно плотной бумаге или пленке, чтобы избежать ее растягивания при наклеивании на вал. Как правило, ленты выполненные подобным образом обеспечивают возможность получить качественный сигнал.

Таким образом, применение современных средств и методов измерений позволяет сократить трудоемкость при выполнении торсиографирования судовых валопроводов, а также повысить точность получаемых результатов.

### *Список литературы*

1. Ефремов Л.В. Теория и практика исследований крутильных колебаний силовых установок с применением компьютерных технологий. – СПб.: Наука, 2007. – 276.
2. Ефремов Л.В., Мадорский Е.З., Кудрявцев М.В., Иванов М.Ю. Особенности оптического метода торсиографирования валов судовых энергетических установок // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – Вып. 29. – СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2006.

3. Методика диагностирования и определения остаточного ресурса силиконовых демпферов судовых ДВС // Приложения к Руководству по техническому наблюдению за судами в эксплуатации (Приложение 45). – СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2004.

4. Giancarlo Genta. Vibration of Structures and Machines. 3rd Edition. Springer-Verlag. New York. 1998.

5. T. Feese, C. Hill. Guidelines For Preventing Torsional Vibration Problems In Reciprocating Machinery, Engineering Dynamics Incorporated. Gas Machinery Conference, 2002.

*Л.В. Ефремов, М.В. Кудрявцев, М.Ю. Иванов*

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ТОРСИОГРАММ И СПЕКТРОГРАММ ПРИ РАСЧЕТЕ КРУТИЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ СИЛОВЫХ УСТАНОВОК**

В соответствии с требованиями Российского морского регистра судоходства расчеты крутильных колебаний принято завершать таблицами и графиками фактических и допускаемых амплитуд и напряжений. Аналогичные данные должны быть представлены и в отчетах об экспериментальных исследованиях крутильных колебаний.

Однако современный уровень компьютерных технологий позволяет одновременно производить еще и гармонический (порядковый) или спектральный анализ записи крутильных колебаний, что повышает точность и достоверность исследований. Например, эта процедура обязательна при диагностировании демпферов крутильных колебаний, когда в качестве диагностического параметра используется частота и амплитуда наиболее сильного резонанса моторной формы крутильных колебаний.

Спектрограмма необходима для решения не менее важной задачи о выявлении помех и искажений, которые могут накладываться на основную запись крутильных колебаний. Это имеет особое значение при освоении новых методов измерений и для совершенствования методов расчета крутильных колебаний.

В этой связи особо актуальной становится проблема моделирования теоретических торсиограмм и спектрограмм на заключительной стадии расчета крутильных колебаний с целью их последующего сравнения с экспериментальными результатами. В работе [1] показаны примеры теоретических торсиограмм и спектрограмм, но подробного описания методики их формирования там не дано, что и послужило поводом для написания настоящей статьи.

Эта проблема относится к задачам о векторном анализе и синтезе гармонических колебаний (гармоник), которые одновременно действуют при работе установки на исследуемой частоте враще-

ния вала. При этом каждая  $i$ -ая гармоника  $v_i$ -го порядка имеет свою круговую частоту  $\omega_i$ , амплитуду  $A_i$  и сдвиг по фазе  $\varphi_i$ .

Для построения теоретической торсиограммы можно применить тригонометрический вариант функции (1) векторной суммарной амплитуды  $A_\Sigma(t)$ :

$$A_\Sigma(t) = \sum_{i=1}^n A_i \sin(t\omega_i + \varphi_i). \quad (1)$$

Решение этого, простого на первый взгляд, уравнения в действительности представляет собой весьма сложную проблему, поскольку большинство входящих в уравнение (1) гармоник относятся к нерезонансным крутильным колебаниям и лишь некоторые гармоники могут оказаться резонансными или околорезонансными колебаниями.

Известно [1], что резонансные колебания можно определить на основе уравнений баланса возмущающих и демпфирующих моментов в системе. Однако для расчета колебаний вдали от резонанса общепринятую и хорошо проверенную методику в литературе найти трудно.

Нерезонансные амплитуды колебаний простых систем еще можно оценивать путем достаточно громоздкого расчета частотного уравнения и остаточного момента для заданной частоты без учета демпфирования в системе. Для сложных крутильных схем такой способ представляется не совсем корректным, потому что при значительном отклонении от рассматриваемой резонансной частоты исходная форма колебаний искажается, и мы легко можем попасть в зону развития соседних форм колебаний, что приводит к неверным результатам.

Поэтому практический интерес может представить приведенная в данной статье методика [1], согласно которой расчет суммарных амплитуд при любой частоте вращения (как резонансной, так и нерезонансной) выполняется по формуле (1), параметры которой являются функциями порядков колебаний  $v_i$  и заданной частоты вращения валов  $n$ :

$$\begin{aligned} A_i &= A_v(v_i, n), \\ \omega_i &= \pi n v_i / 30, \\ \varphi_i &= \varphi(v_i). \end{aligned} \quad (2)$$

В основу расчета амплитуды вынужденных колебаний  $A_v(v_p, n)$  положен принцип замены исследуемой крутильной схемы системы, которая находится в состоянии резонанса, некоторой эквивалентной системой с одной степенью свободы. Это значит, что обе системы имеют одинаковые частоты свободных колебаний, а так же одинаковые возмущающие и демпфирующие моменты. На этом принципе построено большинство методик расчета резонансных колебаний, которые, как правило, обеспечивают требуемую достоверность вычислений.

В работе [1] приведена формула (1-6), которая соответствует указанному выше принципу. Она положена в основу приведенной ниже методики, которая после дополнительных исследований, направленных на уточнение формул для предварительного расчета возмущающих моментов от движущей силы и остаточного инерционного момента эквивалентной системы, позволила составить следующий общий алгоритм расчета амплитуд вынужденных колебаний каждого  $v$ -го порядка рассматриваемой формы:

$$A_v(v_p, n) := \frac{K(v, n) A(v)}{\sqrt{\beta(v)^2 [1 - f(v, n)]^2 + f(v, n)^2}}, \quad (3)$$

где  $K(v, n)$  – коэффициент влияния фактической частоты вращения на возмущающий момент  $v$ -го порядка;

$A(v)$  и  $\beta(v)$  – расчетная амплитуда (рад) и коэффициент динамического усиления для резонансных колебаний  $v$ -го порядка;

$f(v, n)$  – функция учета отклонения исследуемой частоты вращения от резонансной, определяемая по программе (4)

$$f(v, n) := \begin{cases} n/nr(v) & \text{if } n/nr(v) \geq 1 \\ nr(v)/n & \text{otherwise} \end{cases}. \quad (4)$$

Наиболее сложным принято считать вопрос об определении величины сдвига  $\varphi(v_i)$ , поскольку его строгое решение связано с необходимостью каждый раз выполнять обратное преобразование Фурье для реальной индикаторной диаграммы дизеля.

Можно рекомендовать два более простых варианта вычисления этой функции. Первый, более точный вариант, заключается

в аппроксимации расчетной зависимости сдвига по фазе гармоник тангенциальной силы конкретного двигателя от порядка колебаний. Программы расчета такой задачи даны в работе [1], а на рис. 1 приведен пример ее решения для индикаторной диаграммы двигателя 8NVD48.

Второй, самый простой вариант, заключается в том, чтобы принять сдвиг по фазе  $\varphi_1 = \text{const} = 0$ , что соответствует арифметической сумме амплитуд гармоник. В этом случае получаем максимальную суммарную амплитуду, что, как правило, приводит к некоторому запасу надежности расчета. Если учесть неизбежное рассеивание параметров крутильных колебаний и тот факт, что в зарубежной практике обычно используется именно этот простой вариант, то его можно рекомендовать к широкому применению без риска снижения достоверности вычислений.

$$\varphi_k = (0,17848 \quad 1,078 \quad -0,21696 \quad 0,01544)$$

$$\psi(v) = \varphi_{k_{0,0}} + \varphi_{k_{0,1}} \cdot v + \varphi_{k_{0,2}} \cdot v^2 + \varphi_{k_{0,3}} \cdot v^3$$

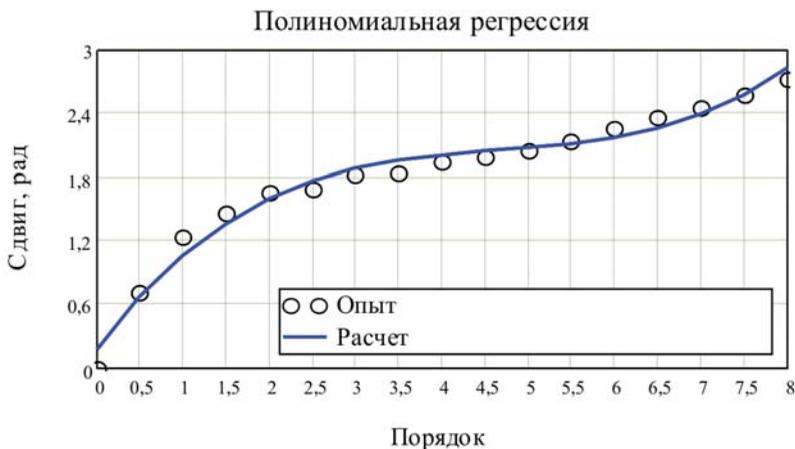


Рис. 1  
Пример зависимости сдвига по фазе гармоник индикаторной диаграммы двигателя от их порядка

Приведенные выше зависимости в своей совокупности образуют методику построения теоретической торсиограммы.

Что касается спектрограммы, то она может быть построена в двух вариантах непосредственно по формуле (3) для всех порядков при рассматриваемой частоте вращения  $n$  (об/мин). Первый вариант заключается в построении зависимости амплитуды  $Av(v, n)$  от порядка колебаний, а второй вариант – от частоты колебаний, Гц:

$$F(v, n) = v n / 60. \quad (5)$$

Для подтверждения эффективности и работоспособности предложенной методики сравним теоретические торсиограммы и спектрограммы, рассчитанные для моторной формы колебаний силовой установки рыболовного траулера проекта 503 с независимыми результатами торсиографирования судна этого же проекта, заимствованные из статьи А.А. Попова, приведенной в настоящем сборнике. Такой выбор связан с тем, что используемые экспериментальные данные получены с носового торца коленчатого вала двигателя 8NVD48 – 2AU (1320 л.с. при 428 об/мин) с применением современной аппаратуры и имеют весьма высокое качество.

Целесообразно рассмотреть два характерных режима работы силовой установки. Первый режим относится к работе вблизи номинальной частоты вращения, где вообще нет резонансов, но развиваются заметные суммарные вынужденные колебания в виде сильных биений. Второй режим относится к резонансным оборотам 8-го порядка моторной формы в районе 280 об/мин.

Экспериментальная торсиограмма и спектрограммы для первого режима работы двигателя показаны на рис. 2, а на рис. 3 приведены их расчетные версии.

Совместное рассмотрение этих материалов позволяет, во-первых, подтвердить высокую достоверность предложенной методики прогнозирования торсиограммы, ввиду очевидного ее согласия с экспериментом.

Во-вторых, приведенные данные позволяют объяснить природу колебаний при номинальной частоте вращения. Очевидно, что суммарные колебания в форме биений образованы близкими по частоте нерезонансными колебаниями моторной формы 4; 4,5 и

3,5-го порядков из-за того, что резонансы этих колебаний находят-ся выше номинальных оборотов. Можно так же заметить слабое проявление 5,5-го и 8-го порядков.

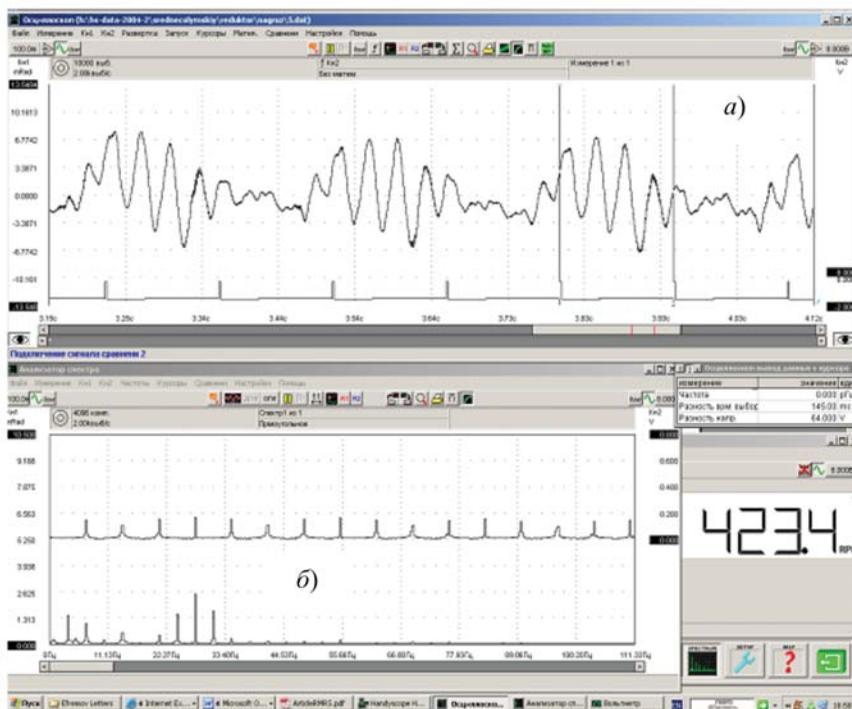


Рис. 2

Экспериментальные торсионграммы (а) и спектрограмма (б), полученные при работе вблизи номинальной частоты вращения

В третьих, наличие расчетных спектрограмм позволяет оценить некоторые неизбежные погрешности измерений. На рис. 2б наряду с «законными» спектральными составляющими 4; 4,5 и 3,5-го порядков, можно заметить очень слабые гармоники 0,5-го и 1-го порядков. Возможные причины таких (незначительных) явлений объясняются в упомянутой статье.

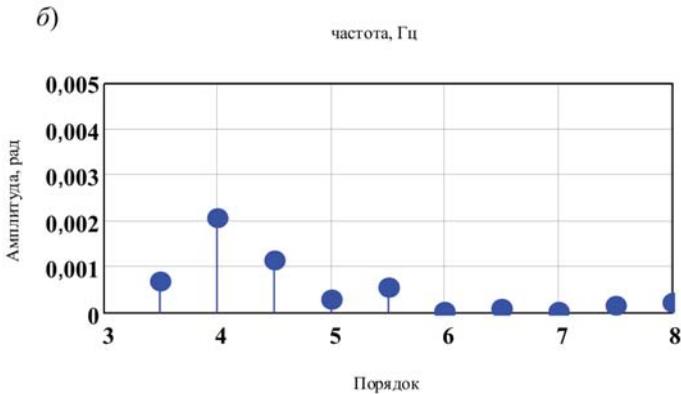
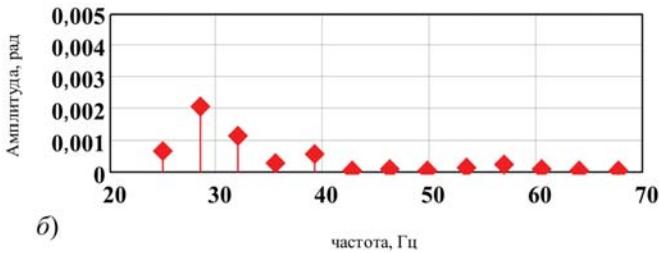
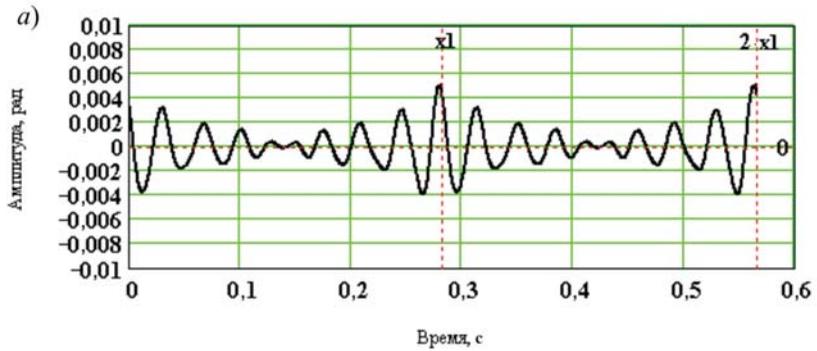


Рис. 3  
Теоретические торсиограмма (а) и спектрограммы (б)  
при работе на номинальной частоте вращения

Хорошо согласуются экспериментальная и теоретическая торсиограммы и при 280 об/мин в зоне резонанса 8-го порядка (см. рис. 4).

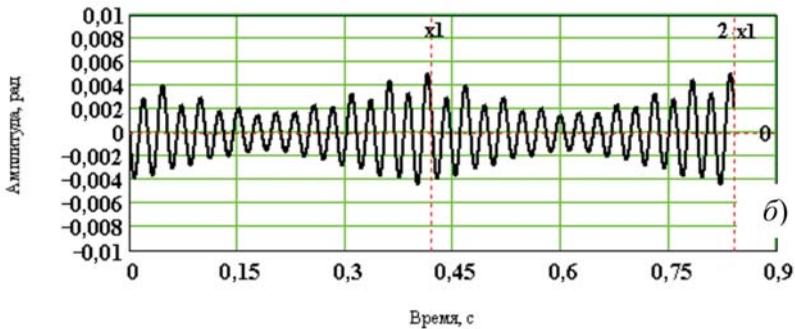
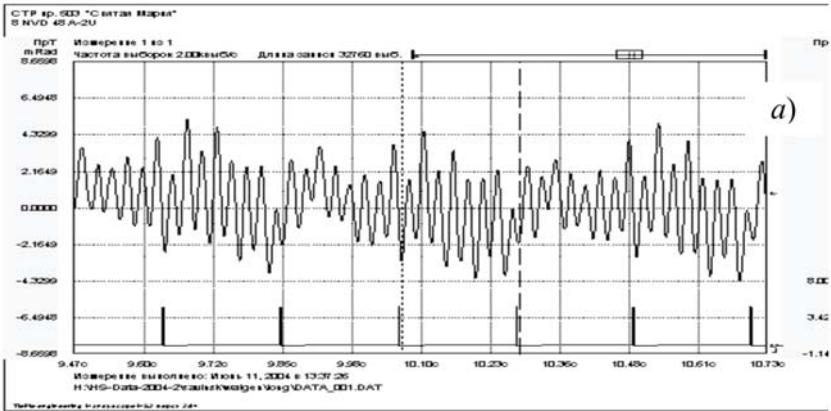


Рис. 4

Экспериментальная (а) и теоретическая (б) торсиограммы на резонансной частоте вращения 8-го порядка

Из этих образцов видно, что в данном случае не наблюдается чистой синусоиды 8-го порядка. Здесь так же имеет место некоторое биение суммарной амплитуды, причины которого следуют из спектрограммы на рис. 5.

В данном случае рядом с основным резонансом 8-го порядка расположены не очень сильные, но ощутимые резонансы 7,5-го и 8,5-го порядков. Их околорезонансные амплитуды складываются с колебаниями 8-го порядка, что и приводит к биению. Кроме того проявляется некоторое влияние уже очень слабых колебаний 4-го порядка.

Тот же результат получен путем гармонического анализа экспериментальной торсиограммы (рис. 4).

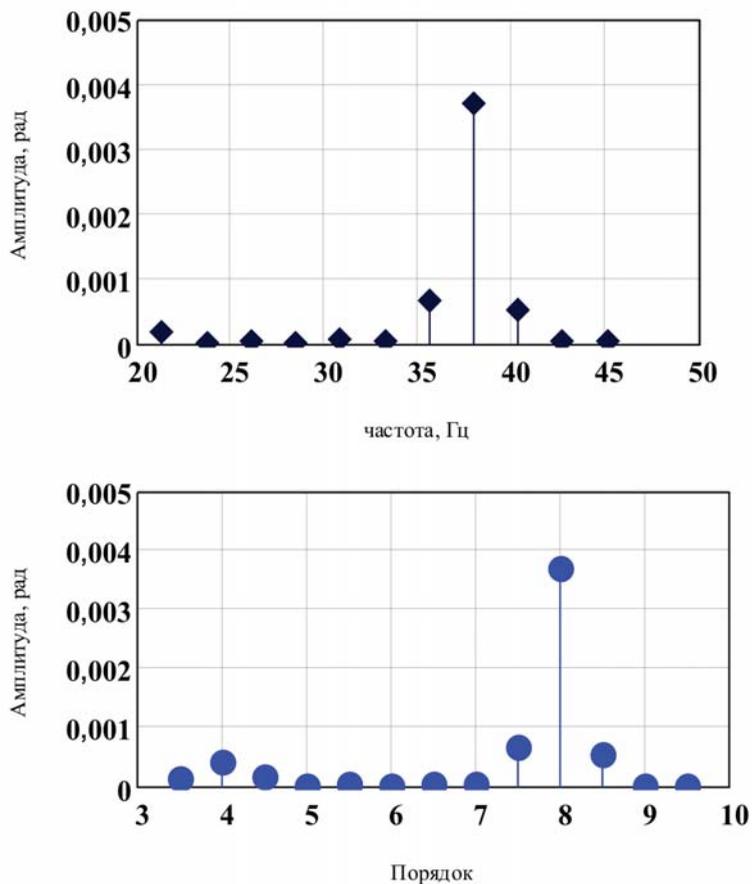


Рис. 5  
Спектрограммы на резонансной частоте вращения 8-го порядка

Материалы этой статьи позволяют уверенно завершать все расчеты крутильных колебаний моделированием торсиограмм и

спектрограмм по изложенной выше методике в рамках общей методологии работы [1].

### *Список литературы*

1. Ефремов Л.В. Теория и практика исследований крутильных колебаний силовых установок с применением компьютерных технологий. – СПб.: Наука, 2007. – 276 с.

*А.Н. Блинков, А.А. Власов, А.В. Лицис, В.К. Шурняк*

## **CNG – НОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ МОРСКОЙ ТРАНСПОРТИРОВКИ ГАЗА: СОСТОЯНИЕ, ПЕРСПЕКТИВЫ, ПРОБЛЕМЫ**

### **1. Преимущества транспортировки газа на судах CNG**

Мировой спрос на природный газ стабильно растет. Одновременно происходит истощение запасов природного газа в традиционных регионах добычи, что предопределяет стабильно высокий спрос на введение в коммерческий оборот новых месторождений. Разведанные запасы природного газа распределены по территории планеты весьма неравномерно. Основная их часть расположена на удалении свыше 500 – 1000 морских миль от основных рынков-импортеров природного газа. До 50 % запасов мирового природного газа приходится на малые и средние месторождения, расположенные на континентальном шельфе и в прибрежной зоне.

Используемые в настоящее время технологии транспортировки природного газа по морским трубопроводам или в сжиженном виде на судах LNG (Liquefied Natural Gas) экономически нерациональны для ввода значительной доли таких месторождений в коммерческий оборот. Это стимулирует поиск экономически эффективных технологий транспортировки природного газа на основные рынки.

Технология морской транспортировки сжатого природного газа на судах-газовозах специальной постройки – судах CNG (Compressed Natural Gas – CNG) – это новая перспективная технология транспорта газа, которая в обозримой перспективе может стать экономически эффективной альтернативой традиционным технологиям транспортировки газа по морским трубопроводам и в сжиженном состоянии на судах-газовозах LNG. Это предопределяет повсеместный интерес к применению новой технологии транспортировки сжатого природного газа на судах CNG со стороны международных энергетических и судоходных компаний.

Особенность новой технологии заключается в том, что природный газ можно загружать на суда CNG непосредственно с месторождения, а разгружать – непосредственно в потребительскую сеть (рис. 1).

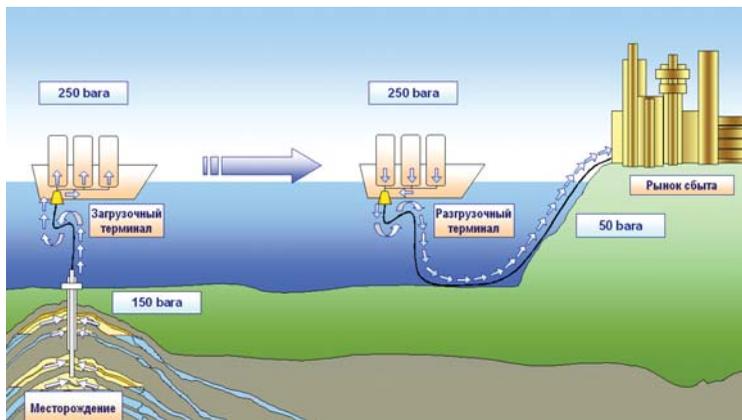


Рис. 1  
Схема применения технологии CNG

Это исключает необходимость значительных капитальных вложений в строительство морских трубопроводов или заводов по сжижению газа для доставки его на рынок на судах LNG. Основной объект капиталовложений в новой технологии – сами суда CNG.

Наиболее привлекательна технология CNG для ввода в коммерческий оборот морских (оффшорных) месторождений природного газа. Одной из предпосылок для реализации проектов транспорта сжатого природного газа непосредственно с шельфовых месторождений на судах CNG является наличие освоенных технологий обустройства морских месторождений на глубинах до 2500 м в различных регионах мира.

Другая предпосылка – широкое применение в мировой практике технологий бесприкальной загрузки углеводородного сырья на суда с оффшорных терминалов. Примером могут быть подводные загрузочные/разгрузочные комплексы типа STL (Submerged Turret

Loading) компании Advanced Production and Loading AS (APL), Норвегия.

Это означает, что действительно новым элементом технологии морской транспортировки сжатого природного газа с морских месторождений являются сами суда CNG.

Международными и национальными организациями, компаниями-разработчиками технологии CNG и судовладельческими компаниями к настоящему времени выполнен большой объем технико-экономических исследований целесообразных областей применения технологии CNG. Результаты этих исследований свидетельствуют об экономической предпочтительности применения технологии CNG для транспортировки природного газа в различных регионах мира по отношению к традиционным технологиям транспорта газа по морским трубопроводам или перевозки его в сжиженном виде на судах LNG при объемах транспортировки до 4–5 млрд. м<sup>3</sup> природного газа в год на дистанциях от 250–300 морских миль до 2500–3000 морских миль (рис. 2).

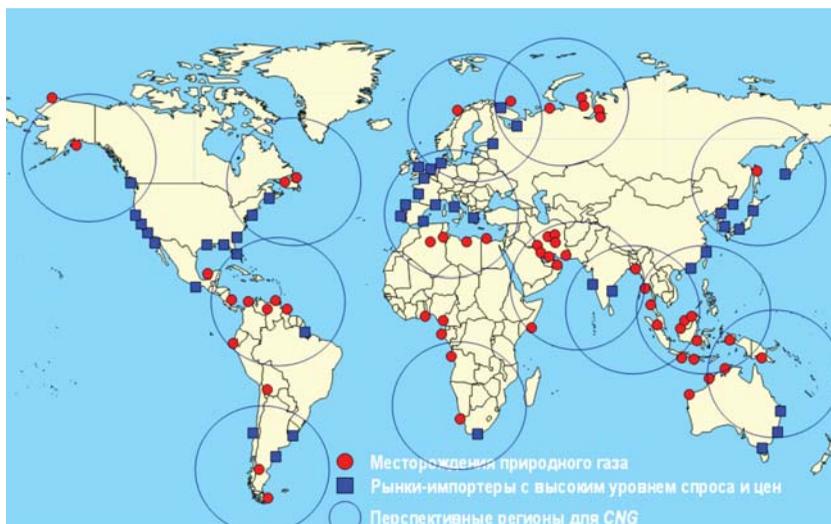


Рис. 2

Возможные регионы экономически эффективного применения технологии морской транспортировки сжатого природного газа на судах CNG

В настоящее время в разных стадиях разработки находится около 20 международных проектов морской транспортировки сжатого природного газа на судах CNG.

При успешном продвижении анонсированных проектов первые коммерческие перевозки природного газа на судах CNG могут начаться в 2010–2011 г.

Анализ динамики роста числа международных проектов применения технологии CNG в различных регионах мира также свидетельствует о росте интереса к новой технологии.

Особенность современного этапа в развитии технологии CNG состоит в переходе компаний, заинтересованных в реализации проектов морской транспортировки сжатого природного газа, от концептуального анализа к детальной конструкторской проработке основных элементов транспортной цепи и формированию международных консорциумов для практической реализации CNG проектов в различных регионах мира.

Свидетельством высокой степени готовности технологии CNG к практической реализации может служить следующий факт: когда в марте 2006 г. крупнейшая энергетическая компания Индии GAIL Ltd объявила о заинтересованности в использовании судов CNG для транспорта природного газа с месторождения в Бирме, сразу восемь международных консорциумов и отдельных компаний заявили о своем намерении участвовать в тендере. В том числе:

Консорциум EnerSea Transport LLC (США), Mitsui и K-Line (Япония) и ряда других компаний;

Консорциум TransCanada (Канада) и ряда других компаний;

Компания Knutsen OAS Shipping AS (Норвегия);

Malaysia International Shipping Corporation (MISC) (Малайзия);

Forbes Bumi Armada Ltd. (Малайзия) совместно с Trans Ocean Gas Inc. и BMT Fleet Technology Ltd. (Канада), Wilhemsen Marine consultants (Норвегия) и ряд других компаний;

Ardeشير B. Cursetjee & Sons Ltd, Mumbai;

Marubeni Corporation (Япония) совместно с Sea NG Management Corporation (Канада);

Exmar Marine NV (Бельгия).

Каждый из потенциальных участников будущего тендера имеет в активе, как минимум, концептуальные проекты судов CNG, полу-

чившие одобрение (Approval in Principal) классификационных обществ DNV, ABS или Lloyds Register.

В 2006 г. компания Sea NG стала первой из числа разработчиков проектов судов CNG, получившей от ABS полное одобрение проекта (Approval for Construction). Судну присвоен класс «A1 CNG Carrier». Это позволяет компании приступить к строительству судов CNG.

Основные особенности концептуальных подходов разработчиков систем морской транспортировки сжатого природного газа к выбору технических решений по элементам системы проиллюстрированы рис. 3.



Рис. 3  
Концепции судов CNG

Разрабатываемые концепции морской транспортировки природного газа на судах CNG различаются подходами к решению задачи выбора оптимального конструктивного типа емкостей для транспортировки сжатого газа и параметров газа при транспортировке (табл. 1).

## Основные параметры разрабатываемых концепций судов LNG

Характеристика	Компания-разработчик (концепция)					
	EnerSea (VOTRANS)	TransCanada (GTM)	Knutson (PNG)	SETech	Trans Ocean Gas (CPFR)	Sea NG (Coselle)
1	2	3	4	5	6	7
Тип емкостей для транспортировки сжатого газа	Цилиндрические сосуды высокого давления	Цилиндрические сосуды высокого давления	Цилиндрические сосуды высокого давления	Цилиндрические сосуды высокого давления	Цилиндрические сосуды высокого давления	Труба, навитая на катушку (карусель)
Схема размещения судов на судне	Вертикально	Горизонтально	Вертикально	Горизонтально	Вертикально	Вертикально в катушках (каруселях)
Материал	Стальные трубы большого диаметра	Стальные трубы большого диаметра с композитным усилением	Стальные трубы большого диаметра	Стальные трубы большого диаметра	Пластиковые трубы с усилением из фибргласса	Стальные трубы
Диаметр, мм	От 914,4 до 1066,8 (36"-42")	1066,8 (42")	1066,8 (42")	1066,8 или 1219,2 (42"-48")	1066,8 (42")	168,3 (6,625")
Длина	24,4 м; 36,6 м	24,4 м;	18,0 м; 38,0 м	220 м	12,0 м	16 км (11 миль)
Давление газа в емкостях, МПа	До 15	20-25	25	25	10-25	25

Характеристика	Компания-разработчик (концепция)					
	EnerSea (VOTRANS)	TransCanada (GTM)	Knutsen (PNG)	CETech	Trans Ocean Gas (CPFR)	Sea NG (Coselle)
1	2	3	4	5	6	7
Температура газа в емкостях, °C	От -20 до -29	нормальная	нормальная	нормальная	От -5 до -40	10
Состояние разработки проекта	Approval in Principal	Approval in Principal	Approval in Principal	Approval in Principal	Approval in Principal	Approval for Construction

Для сопоставительных оценок грузовых емкостей различных типов и выбора наиболее перспективного варианта могут быть применены критерии массового совершенства конструкций, широко используемые в различных областях техники.

## 2. Об эффективности перевозки сжатых газов на судах CNG

Эффективность перевозки любого груза на судах зависит прежде всего от способа его перевозки и обработки в пунктах отправки и назначения. В качестве критерия экономической эффективности чаще всего используют срок окупаемости постройки судна, но для оценки экономической эффективности требуется довольно много данных, которые в условиях рыночных отношений постоянно меняются, например стоимость перевозимого груза, фрахтовые ставки, стоимость металла и постройки судов, величины налогообложения. Все эти показатели меняются не только во времени, но и в зависимости от региона. Кроме того, поскольку в настоящее время нет перевозок сжатых газов, то и нет рынка фрахтовых ставок для этого вида груза, а следовательно корректные оценки экономической эффективности таких перевозок затруднены.

Для неэкономической оценки эффективности перевозки сжатого газа необходимы другие критерии. Предлагаются следующие критерии оценки эффективности перевозки сжатых газов:

отношение массы груза  $M_{\text{газа}}$  в грузовой емкости к массе пустой грузовой емкости  $M_{\text{сосуда}}$  (назовем его  $G$ );

отношение массы груза в грузовой емкости к массе заполненной грузовой емкости (назовем его  $\eta$ );

отношение массы груза, перевозимого на судне (используя конкретный тип емкости) к водоизмещению судна (назовем его  $W$ ).

Далее предлагается исследование критерия  $G$  для цилиндрической емкости со сферическими днищами:

$$G = M_{\text{ГАЗА}} / M_{\text{СОСУДА}} \quad (1)$$

Используя формулу Менделеева-Клаперона для идеального газа  $PV = M / \mu RT$ , получим:

$$M_{\text{ГАЗА}} = PV\mu / RT, \quad (2)$$

где  $V$  – внутренний объем грузовой емкости;  
 $P$  – рабочее давление в грузовой емкости при транспортировке;  
 $T$  – абсолютная температура при транспортировке;  
 $\mu$  – молярная масса перевозимого газа;  
 $R$  – универсальная газовая постоянная,  $R = 8,31441 \cdot 10^3$  Дж/кмоль·град.

Необходимо отметить, что все выше описанные зависимости основаны на уравнении идеального газа. Свойства метана отличаются от идеального газа, что становится заметно при низких температурах и высоких давлениях, так как критическая точка метана 190 °К. Реальное повышение эффективности за счет понижения температуры будет несколько больше, если учесть этот фактор.

Для реального газа необходимо учитывать его сжимаемость в зависимости от температуры и давления, которую можно найти в [1, 2] в виде таблиц. Сжимаемость газа – отношение  $pV$  для метана по отношению к  $pV$  при 0 °С и 760 мм рт. ст. – назовем  $S(p, t)$ . Для удобства пользования табличные данные из [1, 2] были переведены в систему СИ и представлены в виде семейства графиков. График функции сжимаемости метана для различных температур показан на рис. 4. При этом выражение (2) для массы газа в грузовой емкости примет следующий вид:

$$M_{\text{ГАЗА}} = PV\mu / RS(p, t) T_0, \quad (2-1)$$

где  $T_0 = 273$  °К.

Внутренний объем грузовой емкости  $V$  определим как сумму объема цилиндрической части и сферических днищ:

$$V = L \frac{\pi D^2}{4} + \frac{4}{3} \pi \left( \frac{D}{2} \right)^3, \quad (3)$$

где  $L$  – длина цилиндрической части грузовой емкости;  
 $D$  – внутренний диаметр грузовой емкости.

Массу грузовой емкости определим как объем грузовой емкости, умноженный на плотность материала  $\rho$ . При расчете объема

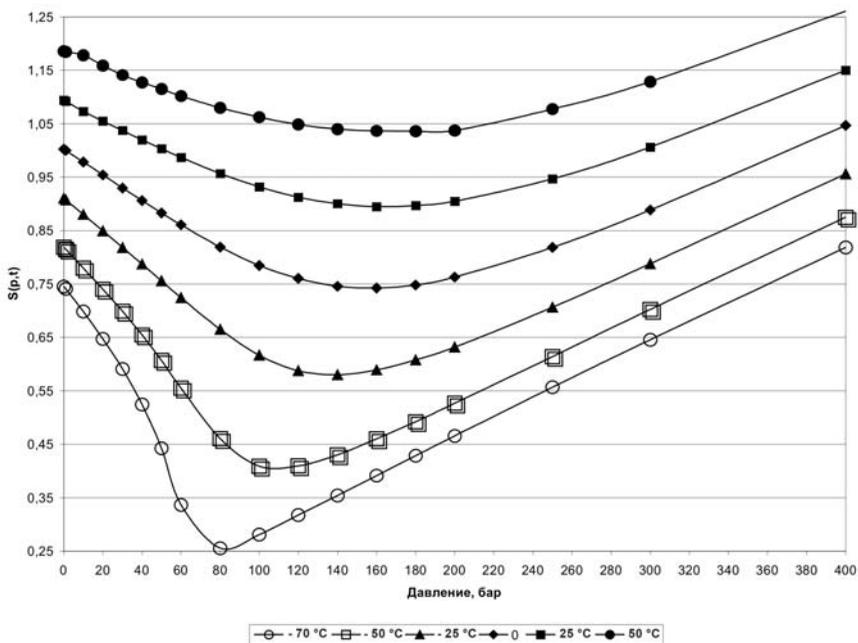


Рис. 4  
 Значение функции сжимаемости метана  $S(p,t)$  – отношение  $pV$  при различных температурах и давлениях по отношению к  $pV$  при 0 °C и 760 мм рт. ст.

грузовой емкости определим его как площадь поверхности, умноженную на толщину стенки  $t$ :

$$M_{\text{сосуда}} = (L\pi D + \pi D^2) t \rho.$$

Необходимую толщину стенки цилиндрической части емкости определим по известной из сопротивления материалов котловой формуле, в основе которой лежит третья теория прочности, используемая в расчетах на прочность Ростехнадзором, Российским морским регистром судоходства и другими классификационными обществами:

$$t = \frac{PD_{cp}}{2[\sigma]\varphi} + c, \quad (4)$$

где  $D_{cp}$  – средний диаметр;  
 $c$  – прибавка на коррозию;  
 $[\sigma]$  – допускаемые напряжения;  
 $\varphi$  – коэффициент прочности.

Средний диаметр  $D_o = D + t = D(1 + t/D) = DA$ , где  $A$  коэффициент, характеризующий тонкостенность сосуда  $A = 1 + t/D$ . Для сосуда под давлением с внутренним диаметром 1 м и толщиной стенки 40 мм  $A = 1,04$ .

Прибавку на коррозию  $c$  можно принять равной нулю с учетом низкой коррозионной активности метана и нанесением на внутреннюю поверхность сосуда антикоррозионного покрытия.

С учетом того, что коэффициент прочности  $\varphi$  можно принять равным единице, так как сварные швы должны выполняться с полным проваром и 100 % рентгенографическим контролем, а любые отверстия должны быть подкреплены, масса сосуда  $M_{\text{сосуда}}$  будет равна:

$$M_{\text{сосуда}} = (L\pi D + \pi D^2) \frac{PDA}{2[\sigma]} \rho. \quad (5)$$

После подстановки (2), (3) и (5) в (1), сокращений и преобразований получаем:

$$G = \frac{M_{\text{газа}}}{M_{\text{сосуда}}} = \frac{\mu}{R} \cdot \frac{[\sigma]}{\rho} \cdot \frac{1}{S(p, t) T_0} \cdot \frac{1}{A} \cdot \frac{0,5L/D + 1/3}{L/D + 1}. \quad (6)$$

Таким образом, критерий эффективности  $G$  может быть представлен как произведение пяти сомножителей, каждый из которых характеризует определенный параметр, влияющий на эффективность перевозки сжатого газа:

$$G = M_{\text{ГАЗА}} / M_{\text{СОСУДА}} = \prod_{i=5}^{i=1} Y_i \quad (7)$$

1.

$$Y_1 = \mu / R. \quad (8)$$

**Параметр  $Y_1$**  характеризует свойства перевозимого груза, влиять на него невозможно. Его можно использовать только для сравнения эффективности перевозки различных газов в сжатом виде. В табл. 1 приводятся показатели  $Y_1$  для различных газов. Из таблицы следует, что в одной и той же емкости перевозить метан в два раза менее эффективно, чем кислород и в 8 раз эффективнее, чем водород.

Таблица 2

Газ	$\mu$ , кг/моль	$Y_1$
Метан	16,03	0,001928
Кислород	32,0	0,003849
Водород	2,016	0,000242
Азот	28,02	0,00337
CO <sub>2</sub>	44	0,005292

2.

$$Y_2 = [\sigma] / \rho. \quad (9)$$

**Параметр  $Y_2$**  характеризует свойства материала, из которого изготовлена грузовая емкость. При этом необходимо помнить, что допускаемые напряжения  $[\sigma]$  представляют собой характеристику прочности материала, разделенную на коэффициент запаса прочности, т. е.  $[\sigma] = \sigma_B / n_B$  или  $[\sigma] = \sigma_T / n_T$  в зависимости от того, что меньше. Таким образом, параметр эффективности  $Y_2$  можно представить в виде произведения двух параметров, один из которых будет характеризовать свойства материала, а другой будет полностью характеризоваться коэффициентом запаса прочности:

$$Y_2 = [\sigma] / \rho = \sigma / \rho \cdot 1 / n = Y_2' \cdot Y_2'' \quad (9-1)$$

где  $\sigma$  – характеристика прочности материала;

$n$  – коэффициент запаса прочности по указанной характеристике.

В качестве характеристики прочности материала, как правило, используется предел прочности (временное сопротивление  $\sigma_b$ ). Предел текучести может найти применение для сталей с низким значением предела текучести (отношением предела текучести к пределу прочности менее 0,6) – высокопластичных малоуглеродистых или аустенитных сталей. Однако маловероятно, что такие материалы могут найти применение для грузовых емкостей судов CNG.

Для повышения эффективности перевозки путем повышения  $Y_2$  требуется применение материалов с высокими прочностными характеристиками при низкой плотности. Наилучшие показатели отношения допустимых напряжений к плотности имеют композитные материалы, за ними следуют алюминиевые и титановые сплавы, затем высокопрочные стали. Показатели удельной прочности  $\sigma_b/\rho$  для материалов труб: *композитный материал – титановый сплав BT1-0 – алюминиевый сплав АМГ – медно-никелевый сплав МНЖ5-1 – Сталь 3* – соотносятся как 10:9:8:3:2. В пользу применения высокопрочных титановых и алюминиевых сплавов и композитных материалов говорит и то, что не требуется производить внутреннее антикоррозионное покрытие, в отличие от углеродистых сталей. Сравнительную оценку экономической эффективности применения указанных материалов произвести сложно, так как цена материалов, так же как и их механические свойства, колеблется в широких пределах. В настоящее время в проектах судов CNG (см. табл. 1) нашли применение грузовые емкости из стали (самый дешевый материал из перечисленных) и из композитных материалов (материал с наибольшей удельной прочностью).

Выигрыш за счет применения материалов с высокой удельной прочностью во многом нивелируется требуемыми коэффициентами запаса прочности, так как для цветных металлов во всех нормативных документах коэффициенты запаса прочности больше. Так, например, в соответствии с международным Кодексом постройки и оборудования судов, перевозящих сжиженные газы наливом (Кодекс IGC) коэффициент запаса прочности для грузовых емкостей, изготовленных из алюминия составляет 4, а для грузовых емкостей, изготовленных из стали – 3.

Вопрос о назначении коэффициентов запаса прочности для грузовых емкостей судов CNG будет подробно рассмотрен ниже в разд. 3, а здесь отметим, что показатели эффективности емкости для перевозки сжатого газа на судах CNG зависит от них прямо пропорционально.

3.

$$Y_3 = 1 / S(\rho, t) T_0. \quad (10)$$

**Параметр  $Y_3$**  характеризует условия перевозки: температуру, при которой производится загрузка и которая поддерживается во время транспортировки – показан на рис. 5 и 6.

На рис. 6 прерывистой линией показаны точки, соответствующие оптимальным значениям критериев эффективности грузовой

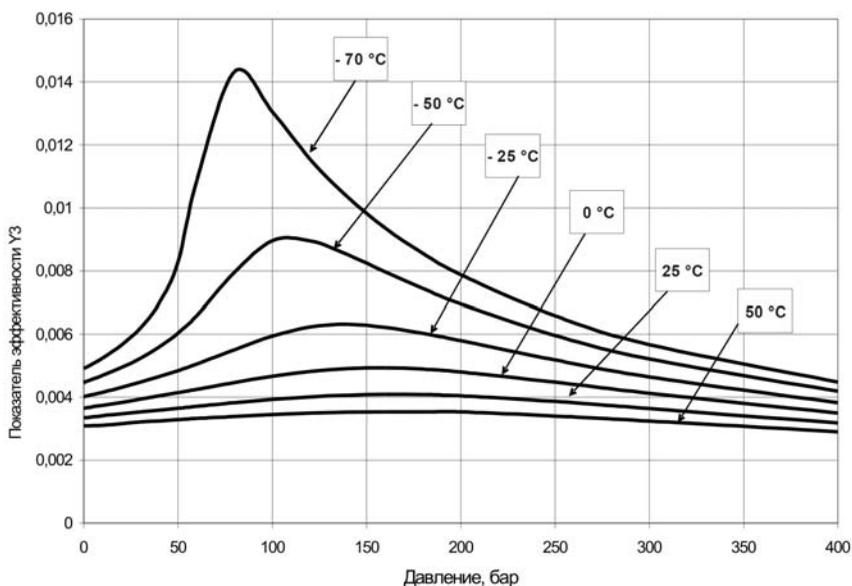


Рис. 5

Показатель эффективности грузовой емкости  $Y_3$  в зависимости от температуры и давления груза во время перевозки метана

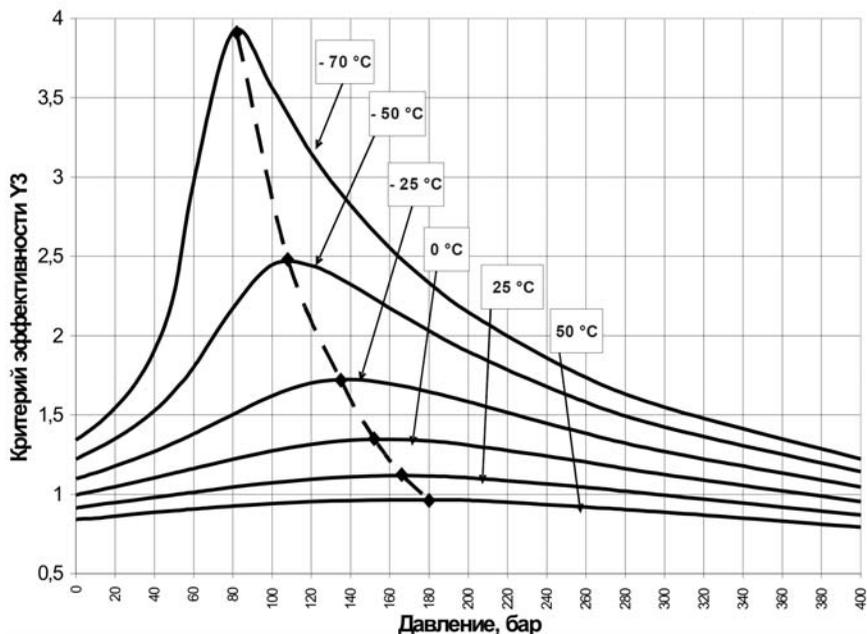


Рис. 6

Относительное изменение показателя эффективности емкости  $Y_3$  в зависимости от температуры перевозимого груза и давления метана. За единицу принята эффективность при 0 °C и 1 бар

емкости. Эта же кривая, соответствующая оптимальным значениям показателя эффективности в зависимости от температуры и давления показана на рис. 7. В пределе при охлаждении груза до -83 °C произойдет его сжижение при давлении 46 бар, что соответствует критической точке метана.

Однако охлаждение груза потребует холодильной установки очень большой холодопроизводительности. Так, для охлаждения 1 млн. м<sup>3</sup> метана в процессе загрузки, например на 40 °C за 10 часов, потребуется рефустанровка с холодопроизводительностью порядка 20 МВт. Из этого следует, что перевозка груза с охлаждением возможна только, если груз будет поступать охлажденным береговыми средствами до погрузки. Поддержание такой или более глубокой температуры во время рейса не представляется принципиально

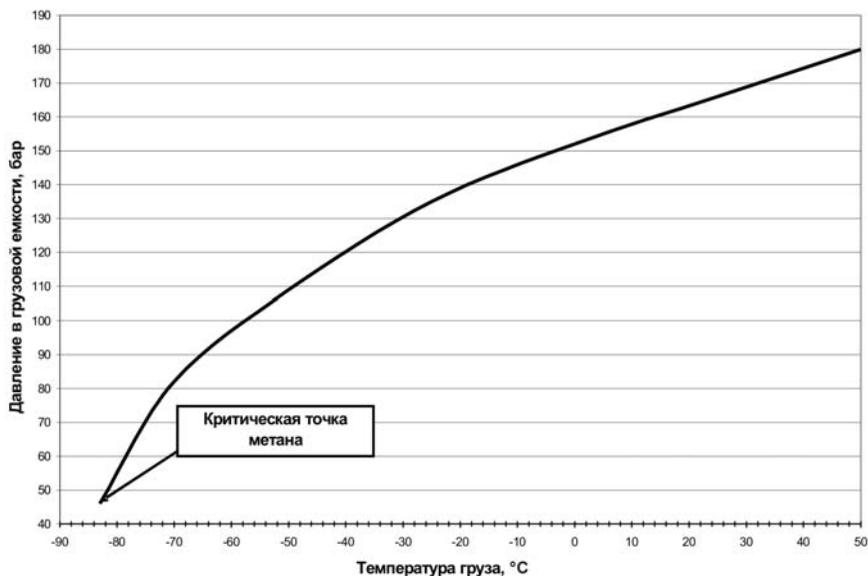


Рис. 7  
Зависимость оптимального значения  
давления перевозимого груза от температуры

сложной задачей. Для этого можно использовать имеющиеся в настоящее время проекты судовых рефрижераторных установок или системы кондиционирования по замкнутому контуру. Однако использования такого способа повышения эффективности потребует тепловой изоляции трюмов. Кроме того, использование охлаждения груза приводит к нескольким дополнительным опасностям, поэтому требования к резервированию систем охлаждения должны обязательно присутствовать в требованиях классификационных обществ, что и нашло отражение в Правилах DNV и ABS.

Определенный интерес представляет критическая точка метана  $-83\text{ }^{\circ}\text{C}$  при 46 бар. Достижение этой точки позволяет скачкообразно повысить показатели эффективности грузовой емкости, так как плотность жидкого метана при этих параметрах составит  $212,5\text{ кг/м}^3$  по сравнению с  $145,3\text{ кг/м}^3$  в газовой фазе при тех же параметрах (т. е. увеличивается почти в полтора раза) [3]. Перевозка

груза при критических параметрах по затратам и по сложности осуществления проекта по всей видимости заняла бы промежуточное положение между LNG и CNG.

4.

$$Y_4 = 1 / A, \quad (11)$$

где  $A = 1 + t/D$ .

**Параметр  $Y_4$**  характеризует влияние геометрии емкости (ее тонкостенности).

Для сосуда под давлением с внутренним диаметром 1 м и толщиной стенки 40 мм  $A = 1,04$ , а  $Y_4 = 0,96$ . Влиять на эффективность путем изменения отношения толщины стенки к диаметру практически невозможно, так как толщина стенки, рабочее давление, диаметр и допускаемые напряжения взаимосвязаны (см. (4)), изменять параметр  $Y_4$  возможно только применяя более прочный материал, однако и это мало влияет на параметр  $Y_4$ . Например, уменьшение в два раза толщины стенки за счет более прочного материала (допускаемые напряжения увеличились в 2 раза) приведет к изменению параметра  $Y_4$  для сосуда под давлением с внутренним диаметром 1 м и толщиной стенки 40 мм приведет к изменению с 0,96 до 0,98, то есть всего на 2 %.

5.

$$Y_5 = \frac{0,5L/D + 1/3}{L/D + 1}. \quad (12)$$

**Параметр  $Y_5$**  характеризует влияние геометрии емкости (соотношение длины цилиндрической части грузовой емкости  $L$  к ее диаметру  $D$ ). В общем виде параметр  $Y_5$  представляет функцию, которая изменяется в зависимости от величины выпуклости дна и толщины стенки. Для выпуклых эллиптических дна с толщиной стенки, равной толщине стенки обечайки с высотой дна  $h$ , функция  $Y_5$  примет следующий вид:

$$Y_5 = \frac{0,5L/D + 2h/3D}{L/D + 2h/D}, \quad (13)$$

где  $h$  – высота днища.

Если высота днища равна половине диаметра, то есть выпуклое эллиптическое днище становится сферическим, (13) примет вид (12). Формула (13) верна только для таких значений  $h$ , при которых не требуется увеличение толщины стенки днища более толщины стенки обечайки из соображений прочности, т. е. для  $0,5D \geq h \geq 0,25D$ . Применение плоских днищ возможно только для труб небольшого диаметра.

Влияние соотношения  $L/D$  на массовую эффективность грузовой емкости показано на рис. 8.

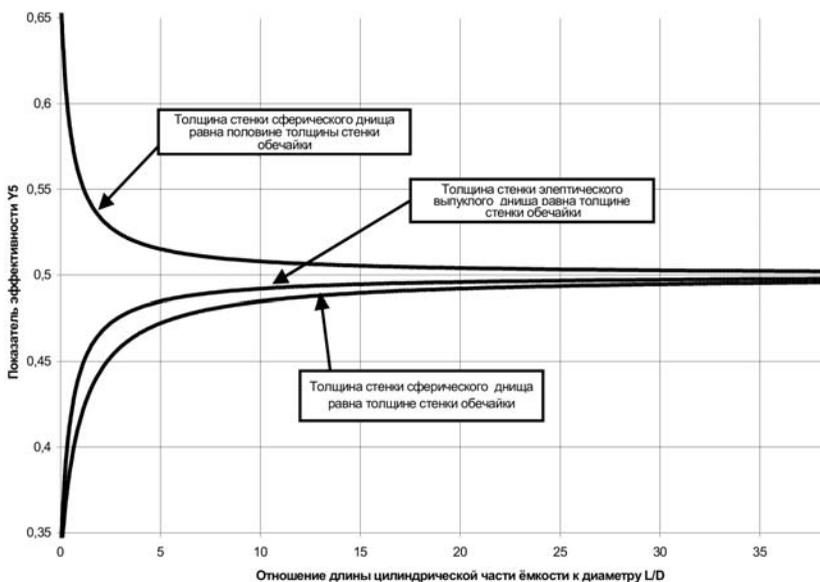


Рис. 8

Изменение показателя эффективности грузовой емкости  $Y_5$  от соотношения размеров грузовой емкости для различных вариантов днищ

Критерий эффективности  $G$  не очень удобен для восприятия, так как является отношением газа к весу емкости и теоретически может принимать значения выше 1. Более удобен для восприятия критерий  $\eta$ , который является отношением полезной массы груза к массе загруженной емкости, т. е. аналогичен коэффициенту полезного действия. Зная  $G$  можно легко найти  $\eta$ , так как они связаны следующим соотношением:

$$\eta = \frac{1}{1 + 1/G}. \quad (14)$$

В заключение предлагается несколько вариантов расчета массовой эффективности емкостей различных конструкций, результаты приводятся в табл. 3, в которой показаны следующие варианты грузовых емкостей.

Вариант 1. Емкость изготовлена из стальной трубы внутренним диаметром 1000 мм, толщиной стенки 40 мм, допускаемые напряжения 200 МПа ( $\sigma_b > 520$  МПа,  $\sigma_t > 320$  МПа), с эллиптическим днищем с  $h/D = 0,25$  при температуре 20 °С. Рабочее давление составляет 20 МПа. При указанных исходных данных критерий эффективности  $G=0,0944$ , критерий  $\eta=0,08629$ , а промежуточные показатели приведены в табл. 3.

Вариант 2, 3, 4. Емкость изготовлена из титанового сплава ПТ-3В, обечайки сварены из листа внутренним диаметром 500 мм длиной 10 м, допускаемые напряжения – 200 МПа ( $\sigma_b > 833$  МПа,  $\sigma_t > 588$  МПа), с эллиптическим днищем с  $h/D = 0,25$ .

Рассмотрены три варианта условий перевозки: при температурах 20 °С, – 25 °С и – 70 °С при давлениях 20 МПа, 15 МПа и 8 МПа соответственно. Критерии эффективности перевозки показаны в табл. 3.

Вариант 5, 6. В качестве грузовой емкости рассмотрен композитный баллон БЦМ-35-19,6-362/995, серийно изготавливаемый Котласским электромеханическим заводом. В расчетах показателей эффективности использованы данные производителя. Поскольку данные о материале отсутствуют, но имеются данные о вместимости и весе серийных образцов, некоторые промежуточные показатели эффективности опущены.

Таблица 3

Вариант	Конструкция грузовой емкости	$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$	$Y_4$	$Y_5$	G	$\eta$
1	стальная труба $D=1000$ мм, $t=40$ мм, $\sigma_b > 520$ МПа, $\sigma_T > 320$ МПа, эллиптические днища, отношение $L/D = 36$ , температура = $20$ °С, давление = $20$ МПа	$1,928 \cdot 10^{-3}$	$2,564 \cdot 10^4$	$4,05 \cdot 10^{-3}$	0,96	0,4975	0,0944	0,0863
2	из титанового сплава ПТ-3В $\sigma_b > 833$ МПа, $\sigma_T > 588$ МПа, эллиптические днища, отношение $L/D = 20$ , температура = $20$ °С, давление = $20$ МПа	$1,928 \cdot 10^{-3}$	$4,444 \cdot 10^4$	$4,05 \cdot 10^{-3}$	0,96	0,496	0,165	0,142
3	из титанового сплава ПТ-3В $\sigma_b > 833$ МПа, $\sigma_T > 588$ МПа, эллиптические днища, отношение $L/D = 20$ , температура = $-25$ °С, давление = $15$ МПа	$1,928 \cdot 10^{-3}$	$4,444 \cdot 10^4$	$6,26 \cdot 10^{-3}$	0,97	0,496	0,258	0,205
4	из титанового сплава ПТ-3В $\sigma_b > 833$ МПа, $\sigma_T > 588$ МПа, эллиптические днища, отношение $L/D = 20$ , температура = $-70$ °С, давление = $8$ МПа	$1,928 \cdot 10^{-3}$	$4,444 \cdot 10^4$	$1,43 \cdot 10^{-2}$	0,98	0,496	0,596	0,373
5	композитный баллон температура = $20$ °С, давление = $20$ МПа	$1,928 \cdot 10^{-3}$	–	$4,05 \cdot 10^{-3}$	–	0,456	0,267	0,21
6	композитный баллон температура = $-25$ °С, давление = $20$ МПа	$1,928 \cdot 10^{-3}$	–	$6,26 \cdot 10^{-3}$	–	0,456	0,413	0,292

Рассмотрены два варианта условий перевозки: при температурах 20 °С и – 25 °С при давлении 20 МПа. Эти условия соответствуют допускаемым условиям эксплуатации баллона, которые по данным производителя предусматривают до – 45 °С.

Из сопоставления грузовых емкостей различных типов по показателям массового совершенства можно сделать выводы, что на показатели массового совершенства грузовых емкостей наиболее существенно влияют три фактора:

- удельная прочность материала;
- температура газа при транспортировке;
- соотношение размеров грузовой емкости (отношение длины емкости к диаметру).

Варьируя эти факторы, можно добиваться существенного повышения показателей массового совершенства грузовых емкостей. Однако высокое значение показателей массового совершенства конструкций не является достаточным для окончательного выбора в пользу применения грузовых емкостей того или иного типа. Рациональность использования емкостей определенного типа требует более детального рассмотрения применительно к условиям конкретного проекта морской транспортировки сжатого природного газа.

### **3. О назначении коэффициентов запаса грузовых емкостей судовых CNG**

Анализ требований, предъявляемых к судам для транспортировки сжатого природного газа и устанавливаемому на них технологическому оборудованию для подготовки, загрузки, транспортировки и разгрузки газа, в документах международных организаций и классификационных обществ показал, что основополагающим документом для проектирования и строительства судов CNG является международный Кодекс IGC.

Хотя Кодекс IGC не является обязательным для судов CNG, однако он может быть использован при разработке нормативных документов для судов CNG и при их проектировании. При этом следует исходить из положения, что уровень безопасности вновь проектируемого судна не должен быть ниже уровня безопасности существующих конвенционных судов, т. е. – судов LNG.

Требования Кодекса IGC включены в Правила по газовозам всех классификационных обществ – членов МАКО. Большая часть этих требований может быть применена для судов CNG без ущерба для безопасности.

При проектировании судов CNG к перечисленным в Кодексе IGC опасностям следует добавить опасности, связанные с высоким давлением в грузовых емкостях. Хотя опасность такого рода учитывается в Кодексе IGC для грузовых танков типа С, которые являются сосудами под давлением, для судов CNG она многократно возрастает и появляются новые опасности, связанные с возможными утечками из грузовых танков.

В частности:

хотя груз не перевозится при криогенных температурах, остается опасность переохлаждения и температурного холодного удара для судовых конструкций в случае утечки газа за счет охлаждения газа при расширении;

хотя Кодекс IGC определяет границы опасных зон, для судов CNG они должны быть пересмотрены, так как в возможных источниках утечки груза присутствуют гораздо большие давления, а следовательно – районы распространения и концентрации смесей будут другими;

при возникновении утечки газа на судне CNG время достижения взрывоопасной концентрации будет значительно меньше, чем на судне LNG, так как для сжиженного газа требуется время на испарение;

по этой же причине при утечке газа на судне CNG значительно быстрее, чем на судне LNG, будет подниматься давление в окружающей грузовой танк помещении, что увеличивает опасность повреждения корпусных конструкций и требует большей производительности предохранительных устройств;

в случае возникновения на судне CNG возгорания груза при его утечке сценарий развития пожара будет отличаться от аналогичного пожара на судне LNG, так как давление и скорости истечения газа будут значительно больше, а следовательно – требования по противопожарной защите и средствам тушения должны быть пересмотрены, но, учитывая специфику тушения газа, необходимости применения дополнительных систем тушения нет, но имеет смысл повышения требования к конструктивной противопожарной защите.

С учетом перечисленных дополнительных опасностей, требования Кодекса IGC могут быть применены к судам CNG.

Специфические аспекты проектирования судов CNG регламентируются специальными Правилами DNV и ABS по судам CNG.

Наиболее принципиальным при проектировании судов CNG является вопрос установления приемлемого по критериям безопасности коэффициента запаса прочности по допускаемым напряжениям для грузовых емкостей. При подтверждении комплексом предусмотренных Правилами DNV экспериментальных исследований соответствия уровня безопасности грузовых емкостей требуемым стандартам, для грузовых емкостей судов CNG может быть применен коэффициент запаса общей прочности в пределах 1,6–1,8 по величине временного сопротивления  $\sigma_v$ , что позволяет проектировать экономически эффективные суда CNG.

Приступая к проектированию судна CNG необходимо предварительно согласовать с классификационным обществом и Морской Администрацией следующие вопросы:

назначение коэффициентов запаса прочности грузовых емкостей и объем исследования образцов грузовых баллонов;

применение требований Кодекса IGC.

Такое согласование может быть выполнено в форме специального документа, в котором бы нашли отражение перечисленные вопросы – проекта временных требований Регистра для газозовов CNG, который можно будет согласовать с Морской Администрацией России. Такой документ может быть разработан на основе настоящего исследования.

### **3.1 Сравнение требований нормативных документов по расчетам на прочность**

Результаты анализа формул для расчета допускаемого рабочего давления в цилиндрических сосудах под давлением в различных нормативных документах, при их кажущемся внешнем различии, говорит о том, что в основу расчета положены одни и те же зависимости.

В качестве критерия разрушения в большинстве нормативных документов используется третья теория прочности (наибольших касательных напряжений), где эквивалентные напряжения опре-

деляются как разность наибольших и наименьших главных напряжений. Анализ формул для расчета по различным нормативным документам (ASME Code, ГОСТ 14249-89, ОСТ 108.031.08-85, часть X «Котлы, теплообменные аппараты и сосуды под давлением» Правил Регистра и т. д.) показывает, что если используются одинаковые значения допускаемых напряжений, то разница в результатах составляет не более 2 %.

Исключение составляют требования Кодекса IGC и требования Правил классификационных обществ по газозовам LNG, которые повторяют требования Кодекса IGC, где используется четвертая теория прочности (формула Мизеса). Разница в результатах по сравнению с первой группой документов составляет около 13 % (в меньшую сторону). Видимо это обстоятельство отражается в величине коэффициентов запаса прочности: согласно Кодексу IGC, коэффициент запаса прочности по временному сопротивлению для углеродистых сталей равен 3, что, если разделить на 1,13, составит 2,655 и соответствует требованиям Регистра для сосудов под давлением.

Из выше сказанного можно сделать вывод, что причины разброса в результатах расчета лежат не в различиях методик расчета, а в величине коэффициентов запаса прочности, требуемых различными документами для определения допускаемых напряжений.

Сравнение требований различных нормативных документов к величине коэффициентов запаса прочности для сосудов под давлением приводится в табл. 2. Для того, чтобы провести такое сравнение, пришлось все указанные требования привести к единому привычному для нас виду, где допускаемые напряжения определяются как наименьшие из нескольких характеристик прочности материала, разделенных на коэффициент запаса. Так как во многих документах для береговых и подводных объектов используются специфические коэффициенты, учитывающие несвойственные для судовых сосудов под давлением факторы (сейсмостойкость, воздействие волн и т. д.), эти коэффициенты не учитывались. Результаты сравнения коэффициентов запаса прочности по пределу текучести и временному сопротивлению приведены на рис. 1, где в виде диаграммы приводятся данные табл. 2.

Таблица 4

## Сравнение требований нормативных документов

к величине коэффициентов запаса прочности оболочек, работающих под внутренним давлением

Документ	Коэффициент запаса прочности	Коэффициент запаса прочности по пределу текучести $\sigma_T$	Примечания	
1	2	3	4	
ASME Code	– для нормальных температур;	$0,85\sigma_B/4 = \sigma_B/4,7$	$\frac{2}{3} \frac{\sigma_T}{0,85\sigma_T} = \frac{\sigma_T}{1,76}$	1, 2
	– для повышенных температур;	$1,1 \frac{0,85\sigma_B}{4} R_T = \frac{\sigma_B}{4,3} R_T$	$\frac{2}{3} \frac{\sigma_T}{0,85\sigma_T} R_T = \frac{\sigma_T}{1,76} R_T$ $0,9 \cdot 0,85\sigma_T R_T = \frac{\sigma_T R_T}{1,3}$	*) – при проведении гидравлических испытаний
IGC Кодекс (для грузовых танков типа C)*	Углеродистые и никелевые стали	$\sigma_B/3$	$\sigma_T/2$	*) Требования Правил классификационных обществ (Регистра, ABS и DNV) для газозавозов LNG повторяют Кодекс IGC
	Аустенитные стали	$\sigma_B/3,5$	$\sigma_T/1,6$	
	Алюминиевые сплавы	$\sigma_B/4$	$\sigma_T/1,5$	

1	2	3	4	5
ГОСТ 14249-89 <sup>5</sup>	Углеродистые и никелевые стали	$\sigma_B/2,4$	$\sigma_T/1,5$ , но не более $\sigma_T/1,1$ при гидравлических испытаниях	1
	Аустенитные стали	$\sigma_B/3$		
ОСТ 108.031.08-85 <sup>6</sup>	часть X «Котлы, теплообменные аппараты и сосуды под давлением» Правила Регистра	$\sigma_B/2,7$	$\sigma_T/1,6$	
		–	$\sigma_T/2$	3
Руководство ABS по подводным трубопроводам				
СНиП 2.05.06-85 по сухолутным магистральным трубопроводам		От $\sigma_B/1,5$ до $\sigma_B/2,4$	От $\sigma_T/1,2$ до $\sigma_T/1,8$	3, 4, 8
Правила классификации и постройки морских подводных трубопроводов Регистра		$\sigma_B/2,6$	$\sigma_T/1,5$	3, 7
Правила DNV по подводным трубопроводам		$\sigma_B/1,5$	$\sigma_T/1,3$	3
Примечания:				
1. Общие требования. Для конкретных марок сталей даются меньшие значения.				
2. $R_T$ – коэффициент, учитывающий изменение свойств материала под воздействием температуры.				
3. Без учета коэффициентов воздействия различных внешних факторов, не относящихся к судам CNG.				
4. Для газопроводов рабочим давлением не более 10 МПа в зависимости от участка, свойств материала и технологии сварки.				
5. Нормы расчета на прочность стационарных сосудов под давлением.				

6. Нормы расчета на прочность стационарных паровых котлов.
7. Коэффициенты запаса могут быть уменьшены при условии проведения специальных расчетов местной и общей прочности с учетом расположения на грунте.
8. Больше значение соответствует требованиям для переходов через водные преграды.

Сравнение требуемых различными стандартами коэффициентов запаса прочности представлено на рис. 8.

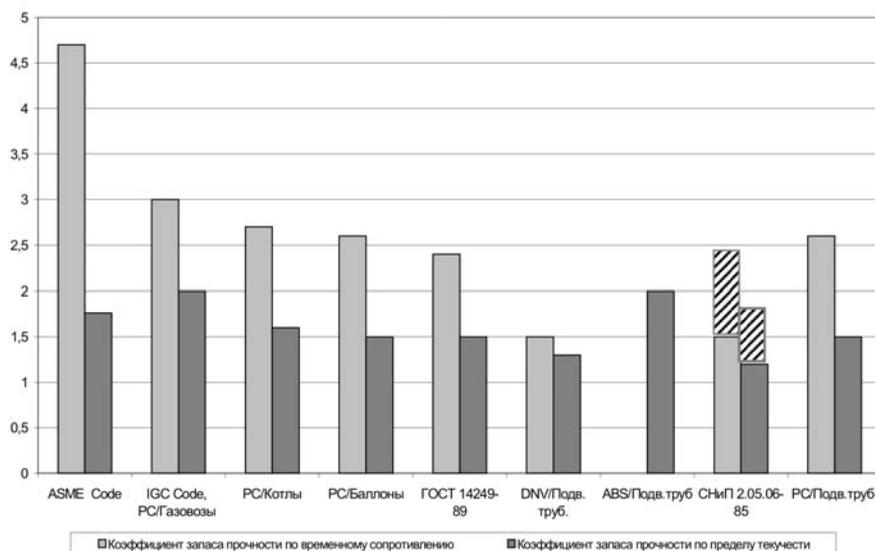


Рис. 8  
Сравнение коэффициентов запаса прочности, требуемых различными стандартами

В табл. 3 приводятся результаты сравнения допускаемого различными стандартами расчетного давления для цилиндрической емкости (баллона), выполненной из стальной трубы диаметром 1067 мм (42”) с толщиной стенки 33,5 мм, сталь Х80.

Таблица 5  
**Допустимое расчетное давление для баллона заданных габаритов**

Документ	Расчетное давление, МПа
1	2
ISO 13628-7	27,5
DNV-OS-F201 Safety Class High	26,0

1	2
DNV-OS-F101 Safety Class High	25,0
ISO/DIS 13623	25,0
CSA Z662, Canada Class 4	15,0
CSA Z662, Canada Class 3	17,5
CSA Z662, Canada Class 2	25,0
CSA Z662, Canada Class 1	27,5
B 31.8, US-class 4	14,0
B 31.8, US-class 3	17,5
B 31.8, US-class 2	21,0
B 31.8, US-class 1	27,5
API-RP1111.US	24,5
ANCC Code, Italy	23,0
AD-Merkblätter, Germany	23,0
BS 5500, UK	16,0
ASME BPVC VIII, US-div.3	17,5
ASME BPVC VIII, US-div.2	13,0
ASME BPVC VIII, US-div.1	11,0
DNV Ship Rules pt.4 ch.3 sec.	14,0

### 3.2 Назначение допускаемых напряжений для грузовых емкостей

Если сравнивать грузовые емкости для судов LNG и CNG, то нельзя не отметить одно очень важное принципиальное отличие: грузопместимость судов CNG напрямую зависит от внутреннего давления в грузовой емкости, в отличие от судов LNG, где давление определяется точкой фазового перехода при температуре перевозки. То есть, для LNG, в отличие от CNG, не имеет смысла повышать давление в грузовых емкостях выше давления насыщения при температуре перевозки, так как это не приведет к увеличению грузопместимости. Применение существующих общепринятых норм для судов LNG и, в частности, коэффициентов запаса прочности для назначения допускаемых напряжений грузовых емкостей судов CNG не целесообразно экономически и нуждается в глубоком переосмыслении.

Существующие нормативные документы в области обеспечения прочности грузовых емкостей для судов-газовозов разработаны с ориентацией на суда для перевозки сжиженного природного газа – суда LNG. Как правило, расчетные внутренние давления в грузовых емкостях судов LNG относительно невелики и определяются точкой фазового перехода при стандартной температуре перевозки –162 °С. Коэффициенты запаса прочности, установленные существующими нормативными документами для назначения допускаемых напряжений в грузовых емкостях судов-газовозов, основаны на специфике работы грузовых емкостей в этих условиях.

Для грузовых емкостей судов CNG более характерны другие условия работы – существенно более высокие внутренние давления и существенно менее экстремальные температуры транспортируемого природного газа. В связи с этим, применение существующих общепринятых норм для судов LNG, в частности – коэффициентов запаса прочности, для назначения допускаемых напряжений в грузовых емкостях судов CNG нуждается в глубоком переосмыслении.

Коэффициент запаса прочности (КЗП), по своей сути, есть не что иное, как «коэффициент незнания» свойств конструкции, ожидаемых нагрузок и возможных последствий аварии. КЗП можно разложить на произведение нескольких сомножителей, каждый из которых будет отражать «коэффициент незнания» какого-либо фактора, влияющего на вероятность безаварийной работы. Применительно к сосудам под давлением основными такими факторами будут следующие (см. табл. 6).

Таблица 6

**Факторы,  
влияющие на вероятность безаварийной работы грузовых емкостей**

Фактор	Методы снижения влияния фактора на вероятность безаварийной работы
1	2
«Коэффициент незнания» метода расчета, т. е. коэффициент, учитывающий аппроксимацию формы сосуда и местных деталей, влияющих на усталостную прочность	Может быть уменьшен путем применения более совершенных численных методов расчета (МКЭ), учетом не только внутреннего давления, но и местных нагрузок, реакций опор и термических напряжений

1	2
«Коэффициент незнания» характера разрушения данной конструкции	Может быть уменьшен путем проведения испытаний полномасштабного образца до разрушения. Кроме того, значительным резервом уменьшения коэффициента может быть проверка соответствия конструкции принципу «течь-разрушение», для чего требуется исследование свойств трещиностойкости материала
«Коэффициент незнания» свойств материала конкретного сосуда, т. к. есть определенный технологический разброс свойств материала и в расчетах учитывается минимально возможное значение	Может быть уменьшен за счет контроля действительных размеров толщины стенок грузовых емкостей и испытания образцов материала каждой трубы, идущей на производство емкостей
«Коэффициент незнания» изменений свойств материала под действием усталостных нагрузок	Может быть уменьшен путем испытания образцов на усталость и построения кривой Велера
«Коэффициент незнания» изменений нагрузок за время жизни и, как следствие, неконтролируемый расход ресурса	Может быть уменьшен путем мониторинга изменения внутреннего давления
«Коэффициент незнания» интенсивности коррозии, протекающей во время эксплуатации	Может быть уменьшен путем применения антикоррозионного покрытия и контроля состояния конструкции во время эксплуатации
«Коэффициент незнания» величины термических напряжений	Может быть уменьшен путем принятия мер по уменьшению колебаний температуры
«Коэффициент незнания» последствий аварии	Может быть уменьшен путем построения дерева отказов и проведения анализа риска

Основным и единственным способом борьбы с незнанием является получение нового знания, т. е. исследование тех свойств, влияние которых на прочность и надежность конструкции вызывает законное опасение. Глубокое исследование свойств конструкции требует проведения дорогостоящих экспериментальных исследований, что в случае CNG полностью экономически оправданно,

т. к. вместимость грузовых емкостей и эффективность перевозки груза напрямую зависят от коэффициентов запаса прочности.

Таким образом, судовладелец и классификационное общество, рассматривая проект судна, должны определить и согласовать объем исследований, которые необходимо и экономически целесообразно проводить для подтверждения безопасной работы грузовых емкостей при установлении определенного значения коэффициента запаса прочности.

Кроме того, применение существующих общепринятых норм по назначению допускаемых напряжений для грузовых емкостей для судов CNG не целесообразно еще и потому, что объем возможной утечки газа при разгерметизации одной грузовой емкости для судов CNG значительно меньше по сравнению с аналогичной ситуацией для судов LNG, а следовательно – последствия наступления такого события менее опасны.

Также следует отметить, что указанные в Кодексе IGC значения коэффициентов запаса прочности даются для любых газов, указанных в главе 19 Кодекса IGC, вне зависимости от их свойств, т. е. по принципу максимального значения с учетом всех возможных опасностей и вреда который может нанести груз. Между тем можно и нужно учитывать, что метан не обладает одной из учитываемых Кодексом опасностей – токсичностью, и поэтому назначать для грузовых емкостей для метана такой же запас прочности, как и, например, для токсичного аммиака – не совсем обоснованно. Необходимо применение других способов обеспечения безопасности, например эквивалентной замены величины коэффициента запаса прочности. В качестве такой замены может быть рассмотрен комплекс мер, включающий:

.1 натурный эксперимент с разрушением образца грузовой емкости. В идеале такие испытания необходимо производить газобразной средой для того, чтобы можно было судить о характере разрушения;

.2 испытание образцов на усталость для построения (S-N) кривой Велера для материала, из которого изготавливаются грузовые емкости, и расчет усталостной прочности на ее основе;

.3 определение трещиностойкости (вязкости разрушения) материала для возможности проверки соответствия грузовых емкостей принципу «течь-разрушение»;

.4 возможность контроля состояния материала грузовой емкости в эксплуатации:

визуально (осмотр или телекамера);

с помощью ультразвукового контроля в сочетании с контролем акустической эмиссии или магнитодиагностикой;

с помощью периодических разрушающих испытаний одной или нескольких грузовых емкостей после определенного срока эксплуатации с определением изменения свойств материала;

.5 применение максимально простой формы грузовых емкостей, исключаяющей или предельно уменьшающей величины концентрации напряжений и, как следствие, амплитуду колебаний напряжений, – позволяет значительно уменьшить расход ресурса по усталости;

.6 точный учет циклов «погрузка-разгрузка» и непрерывный контроль давления в грузовых емкостях – позволяют отслеживать расход усталостного ресурса материала баллонов;

.7 контроль величины внутреннего давления в грузовых баллонах и наличие предохранительных клапанов достаточной пропускной способности – позволяют обезопасить грузовые емкости от избыточного давления;

.8 организацию загрузки сжатого природного газа в грузовые емкости судна CNG таким образом, чтобы избежать сколько-нибудь значительных колебаний температуры. Отсутствие в грузовых емкостях судов CNG термических напряжений, которые являются основным источником аварий, например, в судовых котлах, позволит говорить о том, что применение котельных норм прочности к грузовым емкостям CNG нецелесообразно.

В грузовых танках LNG термические напряжения также играют крайне серьезную роль из-за термического напряжения металла емкостей и необходимости крепления их к корпусу. Отсутствие термических напряжений в грузовых емкостях судов CNG позволит говорить о том, что применение норм прочности для танков судов LNG к грузовым емкостям CNG – также нецелесообразно;

.9 меры по подготовке газа и внутреннее антикоррозионное покрытие грузовых емкостей, что позволяет свести к минимуму коррозию и, как следствие, уменьшить запас на коррозию до нуля;

.10 контроль действительных размеров толщины стенок грузовых емкостей позволяет снизить запас на технологический разброс толщин;

.11 расчет напряжений в грузовых емкостях с использованием метода конечных элементов (МКЭ) с учетом внутреннего давления и реакций опор и определение таким образом действительной концентрации напряжений – позволяет снизить общий «коэффициент незнания» – коэффициент запаса прочности.

Оценка безопасности и анализ последствий взрыва одной грузовой емкости, который не должен приводить к дальнейшим повреждениям, пожарам и взрывам, а также все вышеперечисленное позволяет обсуждать применение для грузовых емкостей судов CNG коэффициента запаса общей прочности в пределах 1,6–1,8 по величине временного сопротивления  $\sigma_v$ .

Из изложенных выше материалов можно сделать следующие выводы.

1. Предложена математическая модель оценки эффективности грузовой емкости CNG. В результате ее исследования обнаружено, что на эффективность перевозки наиболее существенно влияют 3 фактора, а именно: удельная прочность материала, температура перевозки и соотношение размеров (длины и диаметра). Эти факторы определяют возможные способы формирования грузовых емкостей: применение высокопрочных и легких материалов, понижение температуры при транспортировке и использование цилиндрических или спиральных емкостей с высоким отношением длины к диаметру. По информации периодической печати, разрабатываемые в настоящее время типы грузовых емкостей подтверждают сделанные выводы об основных путях повышения их эффективности.

2. Грузовместимость судов CNG напрямую зависит от внутреннего давления в грузовой емкости, в отличие от судов LNG, где давление близко к атмосферному, а температура определяется точкой фазового перехода. То есть, для LNG, в отличие от CNG, не имеет смысла повышать давление в грузовых емкостях выше давления насыщения при температуре перевозки, так как это не приведет к увеличению грузоместимости. Применение существующих общепринятых норм для судов LNG и, в частности,

коэффициентов запаса прочности для назначения допускаемых напряжений грузовых емкостей судов CNG не целесообразно экономически и нуждается в глубоком переосмыслении. Для судовладельца экономически целесообразно проведение специальных исследований прочности конструкций грузовых емкостей судов CNG для возможности уменьшения коэффициентов запаса прочности без понижения уровня безопасности. Формирование требований к объему и методике таких испытаний и исследований – серьезная научная задача, которая встанет перед классификационными обществами в ближайшее время в связи с развитием технологии CNG.

3. В настоящее время отечественная промышленность обладает достаточным научно-производственным потенциалом для создания ключевого элемента новой технологии – судов CNG, а также основного оборудования для них. Результаты проведенных исследований показали техническую реализуемость и перспективность технологии CNG в качестве дополнительного инструмента для ввода в коммерческий оборот шельфовых месторождений природного газа и поставок природного газа на удаленные рынки. Технология транспортировки газа с помощью судов CNG активно развивается и для возможности применения этой прогрессивной технологии отечественными верфями и судовладельцами необходима соответствующая разработка нормативной базы Регистра, как это сделано ABS [6] и DNV [7].

### *Список литературы*

1. Таблицы физических величин // Справочник / Под ред. акад. И. К. Кикоина. – М.: Атомиздат, 1976. – 1008 с.
2. Перри Дж. Справочник инженера-химика, т. 1. / Перевод с англ. под ред. акад. Жаворонкова Н.М. и чл.-корр. АН СССР Романкова П.Г. – Л.: Химия, 1969. – 640 с.
3. Акулов Л.А., Борзенко Е.Н. и др. Теплофизические свойства криопродуктов. – СПб.: Политехника, 2001. – 243 с.
4. Блинков А.Н., Власов А.А. Морская транспортировка сжатого газа. Новые возможности для освоения месторождений природного газа на шельфе // Морская Биржа. – 2006. – № 2. – С. 65 – 69.
5. Блинков А.Н., Власов А.А., Лицис А.В. Морская транспортировка сжатого газа. Возможности применения технологии CNG для транспорти-

ровки природного газа российских месторождений // Морская Биржа. – № 3. – 2006. – С. 82 – 87.

6. DNV. Offshore standard OS-F101. SUBMARINE PIPELINE SYSTEMS., Det Norske Veritas, Hovik, Norway, 2000, 264 с.

7. ABS. GUIDE FOR VESSELS INTENDED TO CARRY COMPRESSED NATURAL GASES IN BULK., American Bureau of Shipping, Houston, USA, 2005, 366 с.

*В.Р. Скворцов, С.Ю. Крахмалев, В.К. Шурняк*

## **РАЗРАБОТКА ТРЕБОВАНИЙ К КОНСТРУКЦИЯМ, ИСПЫТАНИЯМ И РАСЧЕТАМ НА ПРОЧНОСТЬ КОМПОЗИТНЫХ СОСУДОВ ПОД ДАВЛЕНИЕМ**

### **1. Общие сведения о принципах проектирования и расчета**

Композитными сосудами под давлением называются конструкции целиком или частично изготовленные из слоисто-волоконистых композитных материалов с цилиндрической или сферической формой корпуса, для которых основной рабочей нагрузкой является внутреннее давление. Рабочей средой для рассматриваемых изделий могут быть жидкости и газы под давлением, сжиженные газы, токсичные и горючие газы или жидкости, криогенные среды и глубокий вакуум.

Под слоисто-волоконистыми композитными материалами понимаются неоднородные материалы, состоящие из армирующих элементов – непрерывных волокон или жгутов, лент либо тканей из них, и окружающего их заполнителя (связующего) – матрицы, изготовленные намоткой или укладкой армирующих элементов с последующей пропиткой матрицы и отверждением.

По составу композитные сосуды под давлением делятся на полностью композитные, в которых корпус изготавливается только из композитных материалов, и металло-композитные с полной (по всему корпусу) или частичной (только по цилиндрической части корпуса) намоткой или укладкой композитных материалов на металлический лайнер (обечайку). Последние наиболее распространены в отечественной практике. Схема армирования обычно обозначается по представительному набору направлений армирования, например, чисто окружное армирование (угол  $0^\circ$ ), перекрестное (продольно-кольцевое;  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ), диагональное (применительно к оболочкам вращения – спиральное под углами  $\pm\varphi$  к окружному направлению), а также их комбинации.

По типу оформления днищ композитные сосуды под давлением делятся на сосуды с выпуклыми (эллиптическими или в форме сегмента сферы), сферическими (в форме полной полусферы), коническими, плоскими и вогнутыми днищами. Выпуклые и сферические днища по составу могут быть такими же, что и цилиндрическая часть; конические, плоские и вогнутые днища изготавливаются чисто металлическими.

Традиционный метод проектирования сосудов под давлением заключается в определении конструктивной формы и геометрических параметров конструкции при заданных механических характеристиках материала и рабочих нагрузках. Однако при создании композитных сосудов под давлением, как и при проектировании композитных конструкций в целом, такой подход не может быть строго реализован, поскольку сами свойства материала зависят от структурных параметров (углов армирования, соотношения слоев и т. д.), которые заранее неизвестны. Следовательно, неотъемлемой частью процесса проектирования является конструирование самого композитного материала. Поэтому, использование стандартных методик механики конструкций, рассчитанных на монолитные изотропные материалы, допустимо лишь для чисто металлических частей металло-композитных сосудов.

## **2. Методика расчета прочности композитных сосудов под давлением**

Важнейшим этапом оценки прочности композитного сосуда под давлением является расчет напряжений в его структурных элементах при заданных параметрах геометрии, механических характеристик упругости и давлении. Для этого используется его математическая модель, рассматривающая осесимметрично деформируемую оболочку, состоящую из цилиндрической и днищевой частей и имеющую неоднородное по толщине строение.

Такая задача решается в несколько этапов. На первом этапе определяются механические характеристики пакета слоев. На втором этапе решается задача для оболочки как таковой. Наконец, после этого определяются все компоненты напряжений в структурных элементах, подлежащие сравнению с допустимыми. Основные идеи такого подхода описаны, например, в [1].

Важнейшим структурным элементом является однонаправленный слой композита (монослой), который состоит из волокон и матрицы. Волокна непрерывны, а их расположение в монослое считается параллельным. Обычно модуль упругости волокна, как минимум, на два порядка выше модуля упругости матрицы. Поэтому единственной характеристикой упругости монослоя является модуль упругости композита  $E_k$  вдоль волокон; остальными характеристиками можно пренебречь. Таким образом, монослой воспринимает только напряжения вдоль волокон. Прочность матрицы при этом не оценивается, что является вполне допустимым для матриц, предельные деформации которых существенно выше предельных деформаций волокон.

Возможны различные варианты расположения одинаковых монослоев в пакете, которые подчиняются следующим требованиям: количество слоев каждого направления достаточно велико и равномерно распределено по толщине пакета, а общая схема армирования является симметричной относительно продольного и окружного направлений.

На первом этапе расчета свойства пакета монослоев осредняются по толщине. Если обозначить продольную ось  $x$ , окружную ось  $z$ , а поперечную (нормальную к поверхности) ось  $y$ , то соотношения ортотропной упругости для осредненных напряжений и деформаций при плоском напряженном состоянии (считается  $\sigma_y \cong 0$ ) записываются в следующем виде:

$$\sigma_x = E_x \varepsilon_x + E_{xz} \varepsilon_z, \quad \sigma_z = E_{xz} \varepsilon_x + E_z \varepsilon_z. \quad (1)$$

Для различных схем армирования формулы для модулей таковы:

схема 1, окружное (кольцевое) армирование:

$$E_z = E_k, \quad E_x = E_{xz} = 0; \quad (2)$$

схема 2, спиральное армирование под углом  $\pm\varphi$  (по половине волокон в каждом направлении):

$$E_z = E_k \cos^4 \varphi, \quad E_x = E_k \sin^4 \varphi, \quad E_{xz} = E_k \sin^2 \varphi \cos^2 \varphi; \quad (3)$$

схема 3, спирально-окружное армирование под углами  $0^\circ$ ,  $0^\circ$ ,  $\pm\varphi$  (половина волокон в окружном направлении, по четверти волокон в каждом спиральном направлении):

$$E_z = 0,5 E_k (1 + \cos^4 \varphi), E_x = 0,5 E_k \sin^4 \varphi, E_{xz} = 0,5 E_k \sin^2 \varphi \cos^2 \varphi; \quad (4)$$

схема 4, перекрестное армирование под углами  $0^\circ$ ,  $90^\circ$  (половина волокон в окружном направлении, половина волокон в продольном направлении):

$$E_z = E_x = 0,5 E_k, E_{xz} = 0; \quad (5)$$

схема 5, спирально-перекрестное армирование под углами  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $\pm\varphi$  (по четверти волокон в каждом направлении):

$$E_z = 0,25 E_k (1 + 2 \cos^4 \varphi), E_x = 0,25 E_k (1 + 2 \sin^4 \varphi), \\ E_{xz} = 0,5 E_k \sin^2 \varphi \cos^2 \varphi. \quad (6)$$

Напряжения в окружных, продольных и спиральных монослоях в направлении волокон определяются формулами:

$$\sigma_{k0} = E_k \varepsilon_z, \sigma_{k90} = E_k \varepsilon_x, \sigma_{k\varphi} = E_k (\varepsilon_z \cos^2 \varphi + \varepsilon_x \sin^2 \varphi). \quad (7)$$

Строение стенки сосуда под давлением является двухслойным. Внутренний слой (лейнер) является чисто металлическим; его толщина всюду ниже обозначается  $h_m$ . Соотношения упругости для плоского напряженного состояния металлического слоя имеют вид:

$$\sigma_{xm} = E_{пл} (\varepsilon_x + \nu \varepsilon_z), \sigma_{zm} = E_{пл} (\varepsilon_z + \nu \varepsilon_x), E_{пл} = E_m / (1 - \nu^2), \quad (8)$$

где  $E_m$  и  $\nu$  – модуль упругости и коэффициент Пуассона металла. Наружный слой является композитным; его толщина ниже обозначается  $h_k$ . Соотношениями упругости композитного слоя являются формулы (2)–(6). Деформации в металлическом и композитном слоях одинаковы и являются компонентами мембранной деформации оболочки как таковой.

Общие соотношения упругости, связывающие компоненты деформации с мембранными усилиями оболочки в продольном и окружном направлениях  $N_x, N_z$  имеют вид:

$$\begin{aligned} (E_x h_k + E_{пл} h_m) \varepsilon_x + (E_{xz} h_k + \nu E_{пл} h_m) \varepsilon_z &= N_x, \\ (E_{xz} h_k + \nu E_{пл} h_m) \varepsilon_x + (E_z h_k + \nu E_{пл} h_m) \varepsilon_z &= N_z. \end{aligned} \quad (9)$$

Расчет оболочек вращения традиционно разделяется на две части: поиск решения для безмоментного напряженного состояния и поиск решения для краевых эффектов. Безмоментное напряженное состояние охватывает основные части цилиндрической и днищевой оболочки (если днище не является плоским), за исключением локальных зон, примыкающих к окружным ребрам, переходным участкам и другим нерегулярностям строения. В этих зонах происходит сочетание мембранного деформирования и изгиба стенки оболочки.

Безмоментное решение для цилиндрической оболочки основано на следующих значениях мембранных усилий, вытекающих из уравнений равновесия тонкой оболочки с закрытыми днищами:

$$N_x = pD/4, \quad N_z = pD/2, \quad (10)$$

где  $p$  – избыточное внутреннее давление;  
 $D$  – внутренний диаметр.

Решение уравнений (9), (10) позволяет найти компоненты деформации  $\varepsilon_x, \varepsilon_z$ , а по ним, с учетом формул (7), (8), – продольный и окружной компоненты напряжений в металлическом слое, а также напряжения в направлении волокон в композитных монослоях.

Приведем итоговые формулы для вышеуказанных схем армирования. Продольные и окружные напряжения в металле, а также напряжения в композите в направлении волокна определяются соотношениями:

$$\sigma_{xm} = \frac{pD}{4h_m} \cdot \frac{1 + \psi(\beta_{m1} + \nu\beta_{m2})}{1 + \psi\beta_1 + (1 - \nu^2)\psi^2\beta_2},$$

$$\sigma_{\text{XM}} = \frac{pD}{4h_m} \cdot \frac{2 + \psi(\beta_{m2} + \nu\beta_{m1})}{1 + \psi\beta_1 + (1 - \nu^2)\psi^2\beta_2},$$

$$\sigma_{\text{K}} = \frac{pD\psi}{4h_k} \cdot \frac{\beta_{k1} + (1 - \nu^2)\psi\beta_{k2}}{1 + \psi\beta_1 + (1 - \nu^2)\psi^2\beta_2}, \quad (11)$$

где параметр  $\psi$  описывает соотношение жесткостных характеристик композита и металла:

$$\psi = \frac{E_k h_k}{E_m h_m}, \quad (12)$$

а остальные коэффициенты зависят от схемы армирования.

Для окружного армирования (схема  $0^\circ$ ):

$$\beta_1 = 1, \quad \beta_2 = 0, \quad \beta_{m1} = 1, \quad \beta_{m2} = 0, \quad \beta_{k1} = 2 - \nu, \quad \beta_{k2} = 0. \quad (13)$$

Для спирального армирования (схема  $\pm\varphi$ ):

$$\beta_1 = 1 - \frac{1 + \nu}{2} \cdot \sin^2 2\varphi, \quad \beta_2 = 0,$$

$$\beta_{m1} = \frac{-1 + 2 \cdot \cos \varphi + 3 \cdot \cos^2 2\varphi}{4},$$

$$\beta_{m2} = \frac{1 - 4 \cdot \cos \varphi + 3 \cdot \cos^2 2\varphi}{4},$$

$$\beta_{k1} = \frac{3 \cdot (1 - \nu) + (1 + \nu) \cdot \cos 2\varphi}{2}, \quad \beta_{k2} = 0. \quad (14)$$

Для спирально-окружного армирования (схема  $0^\circ, 0^\circ, \pm\varphi$ ), при котором половина армирующего материала располагается основной вдоль окружного направления, 1/4 под углом  $\varphi$  и 1/4 под углом  $-\varphi$  к окружному направлению:

$$\beta_1 = 1 - \frac{1 + \nu}{4} \cdot \sin^2 2\varphi, \quad \beta_2 = \frac{(1 - \cos 2\varphi)^2}{16},$$

$$\beta_{M1} = \frac{3 + 2 \cdot \cos \varphi + 3 \cdot \cos^2 2\varphi}{8},$$

$$\beta_{M2} = \frac{1 - 4 \cdot \cos \varphi + 3 \cdot \cos^2 2\varphi}{8}; \quad (15)$$

для напряжений в направлении окружных волокон:

$$\beta_{K1} = 2 - \nu, \quad \beta_{K2} = \frac{1 - 4 \cdot \cos 2\varphi + 3 \cdot \cos^2 2\varphi}{8}; \quad (16)$$

для напряжений в направлении спиральных волокон:

$$\beta_{K1} = \frac{3 \cdot (1 - \nu) + (1 + \nu) \cdot \cos 2\varphi}{2}, \quad \beta_{K2} = \frac{1 - \cos 2\varphi}{2}; \quad (17)$$

причем окружные волокна более напряжены если:

$$0,75 \cdot (1 - \nu) \cdot \psi \cdot (1 + \cos 2\varphi) \leq 1. \quad (18)$$

Для перекрестного армирования (схема  $0^\circ, 90^\circ$ ):

$$\beta_1 = 1, \quad \beta_2 = 0,25, \quad \beta_{M1} = 0,5, \quad \beta_{M2} = 1, \quad \beta_{K1} = 2 - \nu, \quad \beta_{K2} = 1, \quad (19)$$

причем более напряженными являются окружные волокна.

Для перекрестно-спирального армирования (схема  $0^\circ, 90^\circ, \pm\varphi$ ), при котором по 1/4 армирующего материала располагается взаимно перпендикулярно в окружном направлении и вдоль образующей сосуда, а оставшаяся часть – равномерно под углами  $\pm\varphi$  к окружному направлению:

$$\beta_1 = 1 - \frac{1 + \nu}{4} \cdot \sin^2 2\varphi, \quad \beta_2 = \frac{3 - \sin^2 2\varphi}{16};$$

$$\beta_{m1} = \frac{1 + 2 \cdot \cos 2\varphi + 3 \cdot \cos^2 2\varphi}{8},$$

$$\beta_{m2} = \frac{5 - 4 \cdot \cos 2\varphi + 3 \cdot \cos^2 2\varphi}{8}; \quad (20)$$

для напряжений в направлении окружных волокон:

$$\beta_{k1} = 2 - \nu, \quad \beta_{k2} = \frac{5 - 4 \cdot \cos 2\varphi + 3 \cdot \cos^2 2\varphi}{8}; \quad (21)$$

для напряжений в направлении продольных волокон:

$$\beta_{k1} = 1 - 2\nu, \quad \beta_{k2} = \frac{1 + 2 \cdot \cos 2\varphi + 3 \cdot \cos^2 2\varphi}{8}, \quad (22)$$

причем окружные волокна более напряжены если:

$$0,25 \cdot (1 - \nu) \cdot \psi \cdot (3 \cos 2\varphi - 2) \leq 1. \quad (23)$$

Для чисто металлического строения необходимо положить  $\psi = 0$ , откуда:

$$\sigma_{xm} = pD / 4 h_m, \quad \sigma_{zm} = pD / 2 h_m. \quad (24)$$

Для сферического днища безмоментные мембранные усилия равны:

$$N_x = N_{xz} = pD / 4. \quad (25)$$

Для спирального армирования  $\pm\varphi$ , при толщинах металлического и композитного слоя  $h_{md}$ ,  $h_{kd}$ , с учетом соотношений (3) имеем напряжения в металле и композите:

$$\sigma_{xm} = \frac{pD}{4 h_{md}} \cdot \frac{1 + \psi_d (\beta_{m1} + \nu \beta_{m2})}{1 + \psi_d \beta_1},$$

$$\sigma_{\text{ЗМ}} = \frac{\rho D}{4 h_{\text{МД}}} \cdot \frac{1 + \psi_{\text{Д}} (\beta_{\text{М2}} + \nu \beta_{\text{М1}})}{1 + \psi_{\text{Д}} \beta_1},$$

$$\sigma_{\text{К}} = \frac{\rho D \psi_{\text{Д}}}{4 h_{\text{КД}}} \cdot \frac{\beta_{\text{К1}} + (1 - \nu^2) \psi_{\text{Д}} \beta_{\text{К2}}}{1 + \psi_{\text{Д}} \beta_1}, \quad (26)$$

где параметр соотношения жесткостей определяется формулой:

$$\psi_{\text{Д}} = \frac{E_{\text{К}} h_{\text{КД}}}{E_{\text{М}} h_{\text{МД}}}, \quad (27)$$

а вновь введенные вспомогательные функции зависят от схемы армирования.

Для спирального армирования:

$$\beta_1 = 1 - \frac{1 + \nu}{2} \cdot \sin^2 2\varphi, \quad \beta_{\text{М1}} = \frac{(1 + \cos \varphi) \cdot \cos \varphi}{2},$$

$$\beta_{\text{М2}} = \frac{(-1 + \cos \varphi) \cdot \cos \varphi}{2}, \quad \beta_{\text{К1}} = 1 - \nu, \quad \beta_{\text{К2}} = \cos^2 2\varphi. \quad (28)$$

Для трансверсально-изотропного армирования тканью:

$$\beta_1 = \frac{3 - \nu}{4}, \quad \beta_{\text{М1}} = \nu_{\text{М2}} = 1/4, \quad \beta_{\text{К1}} = 1 - \nu, \quad \beta_{\text{К2}} = 1/4. \quad (29)$$

Другие схемы армирования для сферического днища практически не используются.

Для чисто металлического днища необходимо положить  $\psi_{\text{Д}} = 0$ , откуда:

$$\sigma_{\text{ХМ}} = \sigma_{\text{ЗМ}} = \rho D / 4 h_{\text{МД}}. \quad (30)$$

Для конического днища с углом конусности  $\alpha$  наибольшие безмоментные мембранные усилия равны:

$$N_x = pD / 4 \cos \alpha, \quad N_{xz} = pD / 2 \cos \alpha. \quad (31)$$

Напряжения определяются формулами, аналогичными формулам для цилиндрической оболочки, в которых необходимо заменить давление  $p$  на эффективное давление:

$$p_{\text{эфф}} = p / \cos \alpha, \quad (32)$$

а также заменить соответствующие толщины.

Для плоского днища, которое обычно бывает чисто металлическим, реализуется моментное напряженное состояние. Для консервативного расчета необходимо считать, что пластина днища оперта по контуру. Максимальные изгибные напряжения составляют:

$$\sigma_{xM} = \sigma_{zM} = \frac{3(3 + \nu)}{32} \cdot \frac{pD^2}{h_{\text{мд}}^2}. \quad (33)$$

Расчет краевых эффектов аналитическими методами возможен только для простейших случаев. В известных расчетных случаях толщина оболочки в переходной зоне считается постоянной, а форма оболочки является идеальной. Наиболее интересные случаи касаются следующих конструкций: жесткая заделка края цилиндрической оболочки; соединение цилиндрической оболочки с упругим кольцевым ребром, со сферическим днищем, с коническим днищем, с плоским днищем. Результаты этих решений состоят в том, что наиболее интенсивное напряженное состояние реализуется в цилиндрической оболочке на малом расстоянии от соединения. Здесь к продольным мембранным напряжениям  $\sigma_x = pD / 4 h_{\text{м}}$  добавляются изгибные напряжения, так что наибольшие напряжения равны:

$$\sigma_{x,\text{max}} = (1 + k_{\text{изг}}) \sigma_x. \quad (34)$$

Расчетные суммарные напряжения превышают окружные мембранные напряжения в цилиндрической части  $\sigma_z = pD / 2h_m$  в  $(1 + k_{изг}) / 2$  раз.

Например, для однородной изотропной оболочки при  $\nu = 0,3$  коэффициент увеличения напряжений, фигурирующий в (34), для соединения цилиндрической оболочки с жесткой заделкой, сферической оболочкой, конической оболочкой, плоским днищем, а также неполным сегментом сферической оболочки при малом радиусе скругления соединения  $\rho$  равен, соответственно:

$$k_{изг.зад} = 2,64, \quad k_{изг.сф} = 0,3, \quad k_{изг.кон} = \frac{1,86 \sin \alpha}{\cos \alpha + \sqrt{\cos \alpha}}$$

$$k_{изг.пл} = 1,5, \quad k_{изг.сегм} = 0,145 D / \rho. \quad (35)$$

Таким образом, максимальные напряжения в зонах краевого эффекта могут превышать безмоментные напряжения.

На практике проблему снятия или, по крайней мере, минимизации изгибных напряжений решают чисто конструктивными методами. Для этого в зоне соединения цилиндрической оболочки с днищем различной формы избегают острых углов, переход делают максимально плавным, а толщину этой зоны увеличивают по сравнению с толщиной основной части цилиндрической оболочки. Рекомендуемое увеличение толщины составляет до 1,5, а длина переходной зоны составляет:

$$L \geq (2 - 3,5) \sqrt{Dh}. \quad (36)$$

Другой подход оценки минимально необходимой длины утолщенного участка состоит в сравнении с толщиной:

$$L \geq (6 - 12) h \quad (37)$$

и, для реальных наиболее распространенных размеров сосудов, в абсолютных цифрах:

$$L \geq 30-60 \text{ мм}. \quad (38)$$

В результате этих конструктивных мер завышение напряжений в переходной зоне не превышает 5–10 %. В практических расчетах на прочность при рациональном проектировании конструкций это завышение вводится в коэффициент запаса, а расчет прочности производится по безмоментным напряжениям.

При поверочном расчете прочности найденные напряжения в композите сравниваются с допустимыми напряжениями композита:

$$[\sigma]_k = \sigma_{пч,к} / k_k, \quad (39)$$

где  $\sigma_{пч,к}$  – предел прочности композита;  
 $k_k$  – коэффициент запаса.

Эквивалентные напряжения в металле

$$\sigma_{эм} = \sqrt{\sigma_{xm}^2 + \sigma_{zm}^2} - \sigma_{xm} \sigma_{zm} \quad (40)$$

сравниваются с допустимыми напряжениями металла, которые определяются через предел текучести  $\sigma_T$  и предел прочности (временное сопротивление)  $\sigma_B$  с различными коэффициентами запаса:

$$[\sigma]_m = \min (\sigma_T/k_T, \sigma_B/k_B). \quad (41)$$

При выборе прочных размеров при заданном параметре  $\psi$  равенства

$$\sigma_{эм} \leq [\sigma]_m, \quad \sigma_k \leq [\sigma]_k, \quad (42)$$

разрешаются относительно толщин металлического и композитного слоев.

### 3. Пример аналитического расчета

Аналитический расчет проводился для баллона для огнетушащего газа БК-6601-400, изготавливаемого Котласским ЭМЗ [2]. Баллон состоит из цилиндрической металлической обечайки (лей-

нера), соединенной с полусферическим днищем. Внутренний диаметр лейнера и днища равен  $D = 305$  мм. Цилиндрическая часть армирована снаружи в окружном направлении композитным слоем. Переход цилиндрической части в днище, утолщение металла и утонение композита выполнены плавно. Строение стенок баллона по слоям показано на рис. 1. Характеристики упругости металлического и композитного слоев приведены в табл. 1.

Внутреннее давление в баллоне составляет  $p = 15$  МПа.

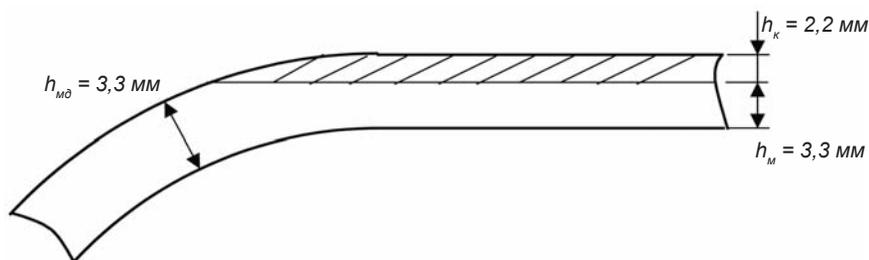


Рис. 1  
Строение стенок баллона по слоям

Таблица 1

**Характеристики упругости  
металлического и композитного слоев баллона**

Модуль упругости металла $E_m$ (15ХСНД), МПа	200 000
Коэффициент поперечной деформации металла $\nu$	0,3
Модуль упругости композита $E_k$ (ровинг РВМПН 10-1200-12, матрица КДА, ТЭАТ-1), МПа	60 000

Для цилиндрической части в соответствии с формулой (12) имеем:

$$\psi = \frac{E_k h_k}{E_m h_m} = 0,2. \quad (43)$$

Продольные напряжения в металле, окружные напряжения в металле, эквивалентные напряжения в металле и напряжения в композите в соответствии с формулами (11)–(13), (40) составляют:

$$\sigma_{xM} = \frac{\rho D}{4 h_M} = 346 \text{ МПа}, \quad \sigma_{zM} = \frac{\rho D}{4 h_K} \cdot \frac{(2 + \psi \nu)}{1 + \psi} = 594 \text{ МПа},$$

$$\sigma_{zM} = \sqrt{\sigma_{xM}^2 + \sigma_{zM}^2 - \sigma_{xM} \sigma_{zM}} = 517 \text{ МПа},$$

$$\sigma_K = \frac{\rho D}{4 h_K} \cdot \frac{\psi (2 - \nu)}{1 + \psi} = 147 \text{ МПа}. \quad (44)$$

Для сферической части в соответствии с формулой (30) получаем:

$$\sigma_{xM} = \sigma_{zM} = \rho D / 4 h_{Mд} = 191 \text{ МПа}. \quad (45)$$

Все результаты с точностью до 1 % совпадают с результатами расчета завода-изготовителя.

#### 4. Численный расчет методом конечных элементов

Для проверки влияния учета жесткости матрицы, а также краевого эффекта выполнен численный расчет с ненулевыми модулями композитного слоя для всех направлений. Расчет проводился с помощью программного продукта COSMOS/M. Длина цилиндрической части взята равной 150 мм, что гарантированно обеспечивает затухание краевого эффекта в цилиндрической части. На краю цилиндрической части поставлены граничные условия симметрии. Конструкция рассчитывалась осесимметричными 4-узловыми элементами типа PLANE; общее количество элементов – 2300.

При расчете приняты следующие модули упругости, сдвига и коэффициенты поперечной деформации для композита и металла, полученные приближенным пересчетом исходных данных:

$$E_{0z} = 60\,000 \text{ МПа}, \quad E_{0x} = E_{0y} = 8\,800 \text{ МПа}, \quad E_M = 200\,000 \text{ МПа},$$

$$G_{xy} = 3\,200 \text{ МПа}, \quad G_{xz} = G_{yz} = 3\,900 \text{ МПа}, \quad \nu_{xy} = \nu_{zx} = \nu_{zy} = \nu = 0,3.$$

Результаты расчета состоят в следующем.

Основная часть цилиндрической оболочки деформируется чисто окружным образом. Максимальное радиальное перемещение составляет 0,4 мм. Основная часть днища деформируется чисто сферическим образом. В переходной зоне отчетливо прослеживается краевой эффект, сопровождающийся продольным изгибом.

Радиальные напряжения пренебрежимо малы; основными расчетными напряжениями являются окружные, причем их завышение в зоне краевого эффекта очень мало (для металла в пределах 1 %, для композита в пределах 3 %). Продольные напряжения в металле меньше окружных, а их завышение в зоне краевого эффекта достигает 7 %. Эквивалентные напряжения меньше окружных. Сводка наиболее важных результатов численного расчета в сравнении с результатами аналитического расчета представлена в табл. 2.

Таблица 2

**Сводка основных результатов расчета баллона для огнетушащего газа**

Вид напряжения	Значение по аналитическому расчету, МПа	Максимальное значение по численному расчету, МПа	Значение вне зоны краевого эффекта по численному расчету, МПа
продольное в металле	346	382	355
окружное в металле	594	601	598
эквивалентное в металле	517	540	520
окружное в композите	147	160	155
продольное в днище	191	195	195
окружное в днище	191	195	195

**Анализ результатов и выводы.** Сопоставление результатов аналитического и численного расчетов вполне удовлетворительно.

Для основных максимумов (в том числе в зоне краевого эффекта) расхождение не превышает 5 %. Для некоторых второстепенных напряжений (например, продольные напряжения в композите) расхождение больше. Это объясняется неполной тождественностью исходных данных. В численном расчете учитывалась жесткость матрицы, что существенно повышает жесткость композита в продольном направлении.

В целом можно заключить, что аналитический расчет дает надежную оценку напряженного состояния, а погрешность, вызванная, в первую очередь, невозможностью расчета зоны краевого эффекта, должна компенсироваться увеличением коэффициента запаса при расчете прочности.

Выведенные аналитические формулы могут быть рекомендованы для оценки прочности сосудов под давлением.

### *Список литературы*

1. Васильев В.В. Механика конструкций из композиционных материалов. – М.: Машиностроение, 1990.
2. Баллон для огнетушащего газа. Технические условия. БК-6601-400 ТУ. Котласский ЭМЗ, 1993.

## **ОСНОВЫ РАСЧЕТА ОСТАТОЧНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ДЕТАЛЕЙ СУДОВЫХ ДВС**

Длительная работа особо нагруженных деталей оборудования, например коленчатого вала двигателя, в условиях циклических напряжений приводит к накоплению усталости металла, возникновению трещин и последующему их разрушению. По существу происходит качественное изменение материала, поэтому повторное использование подобных деталей возможно лишь при очень тщательном контроле их поверхностей на отсутствие трещин (особенно в местах концентраторов напряжений).

Для решения вопроса о возможности использования дорогостоящих деталей в новых жизненных циклах машины необходимо иметь достоверную оценку их усталостного состояния, на основе которой можно прогнозировать длительность работы до усталостного разрушения.

Известно, что характеристики сопротивления усталости материала являются случайными величинами. Их разброс объясняется различиями в микроструктуре и свойствах поверхностного слоя, которые, в свою очередь, связаны со случайными вариациями металлургических, термических и механических факторов. Напряжения, действующие в деталях ДВС, также имеют случайную природу вследствие нестабильности параметров рабочего процесса за счет колебаний цикловой подачи топлива, степени сжатия, частоты вращения и т. д. В этих условиях оправданы расчеты прочности, которые позволяют судить о долговечности детали с учетом рассеивания указанных характеристик прочности и напряжений.

Вероятностная трактовка прочности основывается на статистических законах распределения предела выносливости (прочности) и напряжений [1]. Если оба распределения известны и они независимы друг от друга, то вычисление вероятности отсутствия разрушения, вызванного усталостью материала, не представляет

больших затруднений. На рис. 1 показаны функции плотности распределения напряжений (линия 1) и прочности (линия 2), заштрихованное перекрытие функций – область возможного разрушения. Тогда вероятность работы детали без разрушения будет:

$$P(Y > 0) = \int_{-\infty}^{\infty} f(Y) dY,$$

где  $Y = \sigma_{-1} - \sigma$ , случайная величина, плотность распределения которой  $f(Y)$ .

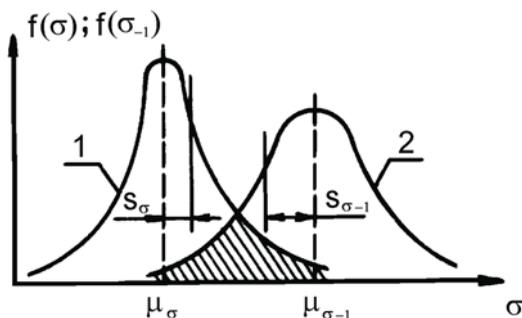


Рис. 1

Плотность распределения напряжений и предела выносливости

В практических расчетах вид функции  $f(Y)$  определяется законами распределений прочности  $f(\sigma_{-1})$  и напряжений  $f(\sigma)$ . Если они имеют нормальное распределение, то, согласно теории вероятности,  $Y$  также распределена нормально с математическим ожиданием  $\mu$  и средним квадратичным отклонением  $s$ :

$$\mu = \mu_{\sigma_{-1}} - \mu_{\sigma}; \quad s = \sqrt{s_{\sigma_{-1}}^2 + s_{\sigma}^2},$$

где  $\mu_{\sigma}$  и  $s_{\sigma}$ ;  $\mu_{\sigma_{-1}}$  и  $s_{\sigma_{-1}}$  – математическое ожидание и среднее квадратичное отклонение напряжений и прочности соответственно.

Для нормального закона распределения функция плотности имеет следующий вид:

$$f(Y) = \frac{1}{s\sqrt{2 \cdot \pi}} \exp \left[ -0,5 \left( \frac{Y - \mu}{s} \right)^2 \right].$$

График этой функции представляет собой колоколообразную кривую, стремящуюся к нулю при  $Y \pm \infty$ . Площадь под кривой  $f(Y)$  при  $Y > 0$  численно равна вероятности неразрушения. Трудоемкой операции интегрирования можно избежать, если перейти к нормированному нормальному распределению. Для этого нужно вычислить нижний предел случайной величины  $u = (Y - \mu)/s$  при  $Y = 0$

$$u_0 = \frac{\mu_{\sigma-1} - \mu_{\sigma}}{\sqrt{s_{\sigma-1}^2 + s_{\sigma}^2}} \quad (1)$$

и воспользоваться таблицами функции нормального распределения  $\Phi(u_0)$  [2]. После чего искомая вероятность

$$P(Y > 0) = \Phi(u_0) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \int_{-u_0}^{\infty} e^{-0,5 \cdot u} du.$$

Здесь следует отметить, что вероятность  $P(Y > 0)$  нежелательно использовать в качестве нормативного показателя долговечности по двум причинам. Во-первых, погрешность вычисления  $P(Y > 0)$  велика из-за необходимости выравнивания статистических данных по прочности и напряжениям. При этом выбор и проверка того или иного закона распределения по ограниченной выборке – задача с большими условностями. Во-вторых, вероятность  $P(Y > 0)$  для ответственных деталей находится в пределах  $0,98 \div 0,999$ . Малый диапазон изменения вероятности требует высокой точности исходных данных. На стадии эскизного проектирования выполнить это условие невозможно.

По указанной причине в инженерной практике более оправдано вычислять минимальное значение запаса прочности, при котором обеспечивается заданная вероятность отсутствия усталостных разрушений за  $N_b$  циклов нагружения [3]. Для получения такой расчетной зависимости коэффициент запаса прочности  $n_c$  и коэф-

коэффициенты вариации прочности  $v_{\sigma_{-1}}$  и напряжений  $v_{\sigma}$  представим, соответственно, как:

$$n_{\sigma} = \mu_{\sigma_{-1}} / \mu_{\sigma}; v_{\sigma_{-1}} = s_{\sigma_{-1}} / \mu_{\sigma_{-1}}; v_{\sigma} = s_{\sigma} / \mu_{\sigma}.$$

С учетом принятых обозначений (1) принимает вид:

$$u_0 = \frac{n_{\sigma} - 1}{\sqrt{v_{\sigma_{-1}}^2 \cdot n_{\sigma}^2 + v_{\sigma}^2}}. \quad (2)$$

Полученное уравнение позволяет нормировать минимальный запас прочности от желаемой вероятности неразрушения и заданных коэффициентов вариации прочности и напряжений. Решается оно методом последовательных приближений. Например, вероятности  $P(Y>0) = 0,988$  соответствует величина  $u_0 = 2,25$ . Если коэффициенты вариации  $v_{\sigma_{-1}} = 0,1$  и  $v_{\sigma} = 0,2$ , то на основании (2) имеем  $n_{\sigma_{\min}} \approx 1,57$ . При большем разбросе механических свойств материала и расчетных напряжений требуемый запас прочности возрастает.

Кроме структуры материала, способа получения заготовки, поверхностного упрочнения рассеивание прочностных свойств зависит от размеров детали, состояния ее поверхности и концентрации напряжений. Во многом это рассеивание определяется технологией изготовления, культурой производства, качеством контроля, заданными допусками и так далее. При наличии действия нескольких факторов, влияющих на разброс прочности детали, результирующее значение коэффициента вариации подсчитывается по формуле:

$$v_{\sigma_{-1}} = \sqrt{(v_{\sigma_{-1}1})^2 + (v_{\sigma_{-1}2})^2 + (v_{\sigma_{-1}3})^2 + \dots}$$

В случае отсутствия точных данных по характеристикам прочности допускается принимать коэффициент вариации из диапазона  $v_{\sigma_{-1}} = 0,04 \div 0,15$ . Значение  $v_{\sigma_{-1}} > 0,2$  свидетельствует о недостаточном уровне изготовления детали.

С некоторыми допущениями уравнения (2) и (3) справедливы и для других распределений прочности и напряжений или их раз-

личных сочетаний. В качестве примера рассмотрим случай, когда прочность имеет распределение Вейбулла, а напряжение подчиняется нормальному закону. Такая композиция довольно хорошо описывает усталостное разрушение деталей. Плотность распределения Вейбулла:

$$f(\sigma_{-1}) = \left[ \frac{b}{(a-c)^b} \right] \cdot (\sigma_{-1} - c)^{b-1} \cdot \exp \left[ - \left( \frac{\sigma_{-1} - c}{a-c} \right)^b \right], (\sigma_{-1} \geq c)$$

где  $b$  – параметр формы;  
 $(a - c)$  – параметр масштаба;  
 $c$  – параметр усечения. Часто полагают  $c = 0$ .

Математическое ожидание и среднее квадратичное отклонение этого распределения определяются по формулам:

$$\mu_{\sigma_{-1}} = c + (a - c) \cdot \Gamma(b^{-1} + 1);$$

$$s_{\sigma_{-1}} = (a - c) \sqrt{\Gamma(2 \cdot b^{-1} + 1) - [\Gamma(b^{-1} + 1)]^2},$$

где  $\Gamma(m) = \int_0^{\infty} e^{-z} \cdot z^{m-1} \cdot dz$  – гамма-функция.

Точное значение вероятности неразрушения рассматриваемой композиции распределений прочности и напряжений можно вычислить по формуле:

$$P(Y > 0) = \Phi \left( \frac{c - \mu_{\sigma}}{s_{\sigma}} \right) + \frac{2}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \left( \frac{a - c}{s_{\sigma}} \right) \cdot \int_0^{\infty} \exp \left\{ -y^b - 1/2 \left[ \left( \frac{a - c}{s_{\sigma}} \right) y + \frac{c - \mu_{\sigma}}{s_{\sigma}} \right]^2 \right\} dy.$$

Для вычисления этой вероятности пользуются методами численного интегрирования.

Наряду с законом Вейбулла рассеивание  $\sigma_{-1}$  нередко описывают логарифмически нормальным распределением. Для этого распределения функция плотности имеет следующий вид:

$$f(\sigma_{-1}) = \frac{1}{\nu \cdot \sigma_{-1} \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \exp \left[ -\frac{1}{2 \cdot \vartheta^2} (\ln \sigma_{-1} - \nu)^2 \right].$$

Математическое ожидание и среднее квадратичное отклонение:

$$\mu_{\sigma_{-1}} = \exp(\nu + \vartheta^2/2), \quad s_{\sigma_{-1}} = \exp(2 \cdot \nu + \vartheta^2) \cdot (\exp \vartheta^2 - 1).$$

Преыдущие рассуждения справедливы для долговечности, при которой ресурс детали измеряется числом циклов нагружения  $N_B$ . Оно соответствует точке перелома кривой усталости (рис. 2) и делит ее на две ветви, каждая из них описывается своим уравнением:

$$\sigma^{m_1} \cdot N = \sigma_{-1}^{m_1} \cdot N_B, \quad \text{при } N > N_B;$$

$$\sigma^{m_2} \cdot N = \sigma_{-1}^{m_2} \cdot N_B, \quad \text{при } N < N_B,$$

где  $N$  – текущее число циклов нагружения;  
 $m_1$  и  $m_2$  – коэффициенты наклона ветвей. При отсутствии достоверных данных их значениями задаются:  $m_1 = 8 \div 10$ ,  $m_2 = 3 \div 5$ .

Во время эксплуатации двигателя в его деталях происходит накопление усталостных повреждений. Понятно, что этот необратимый процесс связан с уменьшением коэффициента запаса прочности при увеличении наработки. На основании последних уравнений изменение запаса прочности во времени можно представить так:

$$n_{\sigma t} = \frac{n_{\sigma}}{n_{\sigma \min}} \left( \frac{t_B}{t} \right)^{1/m_1}, \quad \text{при } t > t_B; \quad n_{\sigma} = \frac{n_{\sigma}}{n_{\sigma \min}} \left( \frac{t_B}{t} \right)^{1/m_2}, \quad \text{при } t < t_B.$$

К обозначениям, принятым ранее, здесь добавляются:

$n_{\sigma}$  – коэффициент запаса прочности для новой детали, подсчитывается по формулам С.В. Серенсена и Р.С. Кинасошвили [1] без учета характеристик рассеивания;

$t$  – текущая наработка в часах;

$t_B$  – наработка, соответствующая  $N_B$  циклам нагружения, в общем случае:

$$t_B = N_B / (60 \cdot n),$$

где  $n$  – номинальная частота вращения коленчатого вала, мин<sup>-1</sup>.

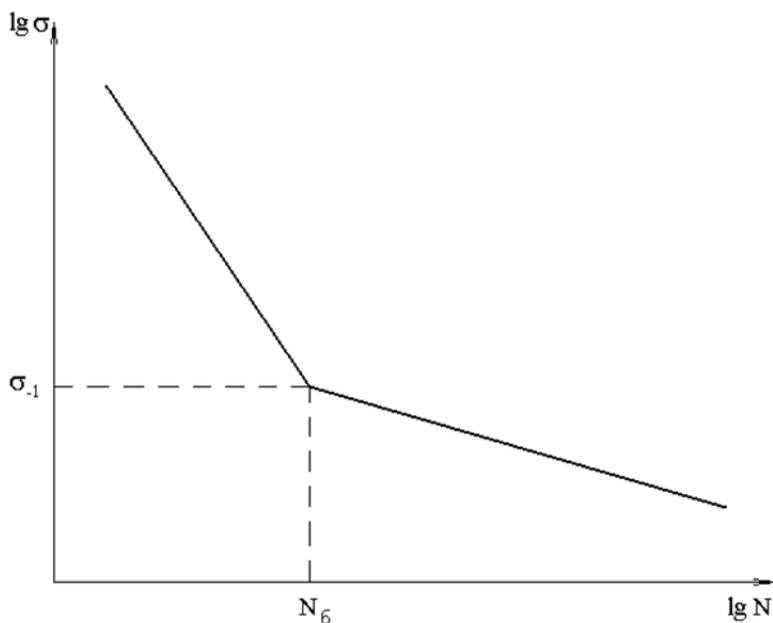


Рис. 2  
Кривая усталости

Для реальной эксплуатации двигателя характерно нерегулярное нагружение деталей. Вид нагрузочного цикла определяется спецификой работы. Так, судовые главные ДВС 85÷90 % эксплуатационного времени работают на ходовом режиме с мощностью 0,6÷0,85 от номинальной. Остальное время (10÷15 %) – режимы маневрирования. Тепловозные двигатели на режимах, близких к номинальному, работают 5÷20 % всего ресурса, а на режиме хо-

лостого хода – 45÷50 %. Учитывать переменность режимов при расчете долговечности детали до усталости удается наиболее просто с помощью линейной гипотезы накопления повреждений [6]. Суть гипотезы заключается в том, что доля поврежденности при любом уровне нагруженности прямо пропорциональна отношению  $n_\sigma / n_{\sigma \min}$ . Разрушение произойдет, когда сумма этих долей составит единицу. Такая формулировка дает следующую зависимость для долговечности детали:

$$t = \frac{t_B}{\sum_{i=1}^p \frac{x_i}{(n_{\sigma i} / n_{\sigma \min})^{m_1}}},$$

где  $p$  – количество режимов нагрузочного цикла;

$x_i$  – доля времени работы двигателя на  $i$ -ом режиме,  $\sum_{i=1}^p x_i = 1$ .

Приведенная формула устанавливает соотношения между долговечностью детали, вероятностью ее неразрушения, расчетными коэффициентами запаса прочности и законами распределения прочности и напряжений.

Износ является результатом изнашивания. Под изнашиванием понимают процесс постепенного изменения размеров и формы тела при трении за счет отделения с поверхности трения материала. Наиболее часто износ характеризуется изменением размера детали – линейный износ  $I$ . Реже используются показатели изменения объема – объемный износ  $I_{об}$  или износ массы детали  $M_m$ .

Износ является функцией времени, в связи с чем одним из основных показателей износа является скорость изнашивания  $v_u$ , которая определяется отношением:

$$v_u = I / t,$$

где  $t$  – время, в течение которого наблюдается износ.

Различают мгновенную и среднюю скорость изнашивания. На практике чаще пользуются средней скоростью изнашивания, так как с ее помощью удается легко прогнозировать износ, не прибегая

к сложным интегральным зависимостям. При известной величине износа остаточный ресурс детали определяется зависимостью:

$$T = \frac{I_{пр} - I}{v_u},$$

где  $I_{пр}$  – предельный износ, характеризующий состояние изношенной поверхности, при которой дальнейшая эксплуатация детали должна быть прекращена во избежание аварийной ситуации.

Представленные рассуждения справедливы для деталей, не образующих пар трения. Более актуальной является оценка остаточного ресурса для пар трения, свойственных ДВС. Под парой трения будем понимать совокупность двух подвижно соприкасающихся поверхностей, соответственно предельным износом пары трения является предельный зазор. Его величина задается, прежде всего, из технических условий безопасности эксплуатации механизма и экономических соображений. Деление критериев предельного зазора на технические и экономические условно, поскольку изменение технических показателей имеет, как правило, экономические последствия в части использования двигателя, только в менее явном виде.

Существующие вероятностные методы определения предельных зазоров не получили еще достаточного применения. Чаще всего предельные зазоры в подшипниках и кинематических парах назначают в процессе создания двигателя по нормативным данным или по аналогии с существующими прототипами. Предельные зазоры заносят в формуляр двигателя, а поэтому они являются данными технических условий на поставку и эксплуатацию судового двигателя. Представляет интерес взаимосвязь предельного зазора в сопряжении и предельных износов деталей, входящих в сопряжение. Величину предельного зазора сопряжения можно выразить в следующем виде:

$$I_{з.пр} = Z_{нач} + \Delta Z_n,$$

где  $Z_{нач}$  – начальный зазор сопряжения;

$\Delta Z_n$  – предельное увеличение зазора, равное сумме износов рабочих поверхностей деталей, составляющих сопряжение, то есть:

$$\Delta Z_n = I_1(t) + I_2(t).$$

Учитывая, что  $I_1$  и  $I_2$  являются случайными функциями времени, можно считать, что скорость изнашивания одной детали является не постоянной величиной, а изменяется в определенных пределах в зависимости от износа другой детали, другими словами существует корреляция между  $I_1$  и  $I_2$ .

Изложенное, по существу, можно рассматривать в виде упрощенной модели для приближенной оценки изнашивания пар трения и прогнозирования их остаточной долговечности. В общем случае зависимость износа детали как случайной функции наработки может быть представлена в виде:

$$I(t) = a t^\beta + b, \quad (3)$$

где  $a$  – случайная величина, зависящая от свойств поверхностей деталей сопряжения, условий нагружения, вида смазки и типа трения;

$\beta$  – коэффициент, численно равный: для подшипников скольжения – 0,5...0,7, для пары поршень-втулка цилиндра – 0,9...1,1;

$b$  – износ по окончании приработки, зависящий от шероховатости поверхностей, их твердости, величины установленного зазора.

В большинстве случаев величина износа деталей за период приработки не превышает величины допуска на их изготовление. Это позволяет при расчетах величиной износа детали в период приработки пренебречь, в этом случае зависимость износа деталей от времени можно представить в следующем виде:

$$I(t) = a t^\beta. \quad (4)$$

В соответствии с приведенной формулой для износа зависимость для определения ресурса пары трения запишется в виде:

$$t = \left( \frac{I_{з.пр}}{a} \right)^{1/\beta}. \quad (5)$$

С учетом зависимости (3) остаточный ресурс пары трения составит:

$$T = t - t_0,$$

где  $t_0$  – наработка на момент начала реновационно-восстановительного ремонта.

Коэффициенты, составляющие основу формул (3) и (4), уточняются на основании данных о характере нагружения подшипника, условия эксплуатации двигателя, качества обслуживания и ремонта. Естественно, эти коэффициенты являются случайными аргументами, зависящими не только от предыстории эксплуатационного периода, но и факторов, которые могут оказывать свое влияние в будущем. Данный факт вынуждает говорить о среднем значении  $m_t$  и дисперсии  $D_t$  ресурса пары трения. Приблизительно значения  $m_t$  и  $D_t$  могут быть получены путем разложения функции (4) в ряд Тейлора и применения теоремы о числовых характеристиках случайных величин. В окончательном виде эти зависимости принимают вид:

$$m_t = \left( \frac{I_{з.нр}}{m_a} \right)^{1/\beta} \left[ 1 + \frac{(\beta + 1) D_a}{(2 \beta^2) m_a^2} \right]; \quad D_t = \frac{I_{з.нр}^{1/\beta} D_a}{\beta^2 (m_a)^{1/\beta + 2}} \left[ 1 + \frac{(\beta + 1)^2 D_a}{2 \beta^2 (m_a)^2} \right],$$

где  $m_a$  – среднее значение коэффициента  $a$ ;  
 $D_a$  – дисперсия коэффициента  $a$ .

Более точно математическое ожидание и дисперсия могут быть подсчитаны по интегральным зависимостям:

$$m_t = \int_0^{\infty} t(a) f(a) da; \quad D_t = \int_0^{\infty} [t(a)]^2 f(a) da - m_t^2,$$

где  $f(a)$  – плотность вероятности распределения коэффициента  $a$ . Часто считают, что  $f(a)$  подчиняется усеченному нормальному закону распределения.

Практически все характеристики износа могут быть вычислены с помощью метода Монте-Карло. При этом процесс вычисления сводится к многократным расчетам искомого ресурса  $t$  согласно зависимости (5). Для каждого такого расчета (часто называемого статистическим испытанием) численные значения  $a$  выбираются

случайным образом из заданного предела их возможного изменения с учетом также заданного закона распределения. Согласно полученным дискретным значениям  $t$  могут быть подсчитаны  $m_t$  и  $D_t$ . Данный алгоритм реализован в программе определения остаточного ресурса главного судового двигателя.

### *Список литературы*

1. Когаев В.П. Расчеты на прочность при напряжениях, переменных во времени. – М.: Машиностроение, 1977. – 232 с.
2. Джонсон Н., Лион Ф. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке. – М.: Мир, 1980. – 510 с.
3. Салтыков М.А. Прочность ДВС. Методы и средства обеспечения. Учебное пособие. – М.: МГОУ, 1995. – 90 с.
4. Кравченко В.С. Вероятностные характеристики сопротивления усталости материала судовых торсионных валов при поверхностном упрочнении // Судостроение. – № 10. – 1990. – С. 26 – 30.
5. Ефремов Л.В. Практика инженерного анализа надежности судовой техники. – Л.: Судостроение, 1980. – 176 с.
6. Коллинз Дж. Повреждение материалов в конструкциях. Анализ, предсказание, предотвращение. – М.: Мир, 1984. – 624 с.
7. Румб В.К., Медведев В.В. Методические основы вероятностного расчета прочности и долговечности деталей ДВС // Двигателестроение. – № 4. – 2003. – С. 22 – 24.

УДК 621.1.504.75

*В.И. Евенко, Г.В. Егоров, А.А. Сергеев, В.В. Гришкин*

### **ОБОСНОВАНИЕ ПОВЫШЕННЫХ ТРЕБОВАНИЙ РЕГИСТРА К СУДАМ СО ЗНАКАМИ ЭКО И ЭКО ПРОЕКТ В СИМВОЛЕ КЛАССА**

Наблюдаемое в последние десятилетия увеличение масштабов последствий аварий и катастроф связано, во многом, с применением более мощных технических средств, выход которых из строя более опасен, чем существовавших ранее. Качественно новый этап информатизации обеспечивает быстрое оповещение мировой общественности о подробностях этих происшествий (Интернет, CNN и др.). Укрепили свои позиции экологические организации, их влияние на политику и социум стало значительным. Человеческая жизнь в развитом обществе стала дороже (и в прямом, и в переносном смысле).

Неконтролируемые и нерегулируемые выбросы в моря и водоемы различных отходов и нефтепродуктов, катастрофические разливы нефти и вредных веществ, загрязнения атмосферы озоноразрушающими и другими токсичными веществами создали условия необратимости процессов в экосистеме планеты, представляющих угрозу для биосферы, здоровья и жизни людей.

По данным Международной Морской Организации (ИМО), общие убытки от катастроф на море составляют ежегодно (без учета людских потерь) 7,3 млрд. долларов.

Страховое общество P&I Club [5] в 1990-х гг. выплачивало в среднем на каждый случай загрязнения окружающей среды страховую сумму в размере 750 000 долларов, что практически в два

раза выше средних страховых выплат по иным причинам. Для танкеров – судов, перевозящих опасные для окружающей среды грузы, – средняя выплата составила 1 млн. долларов (для сравнения, у сухогрузов – 300 000 долларов).

В Мексиканском заливе на каждый миллиард баррелей добытой нефти при перевозке танкерами приходилось 3,9 случая аварийного разлива объемом более 1000 баррелей.

Как следствие, появилось ясное понимание того, что человеческое сообщество должно исключить катастрофические техногенные воздействия на окружающую среду и минимизировать негативные последствия таких воздействий.

Задача повышения эффективности отдельных систем и судна в целом с учетом критериев экологической безопасности и риска стала во многом определять критерии и принципы современного проектирования, в том числе и в судоходстве.

Требования к экологической безопасности судов сформулированы в виде обязательных и дополнительных групп нормативов (см. рис. 1). Под обязательными понимаются документы, принятые



Рис. 1

Система обязательных и дополнительных требований по защите окружающей среды на морском транспорте

правительством страны флага для обязательного исполнения на международном (ООН, ИМО, Дунайская комиссия и др.) или национальном уровне (Российская Федерация, Германия и др.), под дополнительными – необязательные (добровольные) требования, разработанные отдельными организациями (PC, GL, ABS, LR, DNV, BP, Shell, Statoil и пр.) или объединениями организаций (OCIMF и пр.).

По имеющимся данным вероятность аварии той или иной степени тяжести для танкера водоизмещением более 6 000 т составляет 2 % в год. Средний суммарный разлив нефти в 1970–1989 гг. оценивался около 400 000 т в год.

При этом отмечались значительные единовременные загрязнения. При аварии танкера «Torrey Canyon» в 1967 г. за борт вылилось 95 000 т нефти, танкера «Amoco Cadiz» в 1978 г. – 220 000 т. При разливе 40 000 т нефти в результате аварии танкера «Exxon Valdez» в 1989 г. затраты на очистку побережья составили 2 млрд. долларов, компенсационные выплаты за загрязнение окружающей среды и населению – 3,5 млрд. долларов. Авария танкера «Braer» в 1993 г. привела к разливу 85 000 т нефти.

По некоторым данным, стоимость ущерба от одной тонны нефти, попавшей в воду, может достигать (при значительных разливах) до 40 000 долларов.

В США в 1990 г. был принят Oil Pollution Act (OPA-90), который впервые сформулировал требования о необходимости наличия двойного корпуса для морских танкеров.

Последующие переломы корпусов судов «Эрика» и «Престиж» со значительным ущербом для моря и побережья Японии, Франции и Испании соответственно, потребовали дальнейших исследований проблемы безопасности нефтеналивных судов и танкеров-химовозов в рамках формализованной оценки безопасности (ФОБ).

В течение 2008 года все танкера дедвейтом 600 т и более, перевозящие тяжелые сорта нефти и нефтепродуктов и совершающие международные рейсы, должны будут иметь двойной корпус, удовлетворяющий требованиям Международной конвенции МАРПОЛ 73/78. Ранее такие требования были введены для танкеров дедвейтом 5000 т и более.

Анализ показал, что наличие двойного корпуса у танкеров приводит к росту:

металлоемкости корпуса – на 15÷30 %;  
трудоемкости изготовления корпусных конструкций – на 15÷35 %;  
сроков постройки судна – на 15÷25 %;  
строительной стоимости танкера – на 20÷30 %;  
эксплуатационных расходов – на 15÷20 %.

При этом можно прогнозировать, что двойной контур, т. е. пассивная конструктивная защита корпуса, позволит снизить суммарный разлив нефти до 120 000 – 200 000 т в год.

Как результат, удельная стоимость конструктивных мероприятий по снижению разливов нефти на одну тонну загрязнения составит около 25 000 – 30 000 долларов.

Предварительные результаты ФОб свидетельствуют также о целесообразности увеличения требований к общей прочности танкеров с соответствующим ростом металлоемкости и стоимости корпусов [1–3].

Предлагаемые меры достаточно дороги.

С позиций ФОб [6] существуют иные, более дешевые способы повышения безопасности судоходства и сокращения аварийного вылива нефти и нефтепродуктов в море.

Речь идет об организационно-технических мероприятиях по снижению роли человеческих ошибок, реализованных в виде специальных руководств, планов и инструкций, судового программного обеспечения [4].

Именно человеческий фактор является в 60–80 % случаев причиной загрязнения окружающей среды, поэтому подобные организационно-технические мероприятия могут быть не менее эффективными мерами в борьбе за экологическую безопасность, чем конструктивные («пассивные») меры.

Например, по данным Advisory Committee on Pollution of the Sea, 66 % из 182 случаев загрязнения нефтью и нефтепродуктами в прибрежных водах Великобритании произошли в результате действия человеческого фактора.

Российский морской регистр судоходства (РС) и ряд других классификационных обществ разработали дополнительные требования, направленные на повышение стандартов экологической безопасности и охраны окружающей среды, широко использующие помимо конструктивных мер (двойного корпуса в районе грузовых танков,

цистерн нефтеостатков и нефтесодержащих вод, цистерн запаса топлива) мероприятия организационно-технического характера.

Судам, соответствующим новым требованиям, могут быть присвоены дополнительные знаки в символе класса (см. табл. 1).

Таблица 1

**Дополнительный знак экологической безопасности в символе класса**

Классификационное общество	Дополнительный знак в символе класса
PC	«ЭКО» и «ЭКО ПРОЕКТ»
DNV	CLEAN и CLEAN DESIGN
GL	EP
ABS	ES

Требования к судам со знаками «ЭКО» и «ЭКО ПРОЕКТ» в символе класса были введены PC в 2006 г. и применяются по желанию судовладельца.

Суда с подобными знаками в символе класса более безопасны по отношению к морской среде и пользуются бóльшим доверием со стороны грузовладельцев, страховщиков, Морских администраций государств флага, портовых властей.

Присвоение судну дополнительного «экологического» знака в символе класса основывается на выполнении требований ИМО, морских администраций и международной морской индустрии к экологической безопасности судов. При этом отдельные положения дополнительных «экологических» требований классификационных обществ являются более строгими, чем требования действующих международных документов.

В первую очередь, дополнительные знаки экологической безопасности в символе класса востребованы теми судовладельцами, которые предлагают свои суда ведущим международным фрахтователям.

Достигнуто это путем принятия дополнительных технических и организационно-технических мер (см. рис. 2) по предотвращению

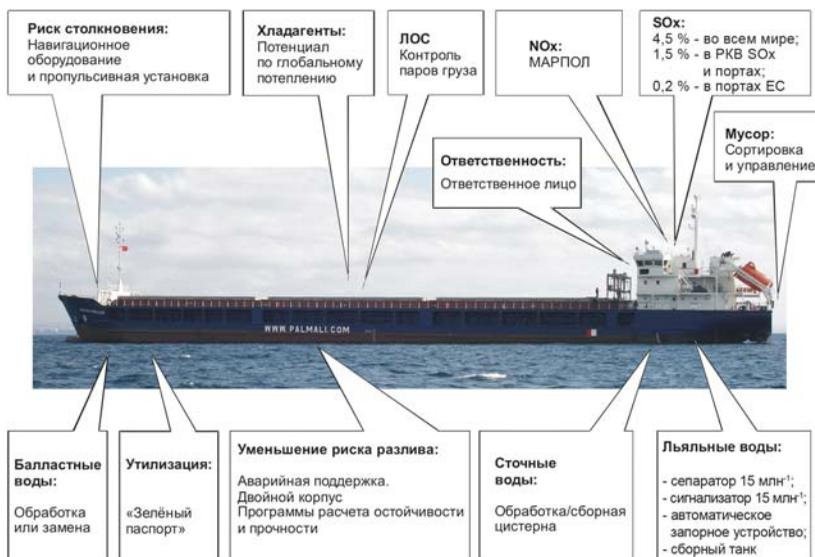


Рис. 2  
Основное содержание требований к судам со знаком «ЭКО»  
в символе класса

загрязнения атмосферы выбросами из главного двигателя, котлов, из систем, содержащих вредные вещества; предотвращению загрязнения морской среды остатками груза, льяльными и сточными водами, мусором и различного вида техническими маслами; предотвращению переноса вредных патогенных организмов вместе с балластными водами.

Считается, что таким дополнительным требованиям судовладелец будет стремиться соответствовать исключительно по своей воле с целью продемонстрировать фрахтователям преимущества его судов перед судами других владельцев.

Затраты судовладельцев по строительству таких судов или переоборудованию существующих будут окупаться на стадии эксплуатации.

Целью РС при введении более высоких экологических требований является фактическое повышение уровня безопасности окружающей среды (см. рис. 3).

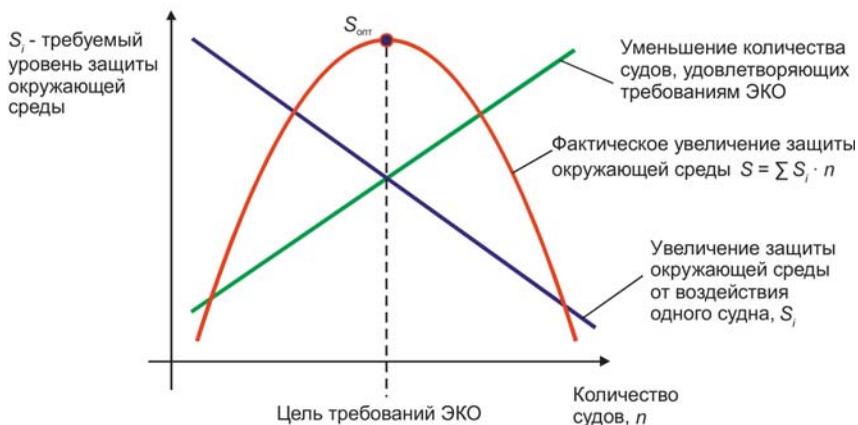


Рис. 3

Основная цель создания классов повышенной экологической безопасности

Однако простое ужесточение требований может не привести к желаемому суммарному эффекту, так как чем больше затрат, которые должен понести судовладелец, тем меньше будет судов, которые будут таким требованиям удовлетворять, соответственно, учитывая добровольный характер предлагаемых требований, следует определить оптимальный набор положений, которые, с одной стороны, будут обеспечивать дополнительную защиту окружающей среды и, с другой стороны, будут востребованы клиентами.

Поэтому при решении задачи поиска «оптимума» экологической безопасности судов следует ясно представлять цели применения вышеуказанных требований для присвоения судам в их символе класса знаков ЭКО и ЭКО ПРОЕКТ.

В частности, подобные добровольные процедуры имеют большое значение при работе с т. н. первоклассными фрахтователями, в первую очередь, мировыми нефтяными и газовыми компаниями (BP, Shell, Statoil и др.), для которых обеспечение экологической безопасности при транспортировке опасных грузов, является приоритетным направлением деятельности.

Указанная особенность подчеркивает неразрывную взаимосвязь между такой добровольной процедурой обеспечения повы-

шенного стандарта экологической безопасности судов и перевозками морским транспортом опасных грузов.

При этом «ЭКО» (аналог знака CLEAN в классификации DNV) – знак в символе класса, указывающий на соответствие судна основным требованиям по контролю и ограничению эксплуатационных выбросов и сбросов, который рекомендуется присваивать судам в постройке и существующим судам. Указанные требования основываются большей частью на положениях Международной конвенции МАРПОЛ 73/78, в отдельных случаях являясь более строгими.

В свою очередь «ЭКО ПРОЕКТ» (CLEAN DESIGN) – знак в символе класса, указывающий на соответствие судов дополнительным требованиям по контролю и ограничению эксплуатационных выбросов и сбросов. Данный знак рекомендуется присваивать судам на стадии проектирования, существующим пассажирским судам и судам прибрежного плавания.

В табл. 2 отмечены основные технические решения РС по снижению риска негативного воздействия со стороны судна на окружающую среду в зависимости от уровня дополнительной защиты.

Таблица 2

**Требования РС для судов со знаками «ЭКО» и «ЭКО ПРОЕКТ»  
в символе класса**

Требования	Знаки в символе класса	
	«ЭКО»	«ЭКО ПРОЕКТ»
1	2	3
Нефтяные танкеры дедвейтом 600 т и более, а также другие суда, имеющие общую емкость топливных танков 600 м <sup>3</sup> и более, должны быть введены в систему быстрого доступа к компьютеризированным береговым программам расчета остойчивости в поврежденном состоянии и остаточной конструктивной прочности	+	+

1	2	3
Любое судно должно иметь класс автоматизации механической установки <b>A1</b> или <b>A2</b>	+	+
Любое судно должно быть снабжено бортовым программным обеспечением для выполнения расчетов посадки, остойчивости, прочности неповрежденного судна и расчетов аварийной посадки и остойчивости, а также специальным программным обеспечением для планирования замены водяного балласта в море	+	+
Суда, имеющие общую емкость топливных танков 600 м <sup>3</sup> и более, должны иметь двухкорпусную конструкцию для защиты топливных танков с расположением таких танков, как определено в новом правиле 12А Приложения I к МК МАРПОЛ 73/78	+	+
Судно, у которого емкость какого-либо топливного танка или танка нефтеостатков превышает 30 м <sup>3</sup> , должно иметь двухкорпусную конструкцию для защиты таких танков с их расположением, как определено в пп. 6 и 7 нового правила 12А Приложения I к МК МАРПОЛ 73/78, даже если общая емкость топливных танков – менее 600 м <sup>3</sup>	–	+
Любое судно должно соответствовать базовым (основным применимым) требованиям части V «Навигационное оборудование» Правил по оборудованию морских судов в части оснащения навигационным оборудованием и системами, их размещения на ходовом мостике и, в дополнение, должно быть оснащено автоматической системой предотвращения посадки на мель, а информация о маневренных характеристиках судна должна быть доступна на ходовом мостике	–	+

В табл. 3 перечислены организационно-технические меры РС по снижению риска негативного воздействия со стороны судна на окружающую среду в зависимости от знака в символе класса – «ЭКО» или «ЭКО ПРОЕКТ». Такие меры направлены в первую очередь на управление человеческим фактором.

Таблица 3

**Мероприятия эксплуатационного характера  
по управлению человеческим фактором**

Эксплуатационные процедуры	Знаки в символе класса	
	«ЭКО»	«ЭКО ПРОЕКТ»
1	2	3
одобренная Инструкция по мониторингу выбросов SOx на судне (ОММ), если применимо	+	+
одобренный План соответствия району ограничения выбросов SOx (SCP)	+	+
процедура подготовки топливной системы судна для работы в районах контроля выбросов SOx	+	+
одобренный план операций с топливом, Журнал операций с топливом	+	+
одобренное судовое Руководство по безопасной замене балласта в море, Журнал балластных операций	+	+
одобренное судовое программное обеспечение для расчетов посадки, остойчивости и прочности неповрежденного судна, одобренные специальные компьютерные программы по замене балласта в море	+	+
одобренный План чрезвычайных мер по предотвращению загрязнения нефтью	+	+

1	2	3
наличие быстрого доступа к признанным компьютеризированным береговым программам расчета остойчивости в поврежденном состоянии и остаточной конструктивной прочности	+	+
процедура по управлению холодильными операциями	+	+
одобренный план операций со сточными водами, Журнал операций со сточными водами	+	+
журнал обнаружения эксплуатационных утечек смазочного масла и масла гидравлики на поверхности воды	+	+

По данным DNV по состоянию на февраль 2005 г. классы CLEAN и CLEAN DESIGN были присвоены более чем 340 судам. Безусловными лидерами являются владельцы нефтетанкеров, танкеров-химовозов и судов снабжения буровых платформ (см. рис. 4).

Около 10 % заказчиков определили свой интерес к повышению экологической безопасности в рамках требований класса CLEAN DESIGN, причем суда-снабженцы явно преобладают, за ними идут в равной доле нефтетанкеры и пассажирские суда (см. рис. 5).

Первым в истории российского судостроения судном, которому в символ класса PC внесен знак экологической безопасности «ЭКО», стал многоцелевой сухогруз «Мирзага Халилов» проекта RSD17.

Серия из таких пяти судов типа «Еврокруизер» построена на заводе «Красное Сормово» для группы компаний «Палмали» по проекту Морского Инженерного Бюро.

Суда проекта RSD17 в соответствии с принятой в Бюро классификацией относятся к т. н. «азовским пятитысячникам» с повышенной грузоподъемностью, имеют при характерной для устьевых российских портов Азовского моря осадке 4,50 м дедвейт около 5350 т и предназначены для транспортировки генеральных, навалочных, лесных, зерновых и крупногабаритных грузов, контей-

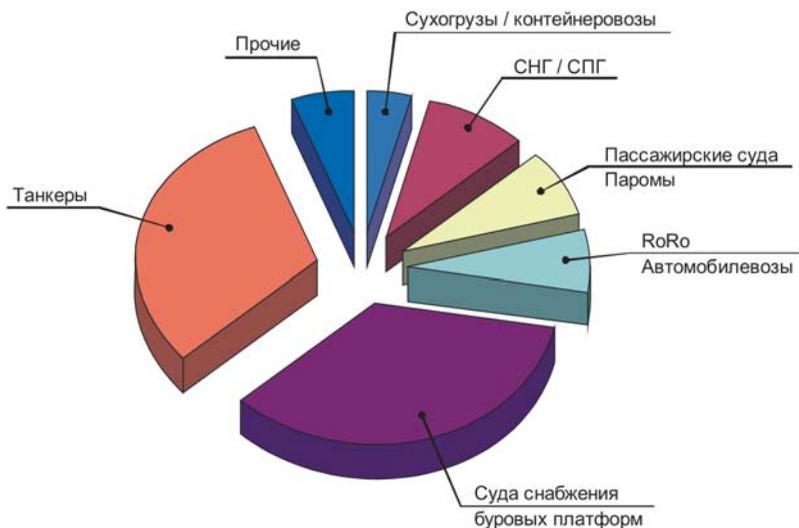


Рис. 4  
Распределение интересов судовладельцев к классам CLEAN  
(по типам судов) по данным DNV

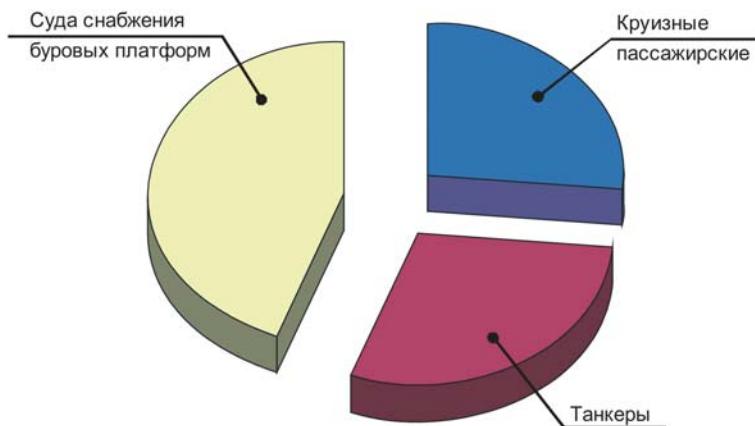


Рис. 5  
Распределение интересов судовладельцев к классу  
CLEAN DESIGN (по типам судов) по данным DNV

неров международного стандарта высотой 8,5 и 9 футов, а также значительного перечня опасных грузов классов 1.4S, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 9 и грузов, приведенных в Приложении В Кодекса ВС.

После выхода нормативных документов РС о порядке назначения судам знака «ЭКО» судно «Мирзага Халилов» было предъявлено для освидетельствования и в настоящий момент судно имеет класс **КМ** ⊗ **ЛУ2 I A1 ECO**. Эксплуатация предусматривается в Средиземном, Каспийском, Черном, Балтийском, Белом, Северном морях, включая рейсы вокруг Европы и в Ирландское море зимой с грузами первоклассных фрахтователей, для которых наличие знака «ЭКО» в символе класса является основанием для выбора именно судов проекта RSD17.

Архитектурно-конструктивный тип судна проекта RSD17 – стальной однопалубный, одновинтовой теплоход, с баком и ютом, с кормовым расположением рубки и машинного отделения (МО), с двойным дном высотой 1000 мм от форпиковой до ахтерпиковой переборки, двойными бортами шириной 1900 мм в районе грузовых трюмов, тремя трюмами, с бульбовой носовой и транцевой кормовой оконечностями (см. рис. 6).

Повышение общего уровня безопасности и снижение риска перевозки грузов обеспечивается резервированием движения за счет использования валогенератора в качестве гребного электродвигателя для привода гребного винта и наличием двойного корпуса, в том числе в местах расположения основных запасов топлива.

Движение и управляемость судна обеспечивается одним винтом регулируемого шага диаметром 3,40 м и рулем фирмы Роллс-Ройс с закрылком типа «Бекер» (см. рис. 7). Площадь пера руля – 8,4<sup>1</sup> м<sup>2</sup>, наибольший угол поворота руля – 45°, закрылка – 37,6° дополнительно.

Проведенные 22 октября 2006 г. на Куйбышевском водохранилище исследовательской партией ВГАВТ ходовые испытания зафиксировали на переднем ходу при 85 % максимальной длительной мощности (МДМ) скорость 12,5 узлов.

При проведении инерционных испытаний с полного заднего на полный передний ход тормозной путь составил 565,0 м (4,64L), время торможения 3 мин 15 с.

При проведении маневров типа «зигзаг» установлено, что при перекладке руля на 10° первый угол зарыскивания составляет 5,2°,

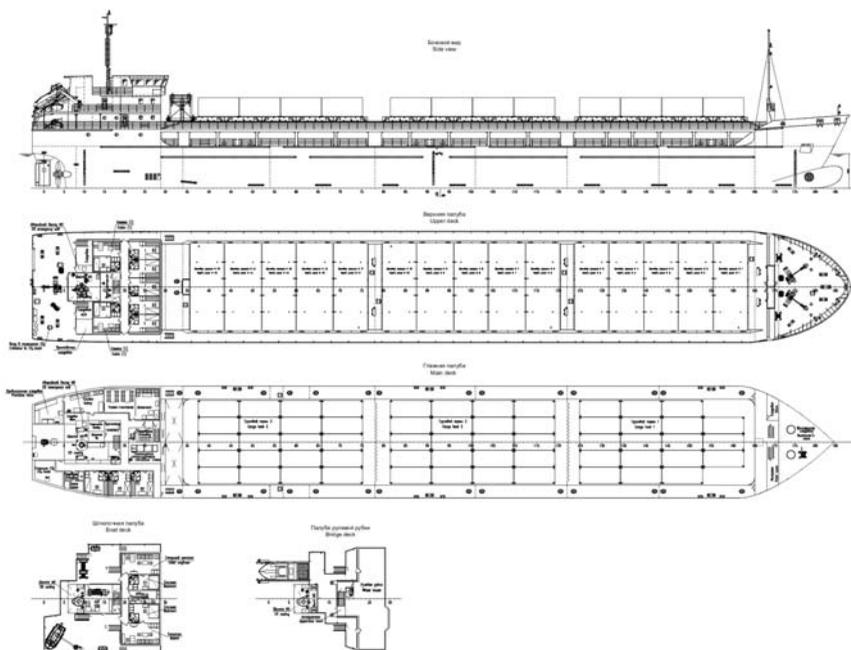


Рис. 6  
Общее расположение судна проекта RSD17

второй –  $10,2^\circ$ , среднее время одерживания – 34 с. При перекладке руля на  $20^\circ$  –  $9,5^\circ$ ,  $15,9^\circ$  и 35 с соответственно.

При проведении циркуляционных испытаний было определено, что при перекладке руля на  $35^\circ$  на ПБ диаметр установившейся циркуляции составил 140 м (1,2L), угловая скорость поворота –  $80,1^\circ/\text{мин}$ ; на ЛБ – 153 м (1,3L) и  $80,1^\circ/\text{мин}$  соответственно.

Маневренные характеристики судна не только удовлетворяют стандартам ИМО, но и вполне безопасны при работе на внутренних водных путях.

Согласно рис. 7 маневр «циркуляция» для судов проекта RSD17 требует меньшей акватории, чем для судов «Волго-Дон макс»-класса с двухвальными установками классического типа (RSD19), с поворотными насадками (проекты 1565) и даже с полноповоротными винторулевыми колонками (006RSD05).

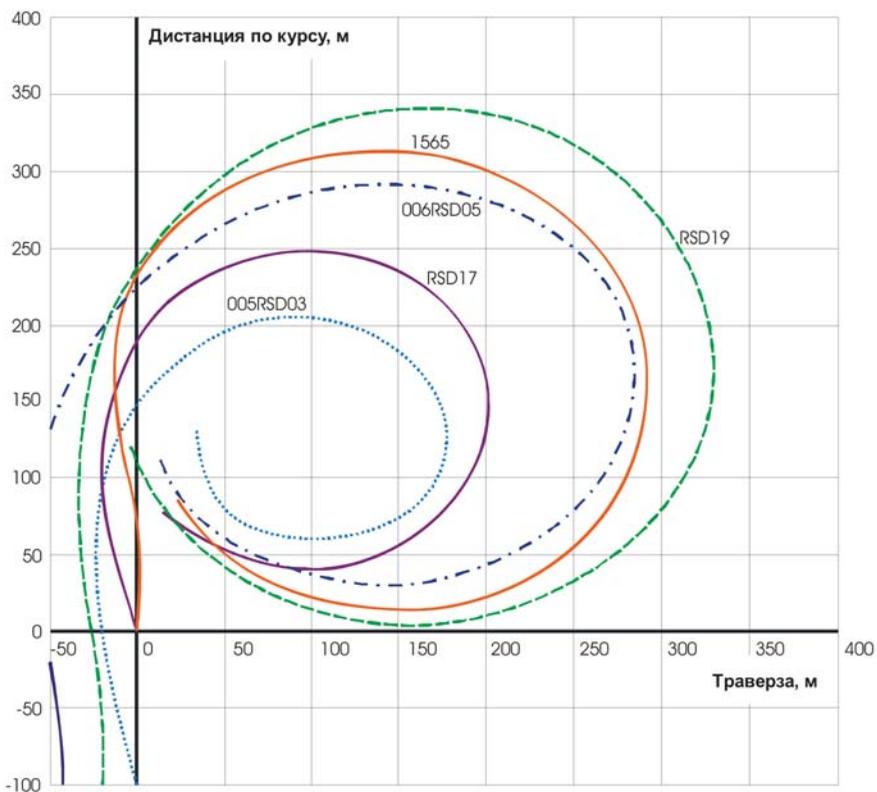


Рис. 7  
Сравнение маневра «циркуляция» с перекладкой руля на 35 °

Запасы топлива размещаются в диптанках в районе носовой переборки МО. Диптанки отделены от наружной обшивки двойным дном и двойными бортами.

Установленный на судне валогенератор снабжен функцией резервирования передачи мощности на гребной вал судна при аварии главного двигателя (функция РТО/РТИ), то есть валогенератор может работать как электродвигатель, используя электроэнергию, вырабатываемую дизель-генераторами (см. рис. 8). Ходовые испытания показали, что в режиме хода под валогенератором судно достигает скорости около 6 узлов.

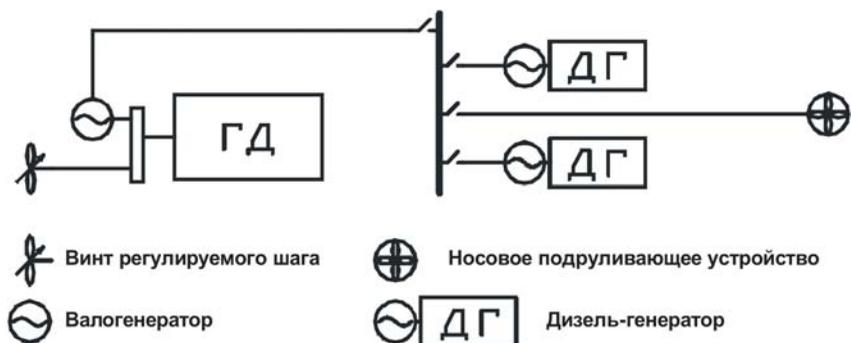


Рис. 8

Схема использования валогенератора в качестве резервного двигателя

Таким образом, обеспечивается сохранение хода и возможности маневрировать в случае выхода из строя главного двигателя. Данный режим также может быть использован, когда нужен самый малый ход (например, при входе в порт и при швартовке). Кроме того, при непродолжительной работе судна в пределах района контроля выбросов SOx, движение судна может обеспечиваться дизель-генераторами, работающими на малосернистом дизельном топливе. В таком случае нет необходимости переводить главный двигатель с тяжелого высокосернистого топлива на малосернистое.

Управление судном, главной энергетической установкой, винторулевым комплексом, подруливающим устройством, радионавигационными средствами осуществляется из центрального объединенного поста управления в рулевой рубке. Автоматизированная система предусматривает управление судном без несения постоянной вахты в машинном отделении. Объем и степень автоматизации технических средств судна соответствует знаку автоматизации А1 в символе класса судна в соответствии с Правилами РС.

Первое судно из серии со знаком «ЭКО» в символе класса «Мирзага Халилов» сдано в эксплуатацию 11 ноября 2006 г., второе судно «Измаил Шихли» – 26 апреля 2007 г., третье, «Ширван» – 8 мая 2007 г., четвертое, «Риад Ахмедов» – 15 июня 2007 г.

## *Список литературы*

1. Апполонов Е.М. и др. Вероятностно-экономический анализ целесообразности повышения требований к размерам корпусных конструкций танкеров с целью снижения риска вылива нефти при типовых авариях, обусловленных навигационными ошибками // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2001. – Вып. 24. – С. 135 – 147.
2. Бойцов Г.В. Оценка эффективности подкрепления корпусов танкеров для снижения вероятности вылива экологически опасных грузов при их столкновении с другими судами // Труды НТК по СМК памяти акад. Ю.А. Шиманского. – СПб.: ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, 2001. – С. 18–21.
3. Егоров Г.В. Минимизация влияния судоходства на окружающую среду с использованием метода формальной оценки безопасности // Сб. научн. трудов Украинского государственного морского технического университета. – № 5 (377). – Николаев: УГМТУ, 2001. – С. 8 – 18.
4. Егоров Г.В. Освидетельствования судов как инструмент оценки фактического состояния судов и обеспечения их безопасной и эффективной эксплуатации // Сб. научн. трудов УГМТУ. – № 4 (382). – Николаев: УГМТУ, 2002. – С. 10 – 18.
5. Ламберс К. Выступление на Первом международном семинаре «Субстандартное судоходство – проблемы и пути их решения через сотрудничество» 25–26 ноября 1998 г. // Сборник докладов. – СПб.: Российский морской регистр судоходства, 1998.
6. Решетов Н.А. Формальная оценка безопасности судна // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – Вып. 20. Часть 1. – СПб.: Российский морской регистр судоходства, 1997. – С. 3 – 9.

УДК 629.5

*А.Е. Бабушкин*

### **СУДОСТРОЕНИЕ НА СЕВЕРО-ЗАПАДЕ – МЕДЛЕННОЕ, НО УВЕРЕННОЕ ДВИЖЕНИЕ ВВЕРХ**

На фоне непрекращающегося снижения объемов судоремонта прошлых лет в зоне деятельности Балтийского филиала РС на настоящий момент обозначилась принципиально новая ситуация в судостроении.

Учитывая то, что ранее Президент РФ уже дал указание о создании федеральной программы гражданского судостроения, план его кардинальной реформы, который неоднократно пересматривался в течение прошлого года, сейчас приобрел окончательные формы. После издания приказа Минпромэнерго «О развитии производственных мощностей судостроительной промышленности», объявления о создании Объединенной судостроительной корпорации (ОСК) с тремя региональными дочерними компаниями (Западный, Северный и Дальневосточный «субхолдинги») Санкт-Петербург имеет неплохие перспективы, став местом регистрации головной структуры ОСК.

Для Балтийского филиала РС и Регистра в целом во всем этом, кроме безусловной обнадеживающей перспективы, есть ряд серьезных опасений.

1. Поскольку, реформирование отечественного судостроения направлено на выживание отрасли в принципе, а ее проблемы уже носят затяжной и глубокий характер, то выход из кризиса с помощью запланированных стремительных мер видится очень непроспективным и способным растянуться на длительный период.

2. Основной задачей всего реформирования обозначено обеспечение боеспособности ВМФ и конкурентоспособности боевых кораблей на мировых рынках (доля гражданского судостроения сейчас составляет 23 %, а при самых благоприятных обстоятельствах достигнет лишь 34 % к 2015 году), поэтому военное кораблестроение (сейчас – 77 %), где сотрудничество с РС находится в зачаточном состоянии и минимально по объемам, может сразу занять доминирующие позиции по всем направлениям.

3. Расчет на технологический прорыв в сфере выпуска судов и сооружений с учетом увеличения спроса и необходимости добычи/производства/поставки нефти, газа и продуктов водным путем, в том числе и с шельфовых месторождений, во всем мире может не оправдаться, и не стать тем «паровозом», который «вытащит» отечественную отрасль в целом.

4. Сделанный президентом РФ выбор в пользу территориального (географического) принципа реформирования (вместо структурного, предусматривавшего создание надводных, подводных и судоремонтных холдингов) не позволит сохранить все существующие инженерно-технические наработки и породит большое количество «обиженных» управленцев.

5. В управление ОСК передаются все государственные активы (включая и госпакеты в частных акционерных обществах) в области судостроения, в первую очередь, это будут проектно-конструкторские бюро; объединение будет производиться без переговоров с частным сектором отрасли (по крайней мере, в ближайшее время), что в будущем породит дополнительные препятствия, т. к. дальнейшее привлечение средств (до 50 %) планируется проводить за счет вложений бизнес-структур.

6. Производство отрасли будет сориентировано, в основном, на внутренний рынок, а не на экспорт, как в авиапроме (ОАК – Объединенная авиастроительная корпорация), а это будет сопряжено со всеми сопутствующими проблемами нашей современной экономики.

7. Западный холдинг или «Западный центр судостроения» создается на основе концентрации госактивов предприятий Санкт-Петербурга и Калининграда, в частности, ФГУП «Адмиралтейские верфи» и ОАО «Прибалтийский судостроительный завод «Янтарь», а, учитывая возросшие (особенно последнее время) мощности и

влияние второго, нам, в целом, будет уготована роль «формально-го лидера», т. к. основные мощности отрасли располагаются совсем в других регионах и других «субхолдингах».

8. Наличие «транспортной» проблемы Санкт-Петербурга. Существующая дорожная сеть – неудовлетворительна, трассы – не обустроены, Западный скоростной диаметр и полноценные «развязки» еще не построены.

Среди петербургских предприятий, которых процесс создания ОСК коснется непременно, – ОАО СЗ «Северная верфь», ФГУП «Адмиралтейские верфи», ФГУП «Средне-Невский судостроительный завод», ФГУП «Кронштадтский морской завод». В планах акционеров – перенос мощностей ОАО «Балтийский завод» на территорию ОАО СЗ «Северная верфь». Готовы рассматривать предложения о вступлении объединившиеся в начале 2007 года ОАО «Судостроительная фирма АЛМАЗ» и ОАО «Морской завод АЛМАЗ».

Хотя, по данным участников рынка, на Северо-Западе должен появиться новый судостроительный завод, который может быть построен как в Приморске или Усть-Луге, так и в Калининграде.

Несмотря на то, что государство длительное время уделяло мало внимания развитию судостроения, конструкторский, технологический, производственный, экономический потенциал заводов Северо-Запада позволяет строить корабли и суда, соответствующие самым современным требованиям с гарантией надежности и высокого качества.

Так, в период с 2004 по 2007 год на АО «Выборгский судостроительный завод» по заказу государственной судоходной компании Республики Казахстан КАЗМОТРАНСФЛОТ и частной компании из Казахстана MOBILEX ENERGY была построена серия из 6 танкеров дедвейтом 12000 т проектов 00210 и 00230 (АСТАНА, АЛМАТЫ, АКТАУ, АБАЙ, МАХАМБЕТ и КАЗАХСТАН). В настоящее время четыре судна работают в Каспийском море и два – в Европе.

Также в 2005–2006 годах АО «Выборгский судостроительный завод» под наблюдением РС занимался строительством вспомогательного модуля для морской ледостойкой стационарной платформы «ПРИРАЗЛОМНАЯ», который после постройки был доставлен в Северодвинск для установки на платформу, и изготовлением блоков опорного основания стационарного морского ледостойкого

отгрузочного причала для работы на Варандейском месторождении углеводородов.

Перспективы развития судостроения на класс РС в Выборге на сегодняшний день следующие. Рассматриваются возможности продолжения строительства серии танкеров для Казахстана, новых буксиров для строящихся нефтяных терминалов. В ближайшем будущем возможно строительство буровых платформ для работы на российском шельфе и судов обеспечения для них, т. к. АО «Выборгский судостроительный завод» имеет огромный опыт строительства платформ различных типов, в том числе и с классом Регистра.

17 августа 2007 года АО «Выборгский судостроительный завод» победил в тендере ООО «Газпром» на строительство двух морских буровых платформ для освоения Штокмановского месторождения. В настоящее время идет предконтрактная подготовка с участием представителей Российского морского регистра судоходства.

Учитывая потребность государства в обновлении ледокольного флота не исключено строительство в Выборге среднеразмерных линейных и портовых ледоколов.

АО «Выборгский судостроительный завод» принимает активное участие в программе строительства новой судостроительной верфи в районе Приморска для постройки судов больших размеров.

В Петрозаводске на ООО «Онежский судостроительный завод» в 2003 году было начато строительство серии судов по проекту 005RSD03 – «РОССИЯНИН», «УКРАИНЕЦ» и «БЕЛОРУС», «КАЗАХ», «КАРЕЛ». Сейчас эти пять судов успешно эксплуатируются на перевозках грузов из европейских портов в порты Каспия. Для судоходной компании «Альброс» в октябре этого же года сдано в эксплуатацию шестое судно той же серии «НИКОЛАЙ КЛИНОВ» – первое модифицированное для работы на тяжелом топливе судно.

В 2007 году ООО «Онежский судостроительный завод» построил еще два судна: «ВАСИЛИЙ КЛИМОВ» и «КАПИТАН АБАКУМОВ». Строительство третьего судна «МЕХАНИК КОВАЛЕНКО» затягивается, в связи с задержками в поставках оборудования. Сдача судна состоится ориентировочно в декабре 2007 года.

На 2008 год заводом планируется построить десятое судно серии «КАПИТАН КОНКИН» и начать строительство одиннадцатого судна.

Дальнейшие планы завода в отношении строительства судов пр. 005RSD03 неопределены в связи с отсутствием заказов.

В 2009 году завод планирует начать строительство судов типа «БЕЛОМОР» (проект NT 23301). В настоящее время технический проект находится на рассмотрении в РС. С целью привлечения потенциальных заказчиков после одобрения в РС проект будет представлен на одобрение в Германский Ллойд.

Один из старейших судостроительных заводов России ОАО «Балтийский завод» до 2005 года был стабильно загружен заказами как военного, так и гражданского назначения. При этом сотрудничество с РС ограничивалось наблюдением за постройкой атомного ледокола «50 лет Победы» и наблюдением за выпуском изделий для судостроения.

В 2005 году ОАО «Балтийский завод» начал реализацию крупного контракта на строительство серии многофункциональных линейных дизель-электрических ледоколов (пр.21900) по заказу ФГУП «Росморпорт» – «Москва» и «Санкт-Петербург». Это двухпалубные суда с площадкой для приема вертолета Ка-32 или Ка-226, водоизмещением около 10 000 т. Ледоколы предназначены для обеспечения проводок крупнотоннажных судов в Финском заливе, буксировки судов и плавучих сооружений во льдах и на чистой воде, тушения пожаров на судах и плавучих сооружениях, выполнения аварийно-спасательных работ и оказания помощи другим судам, доставки палубных грузов.

Принципиальным отличием новых ледоколов является применение в качестве движителя двух полноповоротных электрических винто-рулевых колонок с четырех-лопастными винтами фиксированного шага диаметром 4,5 м общей мощностью 16000 кВт. Однако строительство идет с серьезными задержками по срокам поставки судов и с проблемами, возникшими из-за слабого проектирования, которое ведется параллельно с постройкой.

Продолжается строительство на ОАО «Балтийский завод» океанских судов типа ро-ро, предназначенных для перевозки грузовых автомобилей-трейлеров, не в классе РС. Заказчиком судов является норвежская компания Fitjar Mekaniske Verksted AS.

В 2006 году завод принял участие в изготовлении блоков опорного основания стационарного морского ледостойкого отгрузочного причала для работы на Варандейском месторождении углеводородов.

Параллельно этому, завод принял заказ на изготовление 16 объемных секций для танкера (проект 70046), строящегося на ФГУП «Адмиралтейские верфи».

Перспективы завода на сегодняшний день не ясны. С одной стороны собственником завода озвучены планы переноса завода на площадку Северной верфи, что в реальной жизни будет означать прекращение существования Балтийского завода, с другой стороны запланирована постройка еще 4 ледоколов пр.21900 в течение 2008–2010 годов. Перенос строительства ледоколов на другой завод неизбежно повлечет за собой срыв этих сроков. Окончательное решение о продолжении строительства будет принято до конца текущего года.

На ОАО «Северная верфь» в 2003 году построена серия из 4-х судов типа «ВАЛДАЙ» (проект 01010). Сейчас закончена подготовка производства по строительству средних морозильных рыболовных траулеров (проект 13720) под наблюдением РС (проектант Федеральное государственное унитарное предприятие Центральный научно-исследовательский институт технологии судостроения). Однако на сегодняшний день не решены вопросы финансирования строительства судов. Ведется работа по проектированию и проработке возможности строительства на верфи под наблюдением РС танкеров река-море (пр.22400) дедвейтом 6500 т (разработчик Балтсудопроект) для Кипрской компании.

На официально признанном ведущем предприятии судостроительной промышленности России по отработке новых технологий ФГУП «Адмиралтейские верфи» в 2002 году построена серия из пяти танкеров (пр.20070 и пр. 20071) на класс РС. В 2007 году началось строительство танкера дедвейтом 70000 т по пр.70046 с совместным классом РС и Регистра Ллойда. Всего планируется построить два судна. Срок окончания строительства – 2009 год. Отличительной особенностью танкера является использование в качестве пропульсивной установки двух винторулевых колонок типа «Азипод», которые позволяют использовать принцип «двойного» движения: во льдах судно будет двигаться кормой вперед, а на чистой воде – носом вперед.

Завод имеет устойчивый пакет заказов на ближайшие несколько лет. В планах, кроме строительства танкеров: освоить выпуск серии лесовозов дедвейтом 2500 – 16500 т, создать серию балкеров дедвейтом 30 000 – 35 000 т, танкеров класса PANAMAX. Также освоено строительство буксиров не в классе РС.

На ОАО «Морской завод АЛМАЗ» в 2006–2007 годах под наблюдением РС начато строительство большого таможенного судна (проект 22120) длиной около 70 м и водоизмещением около 1500 т. Строительство его будет завершено в 2008 году. Ведутся переговоры о возможном строительстве еще одного такого судна. К настоящему моменту завершено строительство патрульного экологического судна (проект 2153).

Многолетними традициями производства новейших образцов военной техники обладает ОАО «Судостроительная фирма АЛМАЗ». В 2006 году под наблюдением РС завершено строительство патрульного таможенного судна (проект P2030T).

Одним из ведущих предприятий Северо-Запада России является ОАО «Ленинградский судостроительный завод ПЕЛЛА». С 2004 года на заводе под наблюдением РС ведется строительство буксиров небольших размерений и водоизмещения (по проектам 90600, 90608, 16609), для обеспечения работ в различных портах России.

В настоящее время ОАО «Ленинградский судостроительный завод ПЕЛЛА» и «Компания Усть-Луга» подписали новый договор о строительстве двух буксиров азимутального типа для работы в морском торговом порту Усть-Луги. Новые буксиры должны быть сданы не позднее июня 2009 года.

На ОАО «Московский судостроительный и судоремонтный завод» в июне 2007 года состоялся спуск первой 45-метровой трансатлантической мега-яхты, построенной в России. ОАО «Московский судостроительный и судоремонтный завод» является основным партнером и координатором масштабного российско-голландского проекта Timmerman Yachts по строительству моторных яхт класса «люкс» и экспедиционных судов повышенной надежности. В настоящее время на верфи завода ведется строительство 10 яхт (от 24 до 45 м) не в классе РС. Строительство комфортабельных судов класса «люкс» идет под заказ по серийным и индивидуальным проектам российских и зарубежных дизайнеров, морских ар-

хитекторов и инженеров на мировом уровне качества выполнения проектных и судостроительных работ.

В качестве положительной тенденции следует отметить тот факт, что начинают возрождаться судостроительные предприятия, оказавшиеся на грани закрытия в годы финансового кризиса.

Так, «Новоладожский судоремонтный завод» заключил контракт на строительство двух малых рыболовных траулеров-морозильщиков (проект 22320). Однако до настоящего времени строительство не начато из-за отсутствия финансирования.

ООО «Невский судостроительно-судоремонтный завод» заключил контракт на постройку 4-х самоходных барж-площадок грузоподъемностью 3640 т для «OMS Shipping» (Казахстан). Строительство серии барж должно быть закончено в мае 2008 года.

Судостроение на Северо-Западе является важнейшей частью российского судостроения, во многом определяющей его будущее развитие и в полной мере отражающей кризисные процессы в отрасли в целом.

Преодоление кризисных процессов и стабилизация экономического положения в судостроительной отрасли требуют серьезной модернизации судостроительных и судосборочных производств, привлечения на предприятия высококвалифицированных специалистов и повышения конкурентоспособности российского судостроения на мировом рынке путем развития экспортного производства наряду с удовлетворением внутренних потребностей. С учетом преодоления высказанных ранее опасений, которые могут возникнуть в результате реформирования отрасли, создаваемая Объединенная судостроительная корпорация будет способна решать поставленные перед ней задачи. Кроме того, для неуклонного и поступательного движения вверх необходима поддержка государства – оптимизация налоговых сборов, привязанных к доходам, и принятие законов о поддержке судостроительной отрасли.

### *Список литературы*

1. Операция «Интеграция» // Морской бизнес Северо-Запада. – № 8. – 2007.
2. Федоренко М. Судостроение как локомотив экономики // Морские вести России. – № 11–12. – 2007.

3. Мореходов М. Как возродить судостроение // Морские вести России. – № 13–14. – 2007.
4. Горбач В. Верфи России: время модернизации // Морские вести России. – № 15–16. – 2007.
5. Поляков В. Стратегия развития // Морские вести России. – № 15–16. – 2007.
6. Стратегия развития транспортно-логистического комплекса Санкт-Петербурга // Терминал. – № 4. – 2007.
7. Чугунов В. Российское судостроение. Возможности и перспективы на отечественном рынке заказов судовой техники // Морская биржа. – № 3. – 2007.
8. Логачев С.И., Чугунов В.В. Мировое судостроение. Современное состояние и перспективы развития. – СПб.: Судостроение, 2000.

УДК 621039:623.828.8

*В.И. Атласов, В.П. Егоров*

### **НОВЫЕ ТЕНДЕНЦИИ В АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ: ПЛАВУЧИЕ АТОМНЫЕ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ**

15 апреля 2007 года на судостроительном заводе ФГПУ «ПО «Севмаш»» состоялась торжественная закладка первой плавучей атомной электростанции, строящейся на класс Регистра **КЕ** ⊗ ⊚ **A2** ⊗ (стоечное).

На закладке судна присутствовали Первый вице-премьер Сергей Иванов и глава Росатома Сергей Кириенко.

Мощность первой плавучей атомной станции, которая будет носить имя академика М.В. Ломоносова, составляет 70 МВт электрической и около 300 МВт тепловой энергии.

«Россия начала строительство плавучих атомных электростанций, – заявил глава Росатома Сергей Кириенко в ходе торжественного начала закладки первой плавучей атомной электростанции в Северодвинске. – Мы сегодня подписываем соглашение о строительстве серии из шести энергоблоков плавучих АЭС. Спрос на них есть не только в России, но и в Азиатско-Тихоокеанском регионе, где они могут использоваться для опреснения воды».

Приведем краткую историю создания этого уникального проекта.

Впервые над мобильными атомными комплексами задумались еще в 60-х гг. прошлого столетия. Тогда рассматривалась возможность создания передвижных АЭС на железнодорожных платформах. В Обнинске, в ФЭИ была даже создана реакторная установка

под этот проект. Однако позже от этой идеи отказались. А в начале 90-х гг. российские ученые предложили доставлять ядерные энергоблоки в труднодоступные районы по воде. Такой плавучей установки мощностью не более 100 МВт с избытком хватило бы для теплоснабжения региона, куда завозить традиционное топливо трудно и дорого, а строить стационарные АЭС нерентабельно.

Конструкторы ЦКБ «Айсберг» предложили установить на специальное судно два судовых реактора, турбогенераторы, прочее оборудование, а пост управления и бытовые помещения оборудовать по стандарту атомного ледокола. Позднее появилась идея использовать в качестве плавучих энергоблоков атомные подводные лодки, выведенные из боевого состава флота, однако по соображениям безопасности и нераспространения военных технологий проект был отложен на неопределенный срок.

Наиболее эффективной для проекта признали реакторную установку КЛТ-40С, используемую на атомных ледоколах. Россия добилась значительных успехов в безопасной эксплуатации таких реакторов. Разработана реакторная установка КЛТ-40С в Нижегородском «Опытном конструкторском бюро машиностроения им. И.И. Африкантова» (ОКБМ), коллектив которого вот уже более 50 лет проектирует корабельные и судовые ядерные энергетические установки.

Большой интерес к инновационному атомному проекту проявили корабельщики ФГУП «ПО «Севмаш»» – базового предприятия Российского государственного центра атомного судостроения (ЕРЦАС). Все, что нужно для его реализации, на заводе уже было – с 1955 года он стал самым настоящим «лодочным» конвейером, построив для Военно-морского флота 128 атомных подводных лодок, что составляет, практически, половину боевого состава российского атомного подводного флота. Строительство плавучей атомной станции на военной верфи – идеальный вариант конверсии производства: плавучий энергоблок, установленный на территории предприятия, обеспечит гарантированную теплофикацию и энергоснабжение завода и города, а большой спрос на мобильные энергетические комплексы гарантирует получение заказа на их серийное производство.

Повышенный интерес к разработке российских конструкторов давно проявляют за рубежом. Привлекает не только мобильность

станции. Ядерная установка – надежный источник энергии для опреснительных комплексов. Установив подобное оборудование на плавучем энергоблоке, можно получать до 240 000 м<sup>3</sup> пресной воды в сутки. Однако иностранные партнеры пока не торопятся с вложением средств, ожидая запуска пилотного проекта в России. Это обстоятельство еще больше убедило Минатом в целесообразности строительства головной АТЭС ММ в Северодвинске с дальнейшим размещением для опытной эксплуатации на территории «ФГУП «ПО «Севмаш»». Учитывая, что продолжительность полета от Москвы до Архангельска составляет полтора часа, показать потенциальным заказчикам станцию в действии будет несложно.

В 2000 году Минатом, ФГУП «Концерн «Росэнергоатом», администрация Архангельской области и ФГУП «ПО «Севмаш» подписали декларацию о намерениях строительства головной АТЭС ММ в Северодвинске.

В 2002 году, пройдя депутатские и общественные слушания, проект АТЭС ММ получил поддержку законодателей Архангельской области и жителей Северодвинска, успешно выдержал Государственную экологическую экспертизу.

В октябре 2002 года Минатом, «Росэнергоатом» и Российское агентство по судостроению совместными решениями утвердили технический проект плавучего ядерного энергоблока, который получил положительное заключение Главгосэкспертизы России.

Первую в мире плавучую АТЭС «Росэнергоатом» планирует ввести в эксплуатацию в 2010 году. Таким образом Россия совершает новый прорыв в сфере энергетических технологий. По мнению специалистов, малые атомные мощности должны занять одно из основных мест в энергосистеме российских регионов, вытеснив газ, который, в свою очередь, в больших объемах и по мировым ценам (превышающим цены внутреннего рынка в 4 раза) пойдет на экспорт. Данный вопрос находится на личном контроле президента России Владимира Путина, который поставил задачу к 2030 году увеличить до 25 % долю атомной энергетики в общем энергобалансе страны, составляющую на сегодняшний день 16 %.

Непосредственный заказчик и инвестор проекта – концерн «Росэнергоатом». По словам главы концерна С.А. Обозова, малые АЭС не заменят атомных станций большой мощности, однако плавучие энергоблоки, благодаря их уникальным характеристикам,

имеют наилучшие перспективы в ряде сфер деятельности. Так, они могут стать идеальным источником энергии и тепла при освоении северных территорий, новых месторождений на Крайнем Севере, для развития Северного морского пути.

Для будущих станций выбраны площадки в Дудинке (Таймыр), Северодвинске (Архангельская область), Вилючинске (Камчатка), Певеке (Чукотка). Всего на сегодняшний день рассматривается 11 российских регионов, где малые АЭС могут быть востребованы.

Плавучий энергоблок спроектирован в виде несамоходного судна длиной 144 м, шириной 30 м и водоизмещением 21500 т. Общий срок службы станции рассчитан на 40 лет, раз в 12 лет предусмотрен ее ремонт, а по окончании эксплуатации – утилизация. Ориентировочная стоимость строительства составляет 9,1 млрд. рублей.

Интерес к проекту создания плавучих атомных станций малой мощности выразил «Газпром», который мог бы использовать ПАТЭС для энергообеспечения добычи и транспорта углеводородов на шельфе северных морей и полуострове Ямал. Другой немаловажный аспект – использование плавучих АЭС в качестве опреснительных установок.

### *Список литературы*

1. Становление атомного комплекса Российской Федерации. – М.: МНЭ-ПУ, 2006.
2. Росэнергоатом. – № 2. – Москва, 2007.

УДК 681.586.78:531.781:629.5.035.8

*Н.Е. Жадобин, В.Б. Мачульский, В.Б. Викулин, А.И. Лебедев*

### **ДАТЧИКИ ПРОДОЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ И ОСЕВЫХ УСИЛИЙ В ВАЛОПРОВОДАХ СУДОВЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК**

Продольные колебания и осевые усилия линии валопровода рассмотрены в [1, 2, 3, 8].

В процессе эксплуатации судов транспортного флота наблюдаются случаи повреждений деталей и узлов энергетических установок, вызванных действием продольных колебаний валов [3].

Под действием усилий продольных колебаний кривошипы коленчатого вала испытывают сложную по характеру деформацию. При значительных осевых перемещениях кривошипов, размеры которых достигают 3,0 мм, щеки колен деформируются в направлении оси вала.

Находящиеся в постоянном соприкосновении с мотылевыми шейками шатуны вследствие возникающих между ними сил трения совершают вместе с кривошипами продольные колебания.

В случаях, когда зазоры в подшипниках не могут компенсировать отклонения шатуна, возможны трещины в верхней головке шатуна или усиленный износ подшипника.

Главный упорный подшипник (ГУП) с фундаментом является консольно нагруженной балкой, изгибающейся под действием знакопеременных продольных сил.

Известны случаи усталостного повреждения фундамента ГУП и его крепления, вызванные продольными колебаниями валопровода.

Продольные колебания валопровода через фундамент упорного подшипника и двойное дно вызывают повышенную вибрацию корпуса судна, оказывая отрицательное влияние на работу различного судового оборудования.

Периодические возмущающие силы, действующие в осевом направлении, вызывают перемещение валопровода. Вследствие упругости материала валов различные сечения валопровода перемещаются с различной мгновенной скоростью. Это и вызывает периодическую деформацию растяжения и сжатия на их участках.

При значительной амплитуде ускорений продольных колебаний валопроводов происходит интенсивное скольжение валов в опорных и дейдвудных подшипниках, что может вызвать износ подшипников и неблагоприятно сказаться на работе уплотнения дейдвуда.

Как отмечается в [1], крутильные колебания в системе «двигатель–валопровод–редуктор–винт» во многих случаях являются причиной значительной осевой вибрации валопровода и упорного узла главного двигателя.

Крутильные колебания винта вызывают значительные продольные колебания в системе «двигатель – валопровод с упорным узлом – винт» потому, что они приводят к большой крутильной вибрации винта, которая вызывает значительные периодические изменения его упора.

При переходе запретных зон крутильных колебаний в главных силовых установках судов развиваются недопустимо большие амплитуды вынужденных продольных колебаний [2]. Лопasti гребного винта, совершая большие размахи при резонансе крутильных колебаний, вызывают периодическое изменение упора винта. Возбуждаемые при этом знакопеременные осевые усилия и являются источником повышенных продольных колебаний. Происходят они с частотой крутильных колебаний и максимальные перемещения валов достигают 1,5 – 2,5 мм, что приводит к различного рода повреждениям в отдельных элементах валовой линии.

Основным источником вынужденных продольных колебаний являются знакопеременные осевые силы, возбуждаемые периодическими изменениями упора винта при совершении им крутильных колебаний. Происходят они с частотой крутильных колебаний, и их величина зависит от осевого зазора в упорном

подшипнике и от скорости перехода запретной зоны частоты вращения двигателя.

В валопроводах современных ДВС продольные колебания имеют частоты, как правило, близкие к частотам крутильных колебаний, и поэтому в реальных системах возникают связанные продольно-крутильные колебания, имеющие возможность резонировать.

Изучение и учет продольных колебаний является необходимым условием для обеспечения надежной и долговечной работы судовой энергетической установки и создания условий безопасности плавания морских судов.

Существующие методы расчета судовых валопроводов на крутильные, особенно на изгибные и продольные колебания являются приближенными, поэтому судить с уверенностью об истинных значениях колебаний и механических напряжений можно только по результатам их измерений.

Для измерения продольных колебаний наибольшее применение нашли индуктивные и трансформаторные измерительные преобразователи [4, 11].

В [9] приводится описание двухканального волоконно-оптического датчика (ВОД) вибрации.

Бесконтактный контроль параметров вибраций обычно требует установки измерительного преобразователя на определенном расстоянии относительно вибрирующей поверхности, непрерывного контроля и автоматического поддержания этого расстояния. Для такого контроля удобны волоконно-оптические преобразователи, имеющие малые габариты и массу, не подверженные воздействию электрических и магнитных помех и работоспособные в агрессивных и взрывоопасных средах. Однако отклонения вибрирующей поверхности от начального положения приводят к изменению установочного зазора и ошибке в определении параметров вибрации. Наличие внешних засветок, запыленность среды между торцом волоконно-оптического жгута и объектом контроля, загрязнение вибрирующей поверхности, изменения интенсивности излучения также увеличивают погрешность измерения.

ВОД (рис. 1) имеет чувствительный элемент с совмещенными каналами измерения, обработка выходных сигналов которых позволяет устранить указанные погрешности. В отличие от широко

распространенных дифференциальных датчиков различной физической природы совмещение нескольких волоконно-оптических каналов измерения в едином жгуте многомодовых оптических волокон позволяет размещать чувствительный элемент на определенном участке по одну сторону от вибрирующей поверхности. Излучающие и приемные волоконные светодиоды образуют на торце жгута соответственно круговую 3 и концентрические 4, 5 зоны, как показано на рис. 1, вид А.

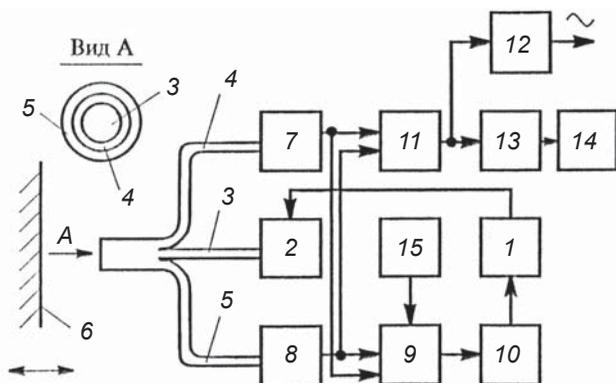


Рис. 1

Двухканальный волоконно-оптический измеритель вибрации:

- 1 – стабилизатор тока; 2 – источник света; 3 – излучающий жгут световодов;
- 4, 5 – приемные световоды; 6 – поверхность контролируемого объекта;
- 7, 8 – фотоприемники; 9 – блок сложения; 10 – интегратор;
- 11 – блок вычитания; 12 – фильтр верхних частот; 13 – фильтр нижних частот; 14 – блок индикации; 15 – источник опорного напряжения

Торцевую поверхность жгута с излучающими первым и вторым приемными жгутами волоконных светодиодов (ВС) 3, 4 и 5, соответственно, располагают вблизи от поверхности контролируемого объекта 6.

С помощью излучающего жгута ВС 3 и источника излучения 2 освещается поверхность 6. Отраженный свет попадает в жгуты 4 и 5 ВС, что приводит к появлению сигналов  $U_1$  и  $U_2$  на выходах фотоприемников 7 и 8, соответственно. При изменении значения

зазора  $z$  ( $z$  пронормировано относительно внешнего радиуса торца жгута светодиодов) величина  $U_1$  изменяется в соответствии с известной зависимостью  $U(z)$ , изображенной на рис. 2. При малых значениях  $z$  сигнал  $U_2$  будет меньше  $U_1$ , при дальнейшем увеличении  $z$  значение  $U_2$  будет увеличиваться, а затем превысит  $U_1$ . В целом зависимость  $U_2(z)$  будет сдвинута относительно  $U_1(z)$  в сторону больших значений  $z$ .

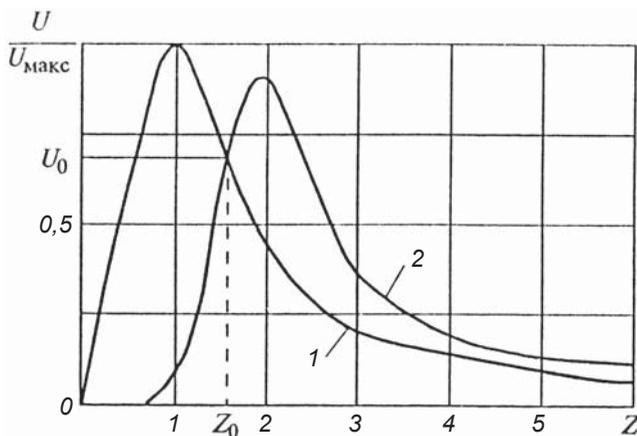


Рис. 2

Выходные сигналы двух каналов измерения ВОИВ:

1 – сигнал  $U_1(z)$  с выхода первого измерительного канала ближнего к зоне излучающих светодиодов; 2 – сигнал  $U_2(z)$  со второго канала измерения

Используя значения  $U_1$  и  $U_2$ , формируют с помощью блока вычитания 11 сигнал:

$$S_1 = U_2 - U_1. \quad (1)$$

Как следует из рис. 3, при  $z < z_0$  значение  $S_1 < 0$ , а при  $z > z_0$  значение  $S_1 > 0$ , где  $z_0$  – абсцисса точки пересечения зависимостей  $U_1(z)$  и  $U_2(z)$ . Измерение виброперемещений производят при установочном зазоре  $z = z_0$ , для чего при  $S_1 < 0$  зазор увеличивают, при  $S_1 > 0$  – уменьшают до получения равенства  $S_{1cp} = 0$ , где  $S_{1cp}$  – постоянная

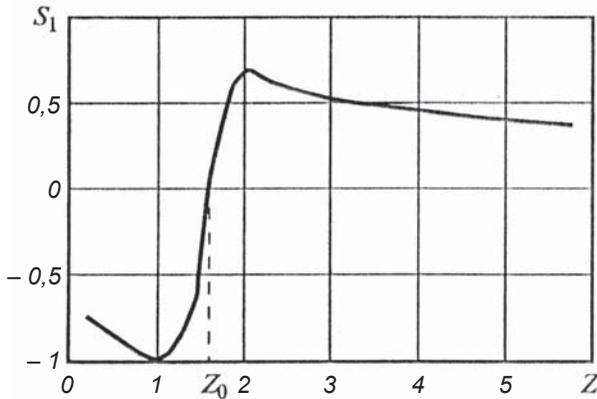


Рис. 3  
Зависимость  $S_1 = U_2 - U_1$  от  $z$

составляющая сигнала  $S_1$ . Сигнал  $S_1$  можно получить и в статике, не изменяя  $z$ , а знак сигнала  $S_1$  позволяет судить о направлении изменения  $z$ . Принципиально важным является то, что при изменении мощности  $P_{и}$  источника света или при изменении коэффициента  $K_{отр}$  отражения света от поверхности происходит одинаковое «растяжение» или «сжатие» зависимостей  $U_1(z)$  и  $U_2(z)$  вдоль оси ординат (рис. 2), но при этом абсцисса точки пересечения этих двух зависимостей не изменится.

Таким образом, на точность установки величины зазора  $z_0$  не влияют изменения величин  $P_{и}$  и  $K_{отр}$ . С помощью фильтра нижних частот 13 выделяется постоянная составляющая  $S_1$ , которая поступает на блок индикации 14. Это позволяет оперативно контролировать установочный зазор.

При вибрации (отклонении  $z$  от  $z_0$ ) величины  $U_1$  и  $U_2$  получают разные по знаку приращения, т. е. величина  $S_1$  модулируется, однако постоянные составляющие величин  $U_1$ ,  $U_2$  и  $S_1$  не изменяются, поэтому выбор установочного зазора из условия (1) позволяет устанавливать и контролировать его и при вибрирующем изделии.

Под действием дестабилизирующих факторов (изменение КПД источника света при изменении температуры или старении, запы-

лении отражающей поверхности) могут изменяться значения  $P_{и}$  и  $K_{отр}$ , что вызовет, как отмечалось выше, одинаковое «сжатие» или «растяжение» зависимостей  $U_1(z)$  и  $U_2(z)$  по оси ординат. Для исключения влияния  $P_{и}$  и  $K_{отр}$  с помощью блока сложения 9 формируется сигнал:

$$S_2 = U_1 + U_2. \quad (3)$$

В установившемся режиме за счет изменения мощности излучения на входе интегратора 10 поддерживается нулевой сигнал, т. е. равенство  $S_{2cp} = \text{const}$ . При этом:

$$S_{2cp} = (U_1 + U_2)_{cp} = [f_1(z) + f_2(z)]_{cp} P_{и} K_{отр} = \text{const}, \quad (4)$$

где  $[f_1(z) + f_2(z)]_{cp}$  – среднее значение величины  $f_1(z) + f_2(z)$ .

Так как значение  $[f_1(z) + f_2(z)]_{cp}$  при неизменном установочном зазоре постоянно, то путем изменения  $P_{и}$  до получения равенства (4) стабилизируется значение  $P_{и} K_{отр}$  ( $P_{и} K_{отр} = \text{const}$ ), т. е. поддерживается постоянная чувствительность  $S_1$  к вибрации. Таким образом, за счет выполнения условий  $S_{1cp} = 0$  и  $S_{2cp} = \text{const}$  обеспечивается измерение вибрации при постоянном зазоре и стабилизируется чувствительность ВОД к вибрации. После описанных выше операций измеряют вибрацию, для чего из сигнала  $S_1$  выделяют переменную составляющую  $S_{1\sim}$ , по величине которой судят об амплитуде колебаний контролируемой поверхности.

Минимальная погрешность от нелинейности функции преобразования на рабочем участке соответствует такой конфигурации приемных зон на торце жгута световодов, при которой точки пересечения зависимостей  $f_1(z)$  и  $f_2(z)$  находятся на их линейных участках, и абсолютные величины наклонов  $\partial f_1(z) / \partial z$ ,  $\partial f_2(z) / \partial z$  равны, для чего изменяют коэффициенты преобразования фотоприемников 7 и 8.

Данный метод позволяет легко автоматизировать установку нужного зазора в процессе виброизмерений. Так, наличие четкой зависимости  $S_1$  от зазора позволяет использовать автоматические устройства для установки и поддержания нужной величины установочного зазора.

При измерении механических напряжений от крутильных и продольных колебаний наибольшее применение нашли тензорезисторные преобразователи [4, 5].

Их применение связано с существенными недостатками: необходимость приклеивания тензорезисторов к поверхности вала, наличие токосъемных колец. Такой метод измерения применяется во время ходовых приемо-сдаточных испытаний.

Бесконтактные датчики с тензорезисторными преобразователями отличаются большой сложностью, наличием деталей на вращающемся валу [7].

Так как валопроводы обладают значительным запасом прочности, то их упругие деформации, особенно в продольном направлении, ничтожны, что затрудняет преобразование этих деформаций в электрическое напряжение.

В результате этого задача надежного измерения механических напряжений от продольных колебаний до настоящего времени не имеет удовлетворительного технического решения.

В связи с этим большой интерес представляют измерители, основанные на использовании магнитоупругого эффекта.

Принцип действия магнитоупругих преобразователей (МУП) и их применение для измерения механических напряжений описаны в [6, 7].

Выражение для ЭДС четырехполюсного трансформаторного МУП имеет следующий вид [6, 7]:

$$e = - \frac{i \Phi_m W_u \omega}{2 \pi R_{\mu u}} \sqrt{\frac{i \gamma \omega}{\mu_3}} \cdot \ln \frac{[\lambda + 1 + \sqrt{2}(\lambda - 1) \sin(\pi/4 - 2 \varphi)]^2 + 4 \lambda}{[\lambda + 1 + \sqrt{2}(\lambda - 1) \sin(\pi/4 + 2 \varphi)]^2 + 4 \lambda} \cdot e^{i \omega t}, \quad (5)$$

где  $\omega$  – угловая частота сети;

$\gamma$  – электрическая проводимость материала вала;

$\lambda = \mu_y / \mu_x$ ;

$\mu_x, \mu_y$  – значения магнитных проницаемостей материала вала вдоль действия главных нормальных напряжений;

$\mu_3 = \sqrt{\mu_x \mu_y}$  – эквивалентное значение магнитной проницаемости;

$\varphi$  – угол между координатными осями  $x_1, y_1$ , связанными с магнитопроводом преобразователя, и главными осями анизотропии  $x, y$ , совпадающими с направлением главных нормальных напряжений (рис. 4);

$\Phi_m$  – амплитудное значение магнитного потока, втекающего в контролируемый участок вала через полюса обмотки возбуждения.

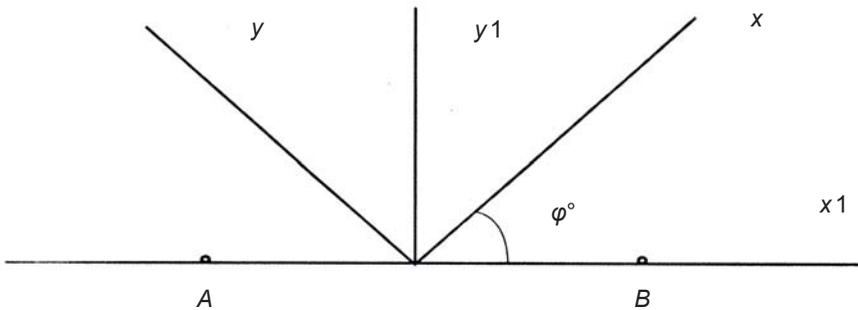


Рис. 4  
Координатные оси МУП и анизотропии

При определении ЭДС введена показательная функция, характеризующая временное изменение потока.

Анализ выражения (5) показывает, что приведенная зависимость изменяется по периодическому закону в функции угла  $\varphi$  и имеет экстремальные значения при:

$$\varphi = \pi/4 \pm n \cdot \pi/2,$$

где  $n = 0, 1, 2, 3 \dots$

На рис. 5 показана кривая зависимости ЭДС от угла  $\varphi$ .

При  $\varphi = 45^\circ$  ЭДС преобразователя имеет максимальное значение и равна:

$$e = - \frac{\Phi_m W_u}{2 \pi R_{\mu u}} \sqrt{\frac{i \gamma \omega}{\mu_s}} \cdot e^{i \omega t} \ln \lambda.$$

Таким образом, для использования рассмотренного МУП в качестве датчика упора его магнитопровод необходимо расположить около вала в соответствии с рис. 6.

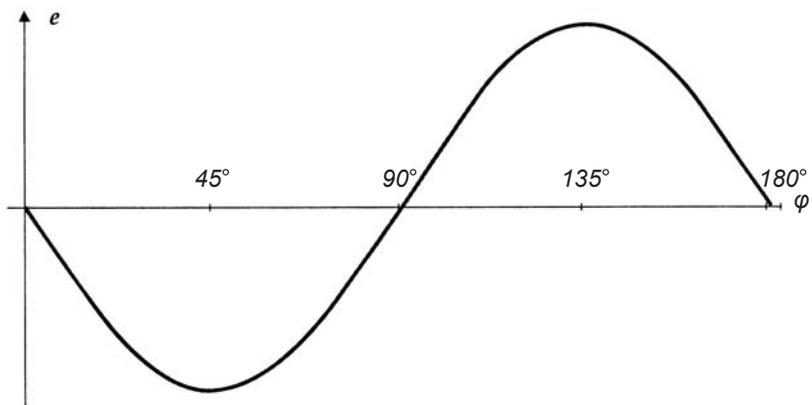


Рис. 5  
Кривая зависимости ЭДС МУП от угла  $\varphi$

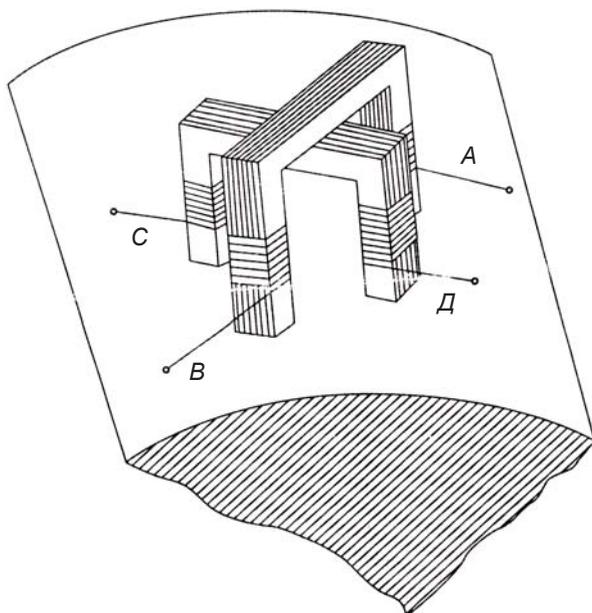


Рис. 6  
Магнитоупругий датчик упора

На рис. 7 показаны проекции полюсов магнитопровода преобразователя на поверхность вала, где  $A, B$  – проекции полюсов обмотки возбуждения;  $C, D$  – проекции полюсов измерительной обмотки.

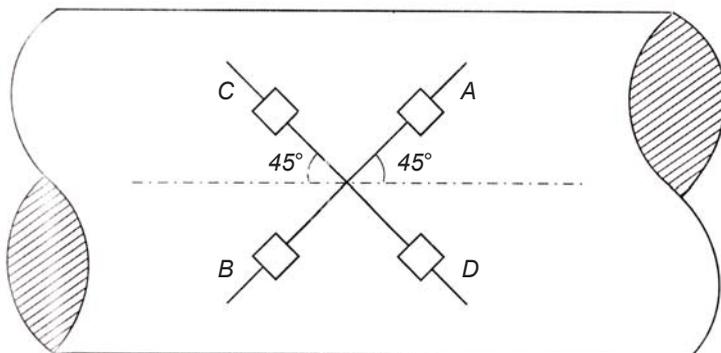


Рис. 7

Проекция полюсов магнитопровода МУП на поверхность вала  
 $AB$  – проекция полюсов обмотки возбуждения,  
 $CD$  – проекция полюсов измерительной обмотки

Одновременное воздействие на вал крутящего момента и упора приводит к изменению главных нормальных напряжений.

Главные нормальные напряжения и угол наклона главных площадок, на которые они действуют, можно определить из следующих выражений [12]:

$$\delta_{\max(\min)} = 1/2 \delta \pm 1/2 \sqrt{\delta^2 + 4\tau^2},$$

$$\psi = 1/2 \arctg 2\delta / \delta,$$

где  $\delta$  – напряжение от упора;

$\tau$  – касательное напряжение от крутящего момента.

Без учета упора:

$$\delta_{\max(\min)} = \pm \tau, \psi = 45^\circ.$$

Механические напряжения  $\delta_{yu}$ , возникающие под действием упора, обычно меньше механических напряжений, возникающих под действием крутящего момента. В соответствии с данными, приведенными в [10]:

$$\delta_{yu} = (0,1 \div 0,2) \delta_M.$$

Для определения влияния механических напряжений от крутящего момента на выходной сигнал датчика упора найдем выражение для относительного амплитудного значения ЭДС датчика упора.

Относительное амплитудное значение ЭДС датчика упора

$$\dot{E} = e / \left( \frac{i \Phi_m W_u \sqrt{i \gamma} \omega^3}{2 \pi R_{Mu}} \cdot e^{i \omega t} \right)$$

зависит от соотношения между магнитными проницаемостями  $\mu_y$  и  $\mu_x$ .

При  $\mu_y > \mu_x$ :

$$\dot{E} = \frac{1}{\sqrt[4]{1 - \chi_{yu} - \chi_M^2}} \cdot \ln \frac{\left[ 2 - \chi_{yu} - \sqrt{2} \chi_M \delta_M (\pi/4 + 2\psi) \sqrt{4 + \varepsilon^2} \right]^2 + 4 (1 - \chi_{yu} - \chi_M^2)}{\left[ 2 - \chi_{yu} + \sqrt{2} \chi_M \sqrt{4 + \varepsilon^2} \cos (\pi/4 + 2\psi) \right]^2 + 4 (1 - \chi_{yu} - \chi_M^2)};$$

при  $\mu_y < \mu_x$ :

$$\dot{E} = \frac{1}{\sqrt[4]{1 - \chi_{yu} - \chi_M^2}} \cdot \ln \frac{\left[ 2 - \chi_{yu} + \sqrt{2} \chi_M \sqrt{4 + \varepsilon^2} \right]^2 \sin (\pi/4 + 2\psi) + 4 (1 - \chi_{yu} - \chi_M^2)}{\left[ 2 - \chi_{yu} - \sqrt{2} \chi_M \sqrt{4 + \varepsilon^2} \cos (\pi/4 + 2\psi) \right]^2 + 4 (1 - \chi_{yu} - \chi_M^2)}.$$

В вышеприведенных выражениях:

$$\chi_{\text{уи}} = \Delta\mu_{\text{уи}} / \mu_{\text{н}};$$

$$\chi_{\text{м}} = \Delta\mu_{\text{м}} / \mu_{\text{н}},$$

где  $\mu_{\text{н}}$  – начальное значение магнитной проницаемости;

$\Delta\mu_{\text{уи}}$  – изменение магнитной проницаемости под действием упора;

$\Delta\mu_{\text{м}}$  – изменение магнитной проницаемости под действием крутящего момента;

$$\varepsilon = \delta_{\text{уи}} / \delta_{\text{м}},$$

$$2\psi = \text{frctg } 2 / \varepsilon.$$

Как показывают расчеты для двух значений  $\chi_{\text{м}}$  ( $\chi_{\text{м}}=0,1$ ;  $\chi_{\text{м}}=0,2$ ) и различных значений  $\varepsilon$ , лежащих в диапазоне  $0 \div 0,2$ , крутящий момент практически не оказывает влияния на выходной сигнал датчика упора (погрешность не превышает 1 %).

Следует отметить, что аналогично механические напряжения от продольных усилий не оказывают влияния на выходной сигнал магнитоупругого датчика крутящего момента.

Для измерения знакопеременных осевых усилий необходимо знать динамические характеристики трансформаторного МУП.

Трансформаторный МУП соответствует иррациональному динамическому звену с постоянной времени, изменяющейся обратно пропорционально частоте питающей сети [6].

Время протекания механических процессов в линии вала значительно превышает время протекания электромагнитных процессов в трансформаторных МУП.

Малая инерционность трансформаторных МУП позволяет использовать их для измерения знакопеременных осевых усилий, возникающих при продольных колебаниях.

Установка двух противоположно расположенных трансформаторных МУП позволяет устранить вредное влияние магнитной неоднородности материала вала.

Благодаря высокой чувствительности, бесконтактному съему информации, безинерционности, простоте конструкции, малой базе измерения магнитоупругие датчики могут быть рекомендова-

ны для измерения осевых сил в валопроводах судовой энергетической установки.

### *Список литературы*

1. Алексеев А.М. Некоторые вопросы продольной вибрации судовых валопроводов // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. – Вып. 145. – 1959.

2. Горбунов Е.Я. Крутильные и продольные колебания валопровода в запретной зоне частот вращения двигателя // Морской транспорт. Серия «ТЭФ». – Вып. 4(672). – М., 1988. – С. 11 – 17.

3. Горбунов Е.Я. Допускаемые граничные параметры и предложения по ограничению продольных колебаний валов судовых дизельных установок // Труды ЦНИИМФ. – Вып. 192. – 1975.

4. Горбунов Е.Я. Способы экспериментальных определений амплитуд продольных колебаний валопроводов судовых силовых установок // Труды ЦНИИМФ. – Вып. 159. – 1971.

5. Ефремов Л.В. Теория и практика исследования крутильных колебаний силовых установок с применением компьютерных технологий. – СПб.: Наука, 2007. – 271 с.

6. Жадобин Н.Е. Магнитоупругие преобразователи в судовой автоматике. – Л.: Судостроение, 1985. – 94 с.

7. Жадобин Н.Е., Крылов А.П., Малышев В.А. Элементы и функциональные устройства судовой автоматики. – СПб.: Элмор, 1998. – 440 с.

8. Зинченко Ю.И., Ельник А.Г., Горбунов Е.Я., Лошаков В.И. Влияние продольных колебаний коленчатых валов на работу главных дизель-генераторов ледоколов типа «Москва» // Труды ЦНИИМФ. – Вып. 125. – 1970.

9. Лиманова Н.И. Метод контроля параметров вибрации и его практическое использование в автоматизированных системах // Датчики и системы. – № 4. – 2006.

10. Моек Е., Штрихерт Х. Техническая диагностика судовых машин и механизмов. – Л.: Судостроение, 1986. – 232 с.

11. Намитков К.К. Метод дистанционной регистрации изменений зазоров внутри паровых турбин / Энергомашиностроение. – № 8. – 1959.

12. Степин П.А. Сопротивление материалов. – М.: Высшая школа, 1979. – 300 с.

*В.И. Ратников*

## **О РАЗРАБОТКЕ ТРЕБОВАНИЙ К ОБЕСПЕЧЕНИЮ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ НА МОРСКИХ СУДАХ**

Помимо положительных явлений, облегчающих жизнь и деятельность человека, развитие техники принесло много негативного: хищническое использование сырья, перепроизводство, крупнейшие техногенные и экологические катастрофы. Одним из примеров подобных последствий научно-технического прогресса следует назвать явление электромагнитных излучений техногенного происхождения как одного из физических факторов, интенсивно «загрязняющих» как окружающую, так и производственную сферу. Проблема влияния электромагнитных излучений техногенного характера на человека приобрела большое значение на морских судах, поскольку члены их экипажей постоянно, в течение многомесячных рейсов, находятся под воздействием электрических и магнитных полей, создаваемых мощным и разнообразным судовым электрическим и электронным оборудованием.

Современное морское судно является сложной локальной технико-экологической системой. Фактически во всех основных технологических процессах функционирования судна применяются энергетические и информационные технические средства, действующие на основе электромагнитных явлений. Каждое из этих средств, в той или иной мере, участвует в создании электромагнитной обстановки, негативно воздействующей на членов экипажей и пассажиров. Важность проблемы нарастает по мере расширения использования на судах электрических и электронных устройств, вычислительной техники и компьютерных систем. Проблема усугубляется также по мере повышения уровней номинальных напряжений и токов мощных эмиттеров неионизирующих излучений. Члены экипажей и пассажиры неизбежно должны пребывать на борту судов в зонах существования значительных элек-

тромагнитных полей, создаваемых совокупностями работающих технических средств, что представляет существенную угрозу для их здоровья и жизни.

Снижение фактора риска для здоровья пассажиров и экипажей при воздействиях электромагнитных полей (ЭМП) судовых технических средств следует рассматривать как один из компонентов системы управления качеством окружающей среды на морских судах: «управление электромагнитными параметрами качества окружающей среды на морских судах» [3].

Особенно важным в этой задаче является создание общего нормативного документа, определяющего правила и нормы обеспечения электромагнитной безопасности на судах, который должен лечь в основу политики регулирования риска для здоровья членов экипажей от воздействия ЭМП технических средств.

Нормирование электромагнитных воздействий в судовых условиях создает объективную возможность требуемой формализации оценок степени риска при воздействии ЭМП, возможности и стоимости снижения риска и принятия определяющих его организационных и технических решений.

Данные исследований и наблюдений в области медицины и биологии обратили внимание (особенно в последние годы) на необходимость рассматривать проблему ЭМС на судах не только в техническом, но и в медицинском (а, возможно, и биологическом) аспекте.

В настоящее время в РФ создан и действует ряд «береговых» норм/правил по электромагнитной гигиене. Непосредственному использованию их в отношении членов экипажей препятствует своеобразие электромагнитной обстановки на судах и режимов жизнедеятельности. Вместе с тем, объективно существующий риск для здоровья находящихся на борту судна людей из-за электромагнитных воздействий судовых технических средств требует разработки и принятия превентивных мер по снижению этой опасности. Специалисты отмечают недостаточность современной информации о вредных последствиях воздействий неионизирующих излучений для тщательного научного обоснования их предельных доз в широком диапазоне частот и интенсивностей электромагнитных полей, характерных для судовых условий. Однако это не может служить поводом для отсрочки проведения уже очевидных

эффективных мероприятий по уменьшению риска для здоровья из-за электромагнитной загрязненности судовых пространств. К их числу, прежде всего, относится создание современной версии допустимых электромагнитных экспозиций для судовых условий [1].

На основании декларируемых в МКУБ принципов и целей можно утверждать, что задачи обеспечения электромагнитной совместимости судовых технических средств и биологических объектов (т. е. задачи обеспечения электромагнитной безопасности (ЭМБ) человека на борту судна) были, продолжают оставаться и в еще большей мере будут существенными в многоплановой проблеме повышения безопасности мореплавания. Это определяет тот факт, что гармонизация уровней электромагнитной эмиссии и невосприимчивости в судовых помещениях и пространствах жизнедеятельности должна осуществляться на нормативной базе, соответствующей федеральным и международным стандартам [2]. Известно, что нормирование электромагнитных воздействий на судах в настоящее время ограничивается только радиочастотным диапазоном и относится лишь к надпалубным пространствам. Вопросы обеспечения электромагнитной безопасности в подпалубных помещениях в нормативных документах освещены недостаточно, несмотря на то, что генераторы, распределительные устройства, кабельные трассы, мощные электроприводы являются значительными источниками электромагнитных излучений, влияние которых на судовую биосферу практически ничем не контролируется [2, 3]. При этом исследование электромагнитной обстановки, выполненные на ряде морских судов, показали, что многие элементы электрооборудования создают внешние магнитные поля с повышенными значениями напряженности, во много раз превосходящими «береговые» нормы [4].

Таким образом можно заключить, что обеспечение ЭМБ на морских судах должно рассматриваться как одно из обязательных направлений работы по реализации требований МКУБ и Морской Доктрины Российской Федерации до 2020 г. Вследствие этого представляется целесообразной разработка требований к обеспечению электромагнитной безопасности на морских судах, которые могли бы быть введены в морские нормативные документы (аналогично требованиям по обеспечению электромагнитной совместимости судовых технических средств [5].

Ряд разработок в этом направлении ранее был выполнен специалистами ГМА им. адм. С.О. Макарова, ОАО «Гипрорыбфлот» и Петербургского испытательного исследовательского центра защиты от электромагнитных полей.

### *Список литературы*

1. Решетов Н.А. Безопасность судоходства и ЭМС // Сборник докладов Пятой Российской НТК «Электромагнитная совместимость технических средств и биологических объектов. – СПб., 1998.

2. Решетов Н.А. Нормативное и организационное обеспечение электромагнитной совместимости и безопасности на морских судах // Сборник докладов Шестой Российской НТК «Электромагнитная совместимость технических средств и биологических объектов. – СПб., 2000.

3. Вилесов Д.В., Ершиков К.К., Никитина В.Н., Трутнев Л.А. О риске для здоровья электромагнитной обстановки на судах // Сборник докладов Пятой Российской НТК «Электромагнитная совместимость технических средств и биологических объектов. – СПб., 1998.

4. Мищенко В.Ф., Синдаловский Б.Е. Исследование электромагнитной обстановки помещений судов морского флота // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – Вып. 21. – СПб.: Российский морской регистр судоходства, 1998. – С. 170 – 174.

5. Правила классификации и постройки морских судов. Часть XI. Т. 2. – СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2005.

УДК 621.396.93

*М.Б. Солодовниченко, В.П. Томсон*

## **СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА ПО ИНФОРМАЦИОННЫМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ**

### **Постановка задачи**

В последние годы для контроля и управления различными мобильными объектами (МО), в частности судами, широко используются различные системы мониторинга. Основное назначение системы мониторинга – контроль диспетчером состояния транспортных средств и/или груза и принятие оперативных мер при возникновении нештатных ситуаций. Типовой состав системы мониторинга включает мобильные объекты (суда) и диспетчерский центр (ДЦ), объединенные системой связи и управления. Каждый мобильный объект содержит систему местоопределения, датчики, контролирующие состояние объекта и трансивер для обмена информацией с диспетчерским центром по линиям радиосвязи. Обобщенная схема системы мониторинга приведена на рис. 1.

В состав системы мониторинга входят:

*n* контролируемых объектов;

бортовые комплекты (БК), установленные на каждом объекте.

Бортовое оборудование для систем мониторинга в общем случае может обеспечивать выполнение следующих функций:

определение вектора скорости и местоположения объекта;

та;

сбор телеметрической информации о состоянии объекта;

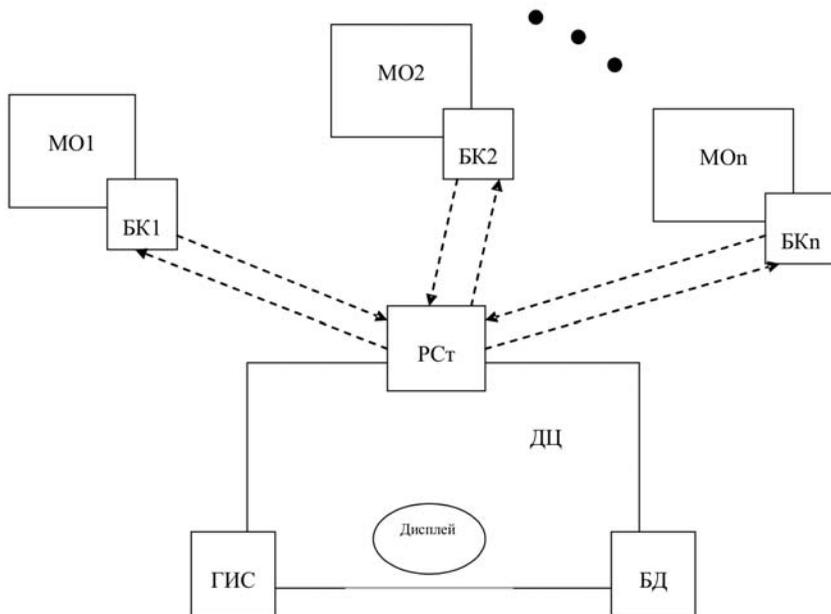


Рис. 1

дистанционное управление исполнительными механизмами, находящимися на объекте;

осуществление связи с центром для приема и передачи информации;

осуществление голосовой связи с клиентом и диспетчером центра;

накопление и хранение собранной информации (функция черного ящика);

решение логистических задач и задач навигации.

Бортовые комплекты, в общем случае, содержат систему позиционирования для определения местоположения объекта, набор датчиков для контроля состояния объекта, радиостанцию РСт для обмена информацией между мобильными объектами и диспетчерским центром. Типы, количество, и методы установки датчиков определяется в первую очередь функциональным назначением мобильного объекта.

Для отображения положения судна на карте используется геоинформационная система (ГИС), сведения о судах хранятся в базе данных (БД). Текущая информация отражается на дисплее монитора.

Эффективность использования систем мониторинга во многом определяется точностью и своевременностью получения информации о контролируемом объекте. Точность зависит от используемой системы определения местоположения объекта, которая традиционно оценивается среднеквадратической погрешностью  $\sigma$ . Своевременность получения информации характеризуется оперативностью, которая определяется как усредненный интервал времени между моментом возникновения нештатной ситуации и моментом получения этой информации в диспетчерском центре –  $T$ . Каждая из указанных составляющих определяется технико-эксплуатационными характеристиками используемых радиосредств навигации и связи.

Бурное развитие средств навигации и связи предполагает использование в перспективных системах мониторинга различных радиотехнических систем. На рис. 2 приведена классификация различных систем мониторинга, используемых на море.

Они имеют различные показатели точности и оперативности. Например, наименьшую среднеквадратическую погрешность местоопределения можно получить в зоне действия дифференциальной подсистемы ГЛОНАСС/DGPS, которая составляет 2...5 м. В зоне действия ГЛОНАСС/GPS при геометрическом факторе HDOP=4 величина погрешности с вероятностью 68 % не превышает 40 м. При работе транспондеров АИС в автономном режиме относительная погрешность взаимного обмена судами текущими координатами, полученными по GPS, будет существенно меньше. Навигационно-связные системы ARGOS, ГОНЕЦ, КУРС обеспечивают меньшую точность определения координат судов. Погрешность, по сравнению с системами ГЛОНАСС/GPS, возрастает более, чем на порядок, и составляет 0,3...2 км. Точность определения места по сотовым системам связи зависит от количества микросот базовых станций и может лежать в пределах 50...500 м.

Системы радиосвязи, обеспечивающие обмен информацией между контролируемыми объектами и диспетчерским центром в системах мониторинга, также разнообразны (УКВ-станции, GSM-



терминалы, спутниковые терминалы – Inmarsat-C, Fleet 77, Globalstar, Iridium и др.). Они имеют различные показатели оперативности, которые зависят от скорости передачи, режима работы систем связи, качества радиоканалов.

Таким образом, разнообразие информационных характеристик возможных систем связи и навигации создает проблемную ситуацию – необходимость проведения сопоставительного анализа различных систем и выбора системы, обладающей наибольшей эффективностью для решения конкретных задач мониторинга.

### Показатель информативной эффективности системы

Перспективные системы мониторинга могут создаваться на базе разнообразных систем связи и навигации, имеющих различные показатели точности и оперативности. Очевидно, что система мониторинга, обладающая наилучшими показателями точности и эффективности, не всегда является самой эффективной, так как системы с «избыточными» показателями являются более дорогими и, как следствие, менее эффективными по экономическим показателям. Для конкретизации понятия «эффективность» введем показатель информативности  $Q(\sigma, T)$ , объединяющий характеристики точности и оперативности.

Для количественной оценки показателя информативности введем значения  $\sigma_{\text{опт}}$  и  $T_{\text{опт}}$  – показатели точности и оперативности гипотетической (оптимальной) системы мониторинга, полностью отвечающие требованиям контроля и управления применительно к конкретной задаче. Для оценки степени соответствия показателей информативности реальной системы мониторинга требуемым значениям введем следующие коэффициенты:

$$\sigma_{\text{отн}} = \begin{cases} \sigma_{\text{опт}}/\sigma, & \text{при } \sigma_{\text{опт}} \leq \sigma, \\ 1, & \text{при } \sigma_{\text{опт}} > \sigma. \end{cases} \quad T_{\text{отн}} = \begin{cases} T_{\text{опт}}/T, & \text{при } T_{\text{опт}} \leq T, \\ 1, & \text{при } T_{\text{опт}} > T. \end{cases}$$

Тогда показатель информативности системы примет вид:

$$Q = (w \cdot \sigma_{\text{отн}} + (1 - w) \cdot T_{\text{отн}}) \cdot 100 \%,$$

$$0 \leq w \leq 1,$$

где  $w$  – «вес», т. е. коэффициент, учитывающий относительную важность показателей точности и оперативности.

Введенный показатель имеет ясный физический смысл. Для системы мониторинга, полностью соответствующей требованиям контроля и управления применительно к решаемой задаче, показатель эффективности  $Q_{\text{опт}} = 100\%$ . Для других систем мониторинга, обладающих худшими показателями точности и оперативности, показатель  $Q_{\text{реал}} \leq Q_{\text{опт}}$ . Показатель  $Q_{\text{реал}}$  характеризует эффективность анализируемой системы мониторинга по информативности.

На рис. 3 приведены результаты расчета показателя информативности  $Q$  для гипотетических систем мониторинга в зависимости от значения показателя  $w$ , который принимает значения от 0 до 1 при различных значениях  $T_{\text{отн}}$  и  $\sigma_{\text{отн}}$ . Анализ расчетов показывает, что возможные значения показателя информативности меняются от 1 до 0,4, т. е. правильный выбор средств связи и навигации позволят значительно увеличить эффективность функционирования системы мониторинга.

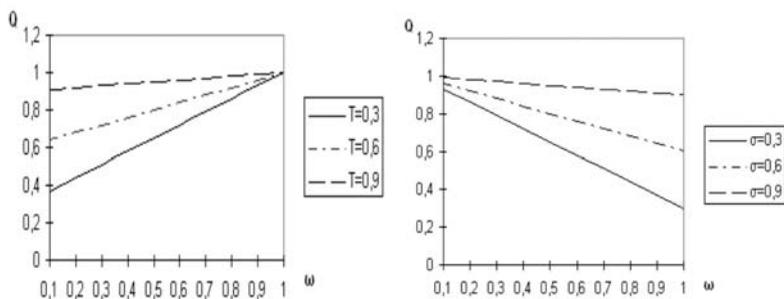


Рис. 3

## Заключение

Введенный показатель информативности  $Q$  позволяет проводить сопоставительный анализ и выбор наилучшей системы мониторинга по информационной эффективности.

## *Список литературы*

1. Худяков Г.И. Транспортные информационно-управляющие радио-электронные системы. – СПб.: СЗТУ, 2003.
2. Солодовниченко М.Б., Томсон В.П. Техничко-экономические аспекты построения системы мониторинга транспортных средств // Тезисы докладов научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и курсантов. – СПб.: ГМА, 2005.
3. Черноуцкий И.Г. Методы принятия решений. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005.

## **СОВРЕМЕННЫЕ И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ВИДЫ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ ПОДСИСТЕМ ГНСС**

### **Введение**

Система, образованная путем совместного использования двух и более глобальных спутниковых систем (ГЛОНАСС, GPS, в будущем ГАЛИЛЕО) носит название Глобальной Навигационной Спутниковой Системы (ГНСС). В англоязычной литературе GNSS (Global Navigation Satellite System).

В соответствии с резолюцией ИМО А.815(19) система ГНСС должна обеспечивать:

в первой зоне (открытое море и прибрежные воды) точность судовождения не хуже 4 % от расстояния до ближайшей навигационной опасности с максимумом 4 мили при наибольшем времени от момента последней обсервации;

во второй зоне (подходы к портам и портовые воды, а также узкости, в которых ограничена свобода маневрирования судов) погрешность определения координат места должна быть менее 10 м с вероятностью 0,95 ( $\delta \leq 5$  м).

оповещение о выходе из строя ИСЗ системы ГНСС с задержкой не более 10 с.

Требования по точности для первой зоны не являются трудно выполнимыми для современных средств навигации. Так, судовая РЛС обеспечивает измерение дистанции до цели с погрешностью менее 1 % от величины выбранной шкалы дальности, а судовый приемник ГЛОНАСС/GPS определяет местоположение по любой из систем (при снятии в GPS намеренно вводимых погрешностей) со среднеквадратической погрешностью  $\sigma \leq 40$  м при геометрическом факторе на плоскости HDOP  $\leq 4$ . В дальнейшем, при введении дополнительной частоты L2 для гражданского применения, ионосферная погрешность будет снята и при HDOP  $\leq 4$  будет получена

среднеквадратическая погрешность местоопределения  $\sigma \leq 15$  м. Однако, требование по задержке в оповещении целостности системы, которая не должна превышать 10 с, в системах ГЛОНАСС, GPS в настоящее время не всегда выполняется. Эта задача частично решается в приемной аппаратуре путем использования автономного алгоритма проверки целостности системы RAIM, позволяющего определить неработоспособный спутник при обработке измерений избыточных спутников. Задача кардинально может быть решена после ввода межспутниковой связи в системах GPS, ГЛОНАСС. Межспутниковая связь позволит в реальном масштабе времени записывать признаки неработоспособности в альманахе и в эфемеридах при выходе спутников из строя.

Во второй зоне плавания новые требования по точности определения координат места, а также требования по задержке в оповещении целостности ГНСС совместно могут быть выполнены при использовании дифференциальных подсистем.

Практика эксплуатации дифференциальных подсистем показала, что погрешности местоопределения в районе действия подсистем не превышает 1...2 м.

Существующие и перспективные виды подсистем ГНСС подразделяются на:

- локальные дифференциальные подсистемы на базе круговых радиомаяков;

- локальные дифференциальные подсистемы на базе наземных станций автоматической идентификационной (информационной) системы (АИС);

- региональные дифференциальные подсистемы на основе объединения в общую цепь локальных дифференциальных подсистем и передачи поправок и альманаха цепи в СВ диапазоне;

- региональные дифференциальные подсистемы на основе сети наземных контрольных пунктов и передачи поправок и альманаха сети с помощью системы связи ИНМАРСАТ-С;

- квазиглобальная дифференциальная система на основе широкозонных дифференциальных систем с передачей поправок с помощью геостационарных спутников с форматом сигналов GPS;

- глобальная дифференциальная система на основе широкозонных дифференциальных систем с передачей поправок с помощью низкоорбитальных спутниковых систем связи.

## 1. Локальные дифференциальные подсистемы ГНСС на базе круговых радиомаяков

В последние годы в России, США, Германии, Великобритании, Франции, Финляндии и ряде других стран для создания контрольно-корректирующих станций (ККС) локальных дифференциальных подсистем ведется интенсивное переоборудование круговых радиомаяков для передачи поправок.

Поправки передаются в СВ диапазоне волн, для чего используются штатные радиопередающие устройства круговых радиомаяков.

Частотный разнос между несущими частотами, на которых передаются дифференциальные поправки и пеленгационные сигналы, – 500 Гц. Для уменьшения ширины полосы частот при передаче поправок используется метод частотной модуляции с непрерывной фазой (MSK), при котором полоса занимаемых частот уменьшается в два раза по сравнению с обычной частотной модуляцией и не превышает 300 Гц.

Дальность действия локальных дифференциальных подсистем для разных радиомаяков лежит в пределах 100...300 км. Информация о поправках передается в стандарте RTCM-104, версия 2.0, кадрами разных типов.

В подсистеме DGPS используются кадры 1, 2, 3, 5, 6, 7, 16 типов, в подсистеме ДГЛОНАСС – кадры 31, 32, 33, 34, 35, 36 типов.

Структура передаваемой информации для обеих систем одинакова за исключением того, что в DGPS координаты контрольных пунктов (радиомаяков) передаются в геодезической системе координат WGS-84, а в ДГЛОНАСС – в системе координат ПЗ-90.

Так как в каждой из навигационных систем используется своя шкала системного времени, то заголовки передаваемых кадров привязаны к системному времени соответствующих систем.

Каждый кадр состоит из нескольких слов и имеет переменную длину. В каждом слове передается 30 бит, последние 6 бит – контрольные. В начале каждого кадра передается идентификатор типа кадра.

В DGPS в кадре 1-го типа передаются суммарные дифференциальные поправки в виде разности между измеренными и расчетными значениями квазидальностей для всех видимых ИСЗ на

контрольном пункте, а также скорости изменения поправок, позволяющие уменьшить погрешности при старении принятых поправок.

В 3-м кадре передаются координаты контрольных пунктов, в 5-м – информация о состоянии ИСЗ (работоспособен, неработоспособен), а также величины отношений сигнал-шум в месте приема, в 6-м кадре передаются поправки для определения текущей скорости судна, в 7-м – альманах контрольных пунктов. В альманахах входят данные о координатах контрольных пунктов, радиусах действия, несущих частотах и скорости передаваемых данных.

В 16-м кадре передаются данные о расхождении системных шкал времени GPS, ГЛОНАСС.

Кадры передаются непрерывным потоком циклов, однако, не все типы кадров передаются в каждом цикле. Так, GPS кадры 1 типа передаются в каждом цикле, 2 и 3 типов – один раз в час, кадры 5, 6, 16 типов – по мере необходимости, кадр 7 типа – один раз за 15 мин.

Скорость передачи данных различная для разных локальных подсистем и выбирается из значений 25; 50; 100; 200 бит/с.

При скорости 200 бит/с цикл передачи поправок равен 3 с.

Дифференциальные поправки позволяют исключить квазипостоянные погрешности измерений квазидальностей и квазидоплеровских частот в судовой приемной аппаратуре и обеспечить во второй зоне плавания требуемые значения как погрешностей определения координат места судов, так и задержек в оповещении выхода из строя ИСЗ.

Поправки принимаются с помощью дополнительного приемника. В ряде модификаций этот приемник встроен в судовую приемную аппаратуру.

Передаваемые в дифференциальной подсистеме разности квазидальностей содержат суммарные величины эфемеридных, тропосферных, ионосферных и временных (из-за ухода шкалы времени на ИСЗ) поправок.

Следует отметить, что при передаче суммарных поправок, когда каждая из составляющих поправок отдельно не передается, существует эффект разрушения корреляции между поправками по мере удаления контрольного пункта от места размещения судового приемника. Именно потому радиус рабочей зоны дифференциаль-

ных подсистем ограничен и, как отмечено выше, составляет около 300 км. При большем удалении от контрольного пункта из-за разрушения корреляционной связи эффективность дифференциального метода определения координат места будет менее выражена.

Для увеличения зоны обслуживания дифференциальными подсистемами необходима установка множества контрольных пунктов. В России разработан перспективный план переоборудования кругового радиомаяка для передачи дифференциальных поправок. На рис. 1 представлена карта расположения контрольных пунктов локальных дифференциальных подсистем, которые будут введены в действие в ближайшие годы.

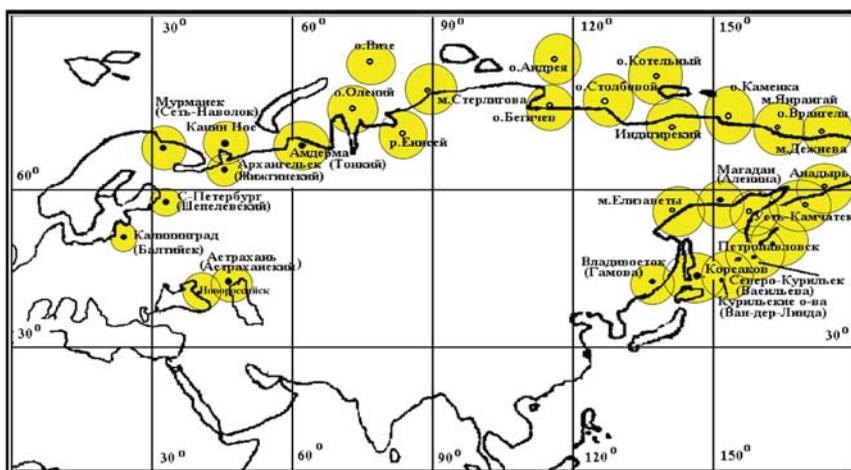


Рис. 1

В первую очередь контрольные пункты будут развернуты в местах расположения систем управления движением судов (СУДС).

Дифференциальная подсистема на базе Шепелевского радиомаяка создана в С.-Петербургском морском порту, на базе Дообского радиомаяка – в Новороссийске. На рис. 2 приведена карта рабочих зон дифференциальных подсистем на Черноморском побережье России на базе Дообского радиомаяка.



Рис. 2

Результаты испытаний показали, что зона уверенного приема поправок (уровень 35 дБмкВ/м), формируемая контрольно-корректирующей станцией на Дообском радиомаяке в районе порта Новороссийск, перекрывает все основные существующие фарватеры в прибрежном плавании до порта Туапсе, подходы к портам Геленджик, Анапа, а также вход и плавание по Керчь-Еникальскому каналу.

Устанавливается аппаратура и в ближайшее время начнут работать станции дифференциальных поправок, обслуживающие северо-западную часть Арктики (Белое и часть Баренцева моря). Расположение станций приведено на рис. 3.

На рис. 4 приведены места расположения ККС для побережья северо-западной части Европы.

## **2. Локальная дифференциальная подсистема ГНСС на базе наземных станций автоматической идентификационной (информационной) системы (АИС)**

В ближайшие годы появится возможность создания локальных дифференциальных подсистем на основе наземной станции АИС, передающих циркулярное сообщение № 17. В этом сообщении в соответствии со стандартом RTCM-104, версия 2.0, передаются

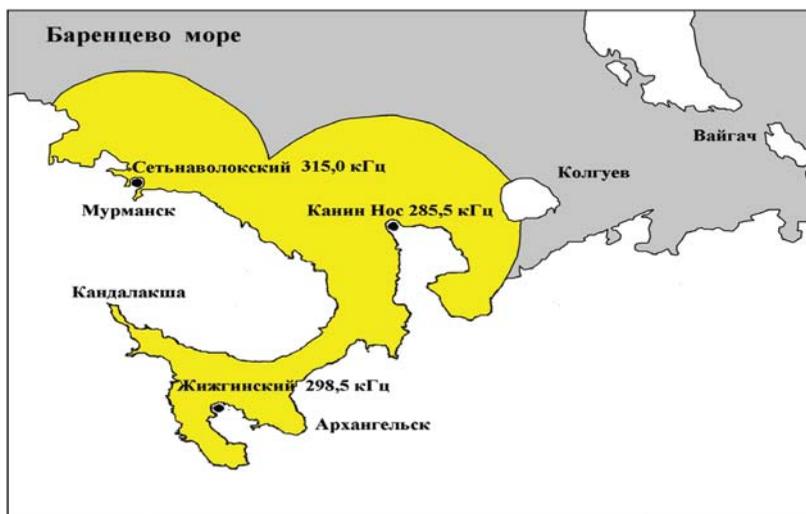


Рис. 3

дифференциальные поправки в ОВЧ диапазоне. По принятому береговой станцией запросу (запрос передается в сообщении № 15) в циркулярном сообщении № 17 содержатся все данные для работы судовых приемников в дифференциальном режиме.

Если наземная станция АИС будет расположена на высоте 100 м, то дальность действия дифференциальной подсистемы будет около 80 км. Береговых станций АИС может быть несколько. Появляется возможность создания локальных дифференциальных подсистем на базе береговых станций АИС. При этом затраты будут намного меньше по сравнению со стоимостью развертывания контрольных пунктов на базе круговых радиомаяков.

### **3. Региональные дифференциальные подсистемы ГНСС на основе объединения в общую цепь локальных дифференциальных подсистем и передачи поправок и альманаха цепи в СВ-диапазоне**

Примером региональной подсистемы этого вида может служить региональная дифференциальная подсистема в США (рис. 5), в

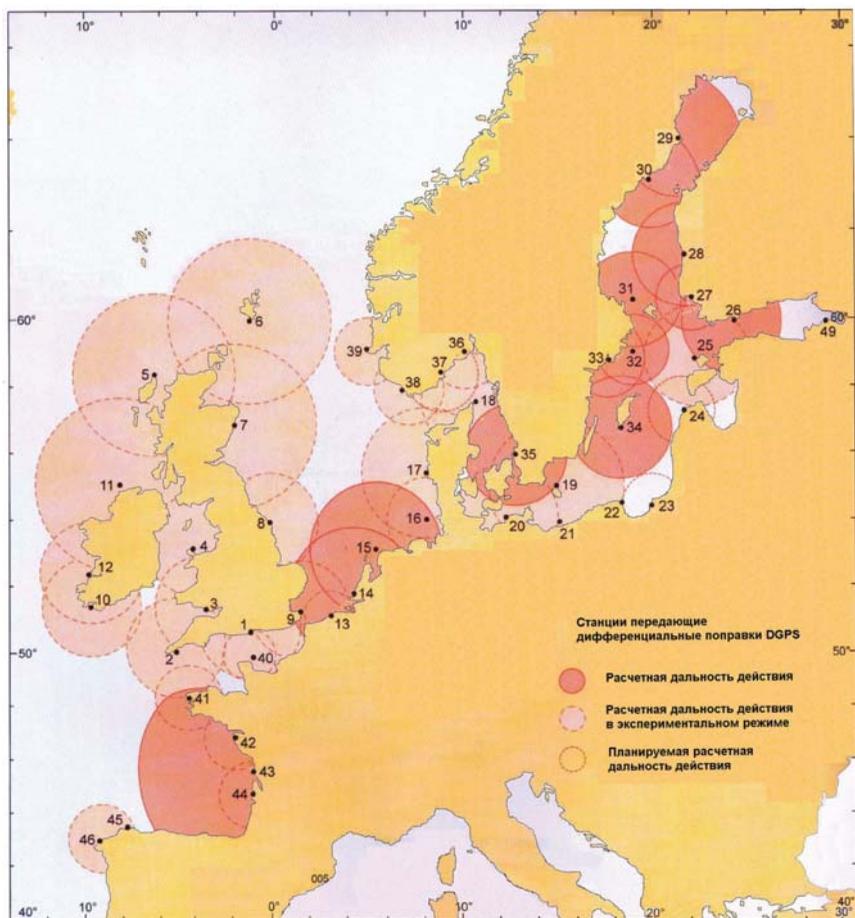


Рис. 4

которую входит три сети контрольных пунктов на базе круговых радиомаяков, развернутых по Атлантическому, Юго-Восточному и Тихоокеанскому побережьям США. Особая сеть существует в районе Великих озер США.

В Атлантическую сеть входит 13, в Юго-Восточную – 7, в Тихоокеанскую – 8 и в цепь Великих озер входит 10 контрольных пунктов. Контрольные пункты работают на разных несущих частотах

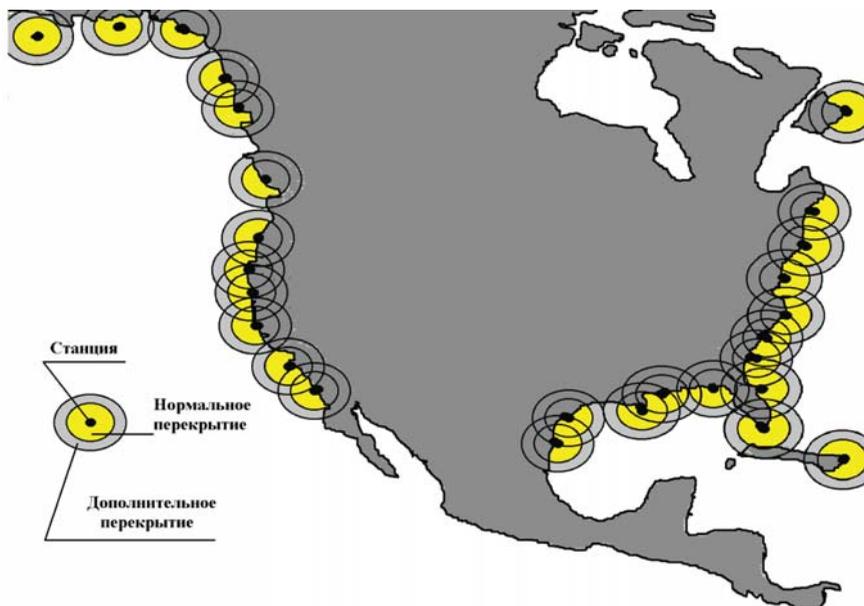


Рис. 5

в диапазоне частот 286...325 кГц, скорость передачи данных – 100 или 200 бит/с.

Каждый радиомаяк передает альманах, в котором содержится информация о десяти ближайших радиомаяках. Судовой приемник автоматически определяет ближайший радиомаяк и обеспечивает определение координат с помощью принятых дифференциальных поправок этого радиомаяка. При движении судна вдоль побережья автоматически осуществляется переход на работу по поправкам следующего ближайшего радиомаяка и т. д.

Точность определения места составляет 1... 3 м.

Примером такой сети будет служить сеть станций дифференциальных поправок Балтийского моря. На базе существующих станций (рис. 6) ведутся работы по объединению в цепь с взаимобменом информацией по наземным каналам связи.

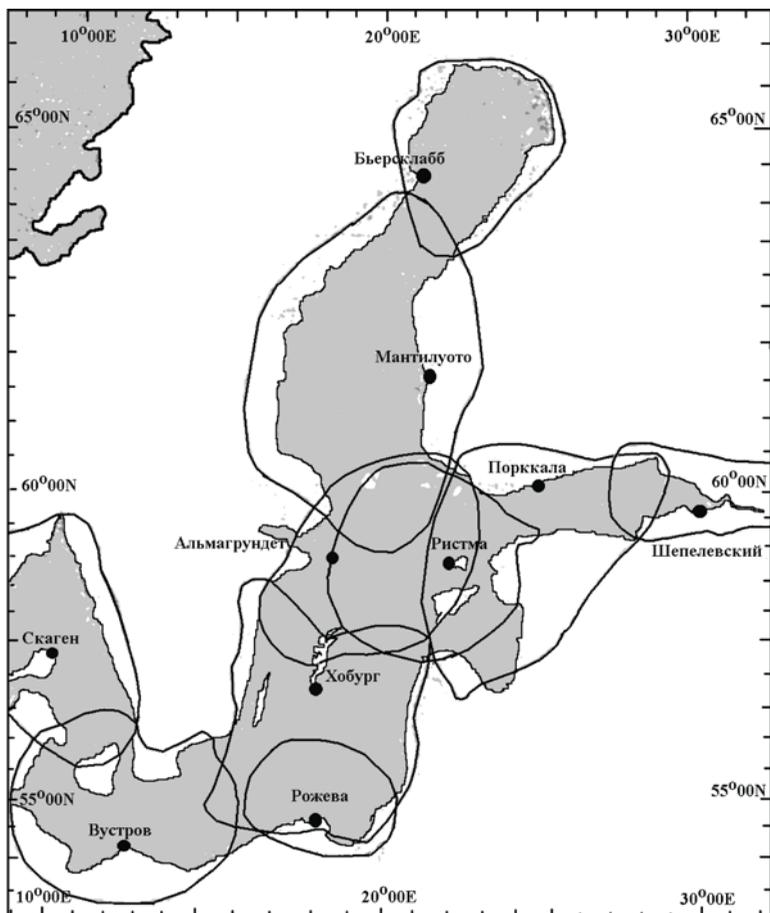


Рис. 6

**4. Региональная дифференциальная подсистема ГНСС на основе сети наземных контрольных пунктов и передачи поправок, и альманаха сети с помощью системы связи ИНМАРСАТ-С**

Примером таких подсистем могут служить региональные дифференциальные подсистемы ГНСС StarFix (фирма Fugro) и SkyFix (фирма Racal Survey Limited).

Подсистема DGPS StarFix образована 60 наземными контрольными пунктами и охватывает район радиусом до 2000 км. Район охвата – все континенты за исключением части Африки и азиатской части России. Поправки и альманах сети передаются четырьмя геостационарными ИСЗ на несущих частотах ИНМАРСАТ-С в диапазоне частот 1626,5... 1646,5 МГц, скорость передачи данных 1200 бит/с. Информация передается в стандарте RTCM-104, версия 2.0. Для передачи используются кадры 1, 3, 16, цикл передачи данных ~ 3 с. Прием поправок производится с помощью СЗС ИНМАРСАТ-С, которые автоматически вводятся в судовой приемник.

Региональная подсистема DGPS SkyFix предназначена для обслуживания районов, в которых ведется добыча, использование, наблюдение и исследование природных ресурсов. Фирма Rasal Survey Limited арендует каналы передачи на четырех спутниках систем связи ИНМАРСАТ-С.

Точность определения места с вероятностью 0,95 составляет 1...2 м ( $\sigma = 0,5...1$  м).

Региональные подсистемы DGPS с использованием геостационарных спутников ИНМАРСАТ-С способна решать задачи навигации и связи.

## **5. Квазиглобальная дифференциальная система на основе широкозонных дифференциальных систем с передачей поправок с форматом сигналов GPS с помощью геостационарных спутников**

Квазиглобальная навигационная система GNSS состоит из трех широкозонных дифференциальных систем WAAS (США), EGNOS (Россия, Германия), MTSAS (Япония). Каждая из этих систем подобна по своему построению и принципу действия. В состав WAAS входит три ведущих станции, 24 разнесенных контрольных пункта, три геостационарных спутника, 6 станций связи и 24 спутника GPS (рис. 7). Объединение среднеорбитальных навигационных спутников с геостационарными спутниками позволяет создать единую систему, способную решать не только задачи навигации, но и связи.

Широкозонная дифференциальная система EGNOS European Geostationary Navigation Overlay Service отличается от WAAS нали-



земных ионосферных станций. Ионосферные поправки передаются для условия вертикального распространения радиоволн на поверхность Земли при средней высоте ионосферы 400 км для центров (узловых точек) географических районов размером 300 × 300 морских миль.

На рис. 8 приведена карта с обозначениями районов, для которых передаются ионосферные поправки системами WAAS, EGNOS, MSAS. Из приведенной карты следует, что эти поправки на территории России не передаются.

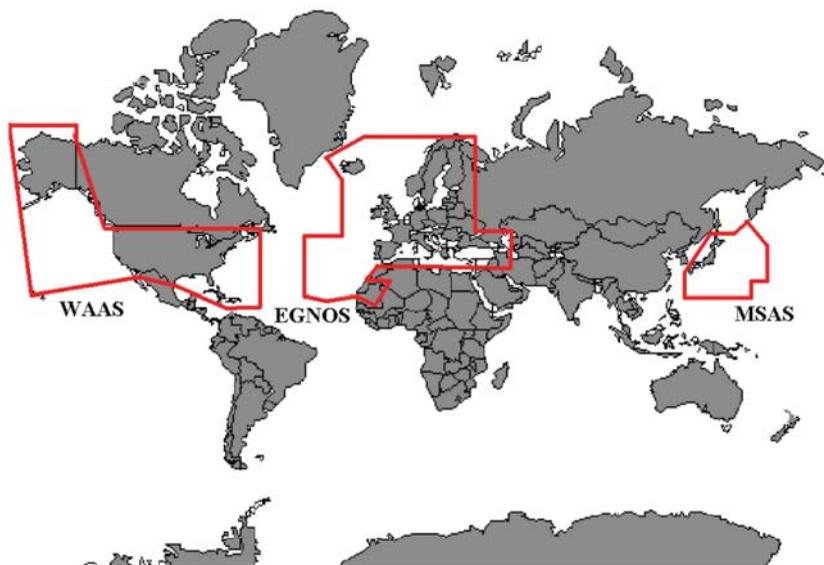


Рис. 8

Информация с геостационарных спутников излучается блоками, синхронизированными с кадрами данных GPS. Время передачи одного блока – 1 с. Временная синхронизация позволяет судовой приемной аппаратуре GPS производить прием сообщений с геостационарных спутников связи без дополнительных затрат времени на поиск сигналов. Величина доплеровского сдвига несущей

частоты, излучаемой геостационарным спутником, не превышает 210 Гц.

Принятая на судах информация содержит данные о работоспособности спутников GPS, об эфемеридах геостационарного спутника, а также отдельные значения поправок. Поправки для коррекции эфемерид и ухода шкалы времени спутников передаются каждые 60 с, ионосферные поправки – каждые 5 мин. Для точного ввода поправок передаются также коэффициенты, определяющие скорость изменения поправок.

Форматы сигналов GPS и WAAS унифицированы, поэтому прием и обработка поправок, излученных геостационарными спутниками в судовой приемник, может производиться без использования дополнительного приемника. Скорость передачи данных – 500 бит/с.

В приемной аппаратуре на основе данных о своем местоположении и угле направления на спутники вычисляются отдельно эфемеридные, тропосферные и наклонные значения ионосферных поправок и вводятся в результаты вычисленных и замеренных квазидальностей (и квазидоплеровских частот) для точного решения навигационной задачи. Здесь следует отметить, что поправка из-за ухода шкалы времени не зависит от угла направления на спутник. Скорректированные разности между замеренными и вычисленными квазидальностями до ИСЗ обеспечивают при работе по каждой широкозонной системе на трети поверхности Земли высокоточное определение места судна, соизмеримое с точностью локальных дифференциальных подсистем.

Три широкозонные системы WAAS, EGNOS, MTSAS позволяют получить Глобальную зону обслуживания за исключением северных и южных широт выше 75°. Поэтому эти системы являются квазиглобальными. Система WAAS введена в действие в 2002 г., EGNOS – в 2004 г., MTSAS – в 2006 г.

## **6. Глобальная дифференциальная система ГНСС на основе широкозонных дифференциальных систем с передачей поправок с помощью низкоорбитальных спутниковых систем связи**

Использование низкоорбитальных спутниковых систем связи, например, ГЛОБАЛСТАР, для передачи поправок широкозонных

систем позволит обеспечить глобальные местоположения судов с высокой точностью без исключения северных и южных широт выше 75 °С.

### **Заключение**

Существующие виды локальных и региональных дифференциальных подсистем ГНСС обеспечивают надежное и высокоточное определение координат места судов во второй зоне плавания (подходы к портам, портовые воды, а также узкости, в которых ограничена свобода маневрирования).

Перспективные виды дифференциальных подсистем ГНСС с использованием геостационарных ИСЗ решат задачи связи и надежного определения координат места судов как в первой (в открытом море), так и во второй зоне со среднеквадратической погрешностью менее 5 м и задержкой в оповещении целостности системы менее 10 с.

Дифференциальные подсистемы ГНСС обеспечивают также высокоточное определение текущей скорости судна.

### *Список литературы*

1. Дуров А.А., Кан В.С., Мищенко И.Н., Никитенко Ю.И., Устинов Ю.М. Судовая радионавигация, радионавигационные устройства и системы. Учебник для вузов. – М., 1998. – 205 с.
2. Соловьев Ю.А. Системы спутниковой навигации. – М.: ЭКО-ТРЕНДС, 2000.

## **СОДЕРЖАНИЕ**

Решетов Н.А. О вкладе Ф.М. Кацмана в становление и развитие морской науки .....	3
Мачульский В.Б. О вкладе Д.В. Вилесова в развитие нормативной базы Российского морского регистра судоходства .....	6

### **Вопросы безопасности судов**

Егоров Г.В., Кутейников М.А. Принципы деятельности береговых служб обеспечения борьбы за живучесть аварийных судов с учетом прочностных ограничений.....	9
Михайлов А.С., Овчинников А.Г. Роль классификационных обществ в реализации требований Сводной конвенции о труде в морском судоходстве .....	21

### **Мореходные качества судов**

Евенко В.И., Гаппоев М.А., Кутейников М.А. Анализ существующей международной нормативной базы, предназначенной для оценки мореходности пассажирских судов. Перспективы совершенствования и дальнейшего развития.....	26
Борисов Р.В., Гаппоев М.А., Кутейников М.А. Анализ аварийных случаев на пассажирских судах, связанных с потерей мореходных качеств .....	40

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

Алферов В.И., Шапошников В.М. Применение решения термопластической задачи для расчетов сварочных напряжений и деформаций судовых корпусных конструкций .....	45
--	----

Апполонов Е.М., Нестеров А.Б., Тимофеев О.Я., Дидковский А.В., Кутейников М.А. Система формирования принципиальных инженерных решений по обеспечению ледовой прочности и безопасной эксплуатации судов в российских арктических и замерзающих морях.....	62
---	----

### **Морские стационарные платформы и плавучие буровые установки**

Евенко В.И., Чернов В.Г., Балагура С.В. Деятельность Регистра в качестве инспекционного органа, предоставляющего услуги «третьей стороны» в рамках проектов освоения углеводородных месторождений на шельфе морей.....	84
--	----

### **Судовые механические установки, валопроводы и двигатели**

Попов А.А. Опыт торсиографирования судовых валопроводов с применением современных средств и методов измерений.....	99
Ефремов Л.В., Кудрявцев М.В., Иванов М.Ю. Моделирование торсиограмм и спектрограмм при расчете крутильных колебаний силовых установок.....	117
Блинков А.Н., Власов А.А., Лицис А.В., Шурпяк В.К. CNG – новая технология морской транспортировки газа: состояние, перспективы, проблемы.....	127
Скворцов В.Р., Крахмалев С.Ю., Шурпяк В.К. Разработка требований к конструкциям, испытаниям и расчетам на прочность композитных сосудов под давлением .....	163
Румб В.К., Медведев В.В., Серов А.В. Основы расчета остаточной долговечности деталей судовых ДВС.....	179

## **Защита окружающей среды**

Евенко В.И., Егоров Г.В., Сергеев А.А., Гришкин В.В. Обоснование повышенных требований Регистра к судам со знаками ЭКО и ЭКО ПРОЕКТ в символе класса .....	191
---	-----

## **Судостроение и судоремонт**

Бабушкин А.Е. Судостроение на Северо-Западе – медленное, но уверенное движение вперед.....	208
---	-----

## **Атомные суда**

Атласов В.И., Егоров В.П. Новые тенденции в атомной энергетике: плавучие атомные электростанции.....	217
---	-----

## **Электрооборудование и автоматизация судов**

Жадобин Н.Е., Мачульский В.Б., Викулин В.Б., Лебедев А.И. Датчики продольных колебаний и осевых усилий в валопроводах судовых энергетических установок .....	221
Ратников В.И. О разработке требований к обеспечению электромагнитной безопасности на морских судах .....	235

## **Радио- и навигационное оборудование судов**

Солодовниченко М.Б., Томсон В.П. Сравнительный анализ систем мониторинга по информационным характеристикам .....	239
Маринич А.Н., Припотнюк А.В., Устинов Ю.М., Шигабутдинов А.Р. Современные и перспективные виды дифференциальных подсистем ГНСС.....	246

**Егоров Г.В., Кутейников М.А.** Принципы деятельности береговых служб обеспечения борьбы за живучесть аварийных судов с учетом прочностных ограничений // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – Вып. 30. – 2007. – С. 9 – 20.

В данной статье изложены принципы создания и функционирования береговых служб под техническим наблюдением РС, способных выполнять расчеты аварийной остойчивости и остаточной прочности (Emergency Response Service). Среди них возможность доступа к информационной базе в любое время; наличие специализированных программ расчета; выполнение расчетов по конкретному судну с учетом его реального состояния и загрузки, а также расчетов остаточной прочности, базирующихся на полученных с судна данных по повреждениям корпуса и расчетов аварийной остойчивости, базирующихся на фактической информации по затопленным помещениям; подготовка рекомендаций по разгрузке, спрямлению, обеспечивающих сохранение прочности и остойчивости, уменьшению реакции грунта.

**Михайлов А.С., Овчинников А.Г.** Роль классификационных обществ в реализации требований Сводной конвенции о труде в морском судоходстве // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – Вып. 30. – 2007. – С. 21 – 25.

Сводная конвенция о труде в морском судоходстве (Сводная конвенция), принята в Женеве, в феврале 2006 года на Генеральной конференции Международной организации труда. Сводная конвенция пересмотрела 37 ранее принятых конвенций Международной организации труда (МОТ). По планам МОТ Сводная конвенция будет ратифицирована в 2010 году и вступит в силу в августе 2011 года. Государства-члены МОТ должны провести детальный анализ существующего национального законодательства

и привести его в соответствие со Сводной конвенцией. По мнению аналитиков, Сводная конвенция обеспечит достойные условия труда и отдыха моряков. Сводная конвенция состоит из пяти разделов, каждое положение которых в свою очередь состоит из трех различных, но взаимосвязанных частей: статей, правил и кодекса. В статьях и правилах устанавливаются основные права, принципы и обязательства государств флага, в Кодексе содержится подробная информация о выполнении Правил. Кодекс состоит из Части А (обязательные стандарты) и Части В (факультативные руководящие принципы). Полномочия по проведению инспекций судов на соответствие требованиям Сводной конвенции могут быть переданы признанной организации, которая имеет надлежащую структуру, необходимый технический опыт, обладает возможностями для поддержания квалификации своего персонала и оказания своевременных услуг, сопоставимых с типом и уровнем предоставляемых полномочий.

УДК 341.217:342.52:629.5.011:629.017:005

**Евенко В.И., Гаппоев М.А., Кутейников М.А.** Анализ существующей международной нормативной базы, предназначенной для оценки мореходности пассажирских судов. Перспективы совершенствования и дальнейшего развития // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – Вып. 30. – 2007. – С. 26 – 39.

В статье приводится анализ существующих подходов к оценке безопасности судна, которая является сегодня очень важной задачей для ученых, проектантов и судостроителей, с учетом требований к динамической остойчивости. Приводятся требования к характеристикам мореходности морских судов и объектов, содержащиеся в основных международных документах. В качестве основных документов, определяющих приемлемый уровень безопасности морских судов, в настоящей работе также были рассмотрены правила ведущих классификационных обществ-членов МАКО и директивы Совета ЕС. На основе проведенного анализа существующей нормативной базы по вопросам обеспечения мореходных качеств морских судов и объектов и результатов работы ИМО в

этом направлении в работе сделаны выводы по поддержанию динамической остойчивости.

УДК 629.017:347.799.2

**Борисов Р.В., Гаппоев М.А., Кутейников М.А.** Анализ аварийных случаев на пассажирских судах, связанных с потерей мореходных качеств // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – Вып. 30. – 2007. – С. 40 – 44.

В статье приводится анализ аварийной статистики. В качестве объекта исследования рассматриваются два вида аварийных случаев: кораблекрушение и потеря мореходных качеств. К кораблекрушениям отнесены все аварийные случаи, результатом которых явилась потеря (гибель) судна. К потере мореходных качеств отнесены случаи, когда судно в результате аварии утратило хотя бы одно из своих мореходных качеств, но осталось на плаву и в последующем было возвращено в эксплуатацию. Кроме того, отдельно рассмотрены аварийные случаи, вызванные потерей остойчивости (например, из-за смещения или неверного размещения груза). Сделаны выводы о причинах аварий. Даются рекомендации по уменьшению числа аварийных случаев.

УДК 629.123

**Алферов В.И., Шапошников В.М.** Применение решения термопластической задачи для расчетов сварочных напряжений и деформаций судовых корпусных конструкций // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – Вып. 30. – 2007. – С. 45 – 61.

Существующие методы расчетов остаточных сварочных деформаций, регламентируемые РД 5.9807-93 (Корпуса металлических судов. Методы определения и предотвращения остаточных сварочных деформаций) применимы для расчетов сварочных деформаций сравнительно простых типовых узлов и плоских секций. Даль-

нейшее усовершенствование расчетных методов оценки сварочных деформаций и напряжений предлагается с применением решений термопластической задачи, позволяющей осуществить более детальное моделирование очень сложного сварочного процесса.

УДК 629.123

**Апполонов Е.М., Нестеров А.Б., Тимофеев О.Я., Дидковский А.В., Кутейников М.А.** Система формирования принципиальных инженерных решений по обеспечению ледовой прочности и безопасной эксплуатации судов в российских арктических и замерзающих морях // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – Вып. 30. – 2007. – С. 62 – 83.

В настоящей статье рассматривается система формирования принципиальных инженерных решений, позволяющая повысить надежность и эффективность создаваемых судов ледового плавания для эксплуатации в российских арктических и замерзающих морях. Система, основанная на научно-технической базе расчетов ледовой прочности ЦНИИ им. акад. А.Н.Крылова и регламентационной методологии РМРС, предназначена для решения следующих задач:

выбор ледового класса на стадии формирования технического задания и решение задачи об эквивалентности ледовых классов различных классификационных обществ;

экспресс определение массы корпуса на стадии разработки концепт-проекта путем расчета предварительного необходимого объема ледовых подкреплений;

выбор судокорпусной стали для ледовых усилений и решение нестандартных инженерных проблем на стадии разработки концепт-проекта;

оптимизация конструкции ледовых усилений на стадии технического проектирования;

использование мониторинга ледовых воздействий для формирования рекомендаций по выбору безопасных режимов движения во льдах.

УДК 629.061.6:622.242.424.2:553.98

**Евенко В.И., Чернов В.Г., Балагура С.В.** Деятельность Регистра в качестве инспекционного органа, предоставляющего услуги «третьей стороны» в рамках проектов освоения углеводородных месторождений на шельфе морей // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – Вып. 30. – 2007. – С. 84 – 98.

В настоящей статье рассматривается деятельность Регистра в качестве инспекционного органа при предоставлении услуг в рамках проектов освоения морских нефтегазопромысловых сооружений на разных стадиях их реализации. Обобщен накопленный опыт при оказании услуг в ходе реализации шельфовых проектов.

УДК 531.789.1:531.781:629.5.035.8

**Попов А.А.** Опыт торсиографирования судовых валопроводов с применением современных средств и методов измерений // Научн.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – Вып. 30. – 2007. – С. 99 – 116.

В статье обобщен многолетний опыт по экспериментальному исследованию крутильных колебаний энергетических установок судов Дальневосточного бассейна с применением современных средств на основе оптических и электромагнитных датчиков американского производства. Для обработки торсиограмм применялись передовые компьютерные технологии. В статье содержится анализ возможных помех и искажений при измерениях колебаний, а так же рекомендации по их устранению.

УДК 629/12 – 233/12

**Ефремов Л.В., Кудрявцев М.В., Иванов М.Ю.** Моделирование торсиограмм и спектрограмм при расчете крутильных колебаний силовых установок // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – Вып. 30. – 2007. – С. 117 – 126.

Статья посвящена проблеме, которая актуальна для повышения качества расчетно-экспериментальных исследований не только крутильных колебаний, но и любых колебательных процессов. Авторами предложена и обоснована методика моделирования торсиограмм и спектрограмм на стадии проектирования установки, что позволяет повысить точность и достоверность исследований.

Теоретическая спектрограмма необходима для решения не менее важной задачи выявления помех и искажений, которые могут накладываться на основную запись крутильных колебаний. Это имеет особое значение при освоении новых методов измерений и для совершенствования методов расчета крутильных колебаний.

УДК 629.542:629.463.33

**Блинков А.Н., Власов А.А., Лицис А.В., Шурпяк В.К.** CNG – новая технология морской транспортировки газа: состояние, перспективы, проблемы // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – Вып. 30. – 2007. – С. 127 – 162.

В статье приводится обзор проектов судов CNG по материалам отечественной и зарубежной печати. Производится анализ различных конструктивных параметров грузовых емкостей и оценка их влияния на эффективность перевозки газа в грузовых емкостях CNG. Производится сравнение требований различных нормативных документов в части требуемых коэффициентов запаса прочности, применимых для грузовых емкостей CNG. По результатам анализа сформулированы возможные пути повышения эффективности перевозки газа на судах CNG.

УДК 621.642.02:539.422.52

**Скворцов В.Р., Крахмалев С.Ю., Шурпяк В.К.** Разработка требований к конструкциям, испытаниям и расчетам на прочность композитных сосудов под давлением // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – Вып. 30. – 2007. – С. 163 – 178.

В статье проведен анализ современных подходов к конструкциям и расчетам на прочность композитных сосудов под давлением, выведены расчетные формулы, проведено сравнение результатов аналитических и численных расчетов. На основе разработанной авторами математической модели разработана методика расчетов композитных сосудов под давлением для выбора их прочных размеров.

УДК 621.436-2.001

**Румб В.К., Медведев В.В., Серов А.В.** Основы расчета остаточной долговечности деталей судовых ДВС // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – Вып. 30. – 2007. – С. 179 – 190.

В статье даются основы расчета остаточной долговечности деталей судовых ДВС по критериям усталостной прочности и износа с учетом действия случайных факторов. Данный алгоритм расчета реализован в программе определения остаточного ресурса главного судового дизеля.

УДК 621.1.504.75

**Евенко В.И., Егоров Г.В., Сергеев А.А., Гришкин В.В.** Обоснование повышенных требований Регистра к судам со знаками ЭКО и ЭКО ПРОЕКТ в символе класса // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – Вып. 30. – 2007. – С. 191 – 207.

В настоящей статье показано, что присвоение судам дополнительного знака в символе класса основывается на их соответствии требованиям ИМО, Морских администраций и международной морской индустрии к экологической безопасности судов. При этом отдельные положения дополнительных экологических требований РС являются более строгими, чем требования действующих международных документов.

Суда с подобными знаками в символе класса будут более безопасны по отношению к морской среде и будут пользоваться бóльшим доверием со стороны грузовладельцев, страховщиков, Морской администрации государства флага, портовых властей. Поэтому затраты судовладельцев по строительству таких судов или переоборудованию существующих будут окупаться на стадии эксплуатации.

Целью самого Регистра при введении повышенных экологических требований является фактическое повышение уровня безопасности окружающей среды.

Новые требования РС к конструкции судов, их оборудованию и системам по предотвращению загрязнения от выбросов в атмосферу и сбросов в море продемонстрированы на примере уже построенных судов проекта RSD17.

УДК 629.5

**Бабушкин А.Е.** Судостроение на Северо-Западе – медленное, но уверенное движение вверх // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – Вып. 30. – 2007. – С. 208 – 216.

Настоящая статья посвящена вопросам судостроения в Северо-Западном регионе Российской Федерации. Рассматриваются текущие проблемы, стоящие перед отраслью. Подведены итоги строительства новых судов на предприятиях, расположенных в Москве, Санкт-Петербурге, Ленинградской области и Карелии. Указаны перспективы строительства новых судов на предприятиях региона.

УДК 621039:623.828.8

**Атласов В.И., Егоров В.П.** Новые тенденции в атомной энергетике: плавучие атомные электростанции // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – Вып. 30. – 2007. – С. 217 – 220.

В статье в краткой форме освещается история создания проекта первой плавучей атомной электростанции и рассказывается о предприятиях – участниках этого уникального проекта. Приведены аргументы специалистов в пользу целесообразности создания атомных станций малой мощности и показано их значение в энергосистеме нашей страны. Также указаны места возможного базирования будущих плавучих атомных станций.

УДК 681.586.78:531.781:629.5.035.8

**Жадобин Н.Е., Мачульский В.Б., Викулин В.Б., Лебедев А.И.** Датчики продольных колебаний и осевых усилий в валопроводах судовых энергетических установок // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – Вып. 30. – 2007. – С. 221 – 234.

В статье рассмотрены датчики продольных колебаний и механических напряжений от осевых усилий в валопроводах судовых энергетических установок.

Для измерения продольных колебаний большой интерес представляют волоконно-оптические датчики.

Системы измерения упора с тензорезисторными преобразователями отличаются низкой надежностью и сложностью.

Благодаря высокой чувствительности, бесконтактному съему информации, безинерционности, простоте конструкции, малой базе измерения трансформаторные магнитоупругие преобразователи могут быть рекомендованы для измерения осевых усилий, возникающих при продольных колебаниях.

УДК 629.12:537.611

**Ратников В.И.** О разработке требований к обеспечению электромагнитной безопасности на морских судах // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – Вып. 30. – 2007. – С. 235 – 238.

Известно, что электромагнитные излучения (ЭМИ) техногенного происхождения оказывают негативное влияние на организм человека. Эта проблема приобрела большое значение на морских судах, где члены экипажей вынуждены в течение длительных рейсов находиться под воздействием ЭМИ, создаваемых мощным и разнообразным судовым электрооборудованием токов промышленной частоты. Нормирование ЭМИ на судах в настоящее время ограничивается только радиочастотным диапазоном и относится к надпалубным пространствам. В статье приводится обоснование целесообразности разработки требований по обеспечению на судах электромагнитной безопасности во всем частотном диапазоне и введении их в морские нормативные документы.

УДК 621.396.93

**Солодовниченко М.Б., Томсон В.П.** Сравнительный анализ систем мониторинга по информационным характеристикам // Научн.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – Вып. 30. – 2007. – С. 239 – 245.

В настоящее время для мониторинга мобильных объектов (судов) используются различные радиоэлектронные системы, имеющие различные информационные характеристики. В работе предлагается обобщенный показатель информативности, позволяющий проводить сравнение различных систем мониторинга и выбор системы, обладающей наибольшей эффективностью для решения конкретных задач.

УДК 621

**Маринич А.Н., Припотнюк А.В., Устинов Ю.М., Шигабутдинов А.Р.** Современные и перспективные виды дифференциальных подсистем ГНСС // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – Вып. 30. – 2007. – С. 246 – 260.

В статье рассматриваются современные и перспективные виды дифференциальных подсистем ГНСС, обеспечивающие с высокой надежностью высокоточное определение координат и текущей скорости судов. Показано, что перспективные виды дифференциальных подсистем ГНСС с использованием геостационарных ИСЗ могут решать задачи связи и надежного определения координат места судов как в первой (в открытом море), так и во второй зоне плавания (подходы к портам, портовые воды, а также узкости, в которых ограничена свобода маневрирования) со среднеквадратической погрешностью менее 5 м и задержкой в оповещении целостности системы менее 10 с.

UDC 629.12.539.4 001.2.001.5

**G.V. Egorov, M.A. Kuteinikov.** Principles of Activities of Shore-Based Emergency Response Services with Regard to Strength Limitations // Transactions of Russian Maritime Register of Shipping. – Issue 30. – 2007. – P. 9 – 20.

The present article contains the principles of establishing and functioning under RS technical survey of shore-based emergency response services capable of performing calculations of damage stability and residual strength. Among these, data base access at any time; special calculation programmes; calculations for a particular ship with regard to its actual condition and loading; as well as residual strength calculations based on the ship's data on hull damage and calculations of damage stability based on the actual information concerning flooded spaces; development of recommendations for unloading and righting providing the strength and stability retention and the ground effect reduction.

UDC 629.5.011:061.6:331.91:347.799.11

**A.S. Mikhailov, A.G. Ovchinnikov.** The Role of Classification Societies in the Implementation of the Unified Maritime Labour Convention Requirements // Transactions of Russian Maritime Register of Shipping. – Issue 30. – 2007. – P. 21 – 25.

The Unified Maritime Labour Convention (the Unified Convention) was adopted by the International Labour Organization (ILO) General Conference in February 2006 in Geneva. 37 conventions earlier adopted by the ILO were revised in the Unified Convention. In accordance with the ILO schedule, the Unified Convention will be ratified in 2010 and will enter into force in August 2011. ILO member-states shall thoroughly review their national legislations and bring them into compliance with the Unified Convention. In the opinion of analytics, the Unified Convention will provide adequate labour and rest conditions for seafarers. The Unified Convention consists of three separate but interrelated elements: articles, regulations and the Code. Basic rights, principles

and obligations of Flag States are established in the articles and regulations, and the Code contains detailed information on the regulations fulfillment. The Code consists of Part A (mandatory standards) and Part B (not mandatory guidelines). A recognized organization having the relevant structure, technical experience, resources for maintaining qualifications of its personnel and rendering services corresponding to the type and level of the authority given may be authorized to inspect ships for compliance with the requirements of the Unified Convention.

UDC 341.217:342.52:629.5.011:629.017:005

**V.I. Evenko, M.A. Gappoev, M.A. Kuteinikov.** The Review of the Existing International Normative Base for the Assessment of Passenger Ships Seaworthiness. Prospects for Improvement and Further Development // Transactions of Russian Maritime Register of Shipping. – Issue. 30. – 2007. – P. 26 – 39.

The present article contains the review of the existing methods for the ship's safety assessment, which is a very important task for the scientists, designers and shipowners, considering the requirements for dynamic stability. The requirements are presented for the seaworthiness characteristics of sea-going ships and floating facilities specified in the international documents. The article also considers the rules of the leading classification societies – IACS members and the EC Council Directives as basic documents determining the acceptable safety level of sea-going ships. On the basis of the review of the existing normative base on ensuring seaworthiness of sea-going ships and floating facilities and of the IMO activity results in this respect the conclusions are made on maintaining dynamic stability.

UDC 629.017:347.799.2

**R.V. Borisov, M.A. Gappoev, M.A. Kuteinikov.** The Review of Accidents on Passenger Ships Related to the Loss of Seaworthiness // Transactions of Russian Maritime Register of Shipping. – Issue. 30. – 2007. – P. 40 – 44.

The present article contains the accident rate review. Two types of accidents are analyzed: shipwrecks and loss of seaworthiness. All accidents resulted in the loss of ship are considered as shipwrecks. The loss of seaworthiness means the loss of at least one of seaworthiness characteristics while the ship remains afloat and is further back to operation. Besides, the accidents are analysed caused by the loss of stability (e.g. the shift of cargo or its insecure stowing). Conclusions are made concerning the accidents causes. Recommendations are given on reducing the accident rate.

UDC 629.123

**V.I. Alferov, V.M. Shaposhnikov.** Application of the Thermoplastic Task Solution for Calculations of Welding Stresses and Deformations of Ship Hull Structures // Transactions of Russian Maritime Register of Shipping. – Issue 30. – 2007. – P. 45 – 61.

Existing methods for calculations of residual welding deformations regulated by RD 5.9807-93 (Hulls of steel ships. Methods of determination and prevention of residual welding deformations) are applicable for calculations of welding deformations of comparatively simple representative units and flat sections. For further improvement of assessment methods of welding deformations and stresses, the application of the thermoplastic task solution is recommended, which will enable to use more detailed modeling of a complicated welding process.

UDC 629.123

**E.M. Appolonov, A.B. Nesterov, O.Ya. Timofeyev, A.V. Didkovsky, M.A. Kuteinikov.** Formation System of Principal Engineering Solutions for Ensuring the Ice Strengthening and Safe Operation of Ships in the Russian Arctic and Freezing Seas // Transactions of Russian Maritime Register of Shipping. – Issue 30. – 2007. – P. 62 – 83.

In the present article the formation system of principal engineering solutions is considered which enables to increase the reliability and

efficiency of ships designed for ice operation in the Russian Arctic and freezing seas. Calculations of ice strengthening by Krylov Shipbuilding Research Institute and Russian Maritime Register of Shipping regulating methods are the scientific basis for the system intended to solve the following tasks:

ice class choosing at the stage of terms of reference and solving the task of ice classes of different classification societies equivalency;

rapid determining of the hull mass at the stage of the conceptual design development by means of calculations of the preliminary required extent of ice strengthening;

choosing of shipbuilding steel for ice strengthening and solving atypical engineering tasks at the stage of the conceptual design development;

optimization of ice strengthening structure at the stage of preliminary design;

application of ice effects monitoring to develop recommendations on choosing safe regimes of navigation in ice.

UDC 629.061.6:622.242.424.2:553.98

**V.I. Evenko, V.G. Chernov, S.V. Balagura.** The Register Activities as an Inspection Body Rendering “Third Party” Services within the Projects of Hydrocarbon Fields Development on the Sea Shelf // Transactions of Russian Maritime Register of Shipping. – Issue 30. – 2007. – P. 84 – 98.

The present article considers the Register activities as an inspection body when rendering services within the projects of oil and gas facilities development at different stages of implementation. The experience gained while rendering services during the shelf projects implementation is generalized.

UDC 531.789.1:531.781:629.5.035.8

**A.A. Popov.** Experience of Shipboard Shafting Torsiography Using the Existing Measuring Means and Methods // Transactions of

Russian Maritime Register of Shipping. – Issue 30. – 2007. – P. 99 – 116.

The many-years experience of experimental studies of torsional vibrations of the shipboard power plants in the Far East Region using existing methods based on American optical and electromagnetic sensors is summarized in the article. The advanced computer technologies were applied for processing torsiograms. The article contains the analysis of possible interferences and distortions in vibrations measuring as well as recommendations for their elimination.

UDC 629/12 – 233/12

**L.V. Efremov, M.V. Kudriavtsev, M.Yu. Ivanov.** The Modeling of Torsiograms and Spectrograms while Calculating Torsional Vibrations of Propulsion Plants // Transactions of Russian Maritime Register of Shipping. – Issue 30. – 2007. – P. 117 – 126.

The article considers the problem of improving the quality of calculation and experimental research of both torsional vibrations and oscillation processes. The authors have offered and substantiated the methods of modeling torsiograms and spectrograms at the stage of the plant design which enables to improve the accuracy and reliability of research.

The theoretical spectrogram is necessary for solving not less important task of identifying the interferences and distortions which may be supplemented to the basic record of torsional vibrations. This is of particular importance for implementing new methods of measurements and for improving the methods of torsional vibrations calculation.

UDC 629.542:629.463.33

**A.N. Blinkov, A.A. Vlasov, A.V. Litsis, V.K. Shurpiak.** CNG is a New Technology of Gas Carriage: Condition, Perspectives, Problems // Transactions of Russian Maritime Register of Shipping. – Issue 30. – 2007. – P. 127 – 162.

The article contains the review of CNG ship designs based on materials of domestic and foreign publications. Different structural parameters of cargo tanks and assessments of their influence on the efficiency of gas carriage in CNG cargo tanks are analysed. The requirements of different normative documents as regards the required factors of strength margin used for CNG cargo tanks are compared. The possible ways of improving the gas carriage efficiency on board CNG ships have been determined based on the analysis results.

UDC 621.642.02:539.422.52

**V.R. Skvortsov, S.Yu. Krahmalev, V.K. Shurpiak.** Development of Requirements for Structures, Tests and Strength Calculations of Composite Vessels under Pressure // Transactions of Russian Maritime Register of Shipping. – Issue 30. – 2007. – P. 163 – 178.

In the article the existing approaches to structures and strength calculations of composite vessels under pressure are analysed, calculation formulae are determined, the results of analytical and numeral calculations are compared. Based on the mathematical model developed by the authors, calculation procedure for composite vessels under pressure is elaborated to choose their scantlings.

UDC 621.436-2.001

**V.K. Rumb, V.V. Medvedev, A.V. Serov.** The Basis for Calculation of Residual Service Life of Shipboard Internal Combustion Engines Components // Transactions of Russian Maritime Register of Shipping. – Issue 30. – 2007. – P. 179 – 190.

The article contains the basis for calculation of residual service life of shipboard internal combustion engines components with regard to the random factors effect. The applied calculation algorithm is implemented in the programme for determining the residual service life of the main marine diesel.

UDC 621.1.504.75

**V.I. Evenko, G.V. Egorov, A.A. Sergeev, V.V. Grishkin.** Substantiation for the Register Enhanced Requirements for Ships with the Distinguishing Marks ECO and ECO DESIGN in the Class Notation // Transactions of Russian Maritime Register of Shipping. – Issue 30. – 2007. – P. 191 – 207.

The present article demonstrates that the distinguishing marks in the class notation are assigned based on compliance with the requirements of IMO, maritime administrations and international maritime industry for ecological safety of ships. At that some provisions of the Register additional ecological requirements are more strict than the requirements of the effective international instruments.

Ships having such distinguishing marks in the class notation are safer to the marine environment and will be more credible from the point of view of cargo owners, underwriters, flag state maritime administrations, port authorities. Therefore, shipowners' expenses for construction of such ships or conversion of the existing ships will be compensated at the operation stage.

The Register objective when introducing the enhanced ecological requirements is to enhance the safety level of the environment.

The new Register requirements for ships construction, equipment and systems for the prevention of pollution from emissions and discharges are demonstrated by example of already built ships of RSD17 project.

UDC 629.5

**A.E. Babushkin.** Shipbuilding in the North-West – a Slow but Steady Progress // Transactions of Russian Maritime Register of Shipping. – Issue 30. – 2007. – P. 208 – 216.

The present article considers the problems of shipbuilding in the North-West of the Russian Federation. Existing problems of the industry are reviewed. The results of the new ships building at shipyards in Moscow, Saint-Petersburg, Leningrad Region and Karelia are sum-

marized. Prospects of new ships building at the regional shipyards are specified.

UDC 621039:623.828.8

**V.I. Atlasov, V.P. Egorov.** New Tendencies in the Nuclear Power Industry: Floating Nuclear Power Plants // Transactions of Russian Maritime Register of Shipping. – Issue 30. – 2007. – P. 217 – 220.

The article gives the brief history of the first floating nuclear power plant project and describes the firms engaged in this unique project. The article contains the specialists' grounds for the practicability of low-power nuclear power plants development and demonstrates their importance for the energetic system of our country. Possible locations of future floating nuclear power plants are also indicated.

UDC 681.586.78:531.781:629.5.035.8

**N.E. Zhadobin, V.B. Machulsky, V.B. Vikulin, A.I. Lebedev.** Sensors of Longitudinal Vibrations and Axial Forces in Shafting of Shipboard Power Plants // Transactions of Russian Maritime Register of Shipping. – Issue 30. – 2007. – P. 221 – 234.

In the article sensors of longitudinal vibrations and stresses caused by axial forces in shafting of shipboard power plants are considered.

For longitudinal vibrations measurements fibre optical sensors are of great interest.

Thrust measuring systems with strain gages have low reliability and are too complicated.

Due to high sensitivity, remote reading of information, non-delayed action, simple design and small measuring base, transformer magnetoelastic converters may be recommended for measurement of axial forces at longitudinal vibrations.

UDC 629.12:537.611

**V.I. Ratnikov.** The Development of Requirements for Ensuring Electromagnetic Security on Sea-Going Ships // Transactions of Russian Maritime Register of Shipping. – Issue 30. – 2007. – P. 235 – 238.

It is known that technogenic electromagnetic emissions (EME) affect the human body. This problem is of great importance on sea-going ships where during long voyages the crewmembers are exposed to influence of EME generated by the ship's various powerful industrial-frequency electrical equipment. At present the normalization of EME on ships covers the radio-frequency band only and relates to the above-deck spaces. The article substantiates the necessity of the development of requirements for ensuring electromagnetic security in all frequency bands and introduction of such requirements into maritime normative documents.

UDC 621.396.93

**M.B. Solodovnichenko, V.P. Tomson.** The Comparative Analysis of Monitoring Systems by Informative Characteristics // Transactions of Russian Maritime Register of Shipping. – Issue 30. – 2007. – P. 239 – 245.

At present different radio electronic systems with different informative characteristics are used for mobile objects (ships) monitoring. In this article the summarized informative factor is suggested which allows to compare different monitoring systems and to choose the most efficient system to solve particular tasks.

UDC 621

**A.N. Marinich, A.V. Pripotniuk, Yu.M. Ustinov, A.R. Shigabudinov.** The Existing and Perspective Types of GNSS Differential Subsystems // Transactions of Russian Maritime Register of Shipping. – Issue 30. – 2007. – P. 246 – 260.

The article considers the existing and perspective types of GNSS differential subsystems ensuring the high accuracy and reliability of the ship's positioning and current speed determination. It is demonstrated that perspective types of DGNS using synchronistic circumterrestrial satellites may solve communication tasks and reliable ship's positioning both in the first area of navigation (open sea) and in the second area of navigation (approaches to ports, port water areas, as well as narrow waters, where manoeuvrability is restricted), with mean square error less than 5 m and overall transmitting delay less than 10 s.

Российский морской регистр судоходства

**Научно-технический сборник, вып. 30**

*Редакционная коллегия Российского морского регистра судоходства*

Ответственный за выпуск *Е. Б. Мюллер*

Главный редактор *М. Ф. Ковзова*

Редактор *И. В. Сабина*

Компьютерная верстка *Д. Г. Иванова*

Подписано в печать 21.11.07. Формат 60 × 84 1/16. Гарнитура Гельветика.

Усл. печ. л.: 14,4. Уч.-изд. л.: 15,9. Тираж 300. Заказ 2318.

Российский морской регистр судоходства  
191186, Санкт-Петербург, Дворцовая набережная, 8

Тел.: (812) 312-89-59

Факс: (812) 312-89-86