

# НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СБОРНИК

РОССИЙСКОГО МОРСКОГО РЕГИСТРА СУДОХОДСТВА

№ 37

## RESEARCH BULLETIN

BY RUSSIAN MARITIME REGISTER OF SHIPPING



Санкт-Петербург  
2014

## НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОМУ СОВЕТУ РЕГИСТРА – 100 ЛЕТ

---



Стремительное развитие морской индустрии настоятельно диктует необходимость предоставления классификационными обществами услуг, обеспечивающих стандарты безопасности мирового уровня, которые позволяют предвидеть, удовлетворить потребности и превзойти ожидания клиентов. Все это возможно только при современном уровне глубоких научных исследований.

На протяжении вот уже ста лет координацию научно-технической деятельности Российского морского регистра судоходства обеспечивает Научно-технический совет. Образованный почти сразу после основания Общества для классификации морских, речных и озерных судов «Русский Регистр», Технический совет стал его важнейшим органом, куда входили самые известные специалисты в области проектирования, строительства и эксплуатации судов: А.П. Фан-дер-Флит, Г.Н. Пио-Ульский, А.П. Шершов, В.П. Аршаулов, Р.М. Ловягин, В.Б. Гаазе и др. Первым председателем Технического совета единогласно был

избран профессор К.П. Боклевский – выдающийся ученый-кораблестроитель, идейный вдохновитель и практический создатель высшего морского образования в России, инициатор создания Общества «Русский Регистр».

Научно-технический совет Регистра всегда всемерно содействовал совершенствованию технических стандартов при проектировании судов, в судостроении, судоходстве, промышленности, на любом этапе полностью соответствуя самой передовой научной мысли. Результаты выполненных исследований с 1916 года находят отражение в научно-технических сборниках.

В юбилейный год Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства выходит в новом, более современном и удобном формате, который будет способствовать расширению читательской аудитории и, как следствие, привлечению к публикации молодых представителей научных школ.

Как и сто лет назад, главная ценность Научно-технического совета сегодня – это кадры: квалифицированные ученые, инженеры, инспекторский состав. В честь юбилея Научно-технического совета Регистром учреждена награда за выполнение и внедрение в нормативные документы лучшей научно-исследовательской работы. Награда будет вручаться авторским коллективам, включающим как работников Российского морского регистра судоходства, так и представителей научных организаций, конструкторских бюро, профильных учебных заведений.

100-летие Научно-технического совета – важная веха в жизни Российского морского регистра судоходства. Поздравляю Научно-технический совет со столетним юбилеем и желаю ему дальнейших успехов в деле обеспечения безопасности объектов морского транспорта!

**С.Н. Седов,**  
**генеральный директор**  
**ФАУ «Российский морской регистр судоходства»**

## ОБРАЩЕНИЕ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

---

### УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ!

Перед Вами – новый выпуск журнала «Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства», приуроченный к 100-летию Научно-технического совета Регистра и издаваемый в обновленном формате. Материалы этого номера, как и прежде, охватывают широкий круг вопросов, актуальность которых подтверждена практикой работы Регистра.

Среди них – особенности обеспечения хладостойкости высокопрочной стали для корпусов судов ледового плавания. Применение такой стали для конструкций, подверженных длительному воздействию низких температур, рассматривалось Регистром при классификации арктических судов-газовозов проекта «Ямал СПГ».

В статье об особенностях эксплуатации гребных винтов в ледовых условиях систематизированы результаты работы авторского коллектива, который в 2014 году получил награду Регистра за лучшее научное исследование. Результаты работы внедрены в требования нормативных документов Регистра.

В номере Вы найдете статьи по практическим вопросам применения современных требований ИМО. В частности, представлены особенности расчета Конструктивного Коэффициента Энергетической Эффективности (EEDI) с учетом систем охлаждения главного двигателя, а также практические аспекты испытаний защитных покрытий корпусных конструкций на соответствие стандарту ИМО PSPC.

В разделе «Информационные технологии» опубликована статья о разработке отечественной САПР для проектирования крупнотоннажных транспортных судов. В качестве основного критерия при создании САПР автором статьи рассмотрено

сокращение времени разработки проекта судна в рамках предконтрактного предложения до 2 – 3 дней.

Нашли отражение вопросы развития новой энергетики – морских (оффшорных) ветроэлектрических станций, что актуально с учетом тенденции к увеличению энергетического потенциала ведущих стран за счет введения в эксплуатацию ветроэлектрических установок. Ежегодный прирост мощностей за последнее десятилетие находится на уровне 25 – 35%, а объем рынка ветроэнергетики составляет десятки миллиардов евро.

Представлены статьи, поднимающие вопросы экологической безопасности Балтийского моря, развития технических средств обнаружения нефтяных пятен и многие другие практические вопросы, имеющие непосредственное отношение к безопасности человеческой жизни на море и защите окружающей среды.

Мы ставим своей целью дальнейшее развитие журнала, повышение информационной доступности издания, расширение читательской аудитории. Редакция постоянно работает над повышением качества публикаций, поэтому будет приветствовать все предложения по дальнейшему развитию издания. Приглашаем всех заинтересованных авторов к сотрудничеству!



**С уважением,  
главный редактор журнала,  
к.т.н. М.С. Бойко**



## СОДЕРЖАНИЕ

|  |   |
|--|---|
| <i>Седов С.Н.</i> Научно-техническому совету Регистра – 100 лет . . . . . 2  | <i>S.N. Sedov</i> Centennial of the Register Scientific and Technical Council   |
| <i>Бойко М.С.</i> Обращение главного редактора. . . . . 3  | <i>M.S. Boyko</i> Editor-in-Chief address   |
| <b>ОБОЗРЕНИЕ</b> . . . . . 6   | <b>NEWSROOM</b>   |
| <b>БЕЗОПАСНОСТЬ МОРЕПЛАВАНИЯ И ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ</b>   | <b>MARITIME SAFETY AND ENVIRONMENTAL PROTECTION</b>   |
| <i>Изотов О.А., Кириченко А.В., Латухов С.В., Соляков О.В.</i> Анализ рисков аварийных разливов нефти в Балтийском море . . . . . 8  | <i>O.A. Izotov, A.V. Kirichenko, S.V. Latukhov, O.V. Solyakov</i> Oil spill risk analysis for the Baltic Sea  |
| <b>ПРОЧНОСТЬ СУДОВ И ПЛАВУЧИХ СООРУЖЕНИЙ</b>   | <b>STRENGTH OF SHIPS AND FLOATING FACILITIES</b>  |
| <i>Литонов О.Е.</i> Ветровые нагрузки на средства океанотехники . . . . . 12   | <i>O.Ye. Litonov</i> Wind loads on offshore facilities  |
| <i>Емельянов М.Д.</i> Упругие характеристики композитов судовых корпусных конструкций . . . 16   | <i>M.D. Yemelyanov</i> Elastic properties of hull structural composites   |
| <b>МОРЕХОДНЫЕ КАЧЕСТВА СУДОВ</b>   | <b>SEAWORTHINESS</b>  |
| <i>Великанов Н.Л., Корягин С.И., Ярисов В.В.</i> Остойчивость рыболовных судов на промысле. . . . . 23   | <i>N.L. Velikanov, S.I. Koryagin, V.V. Yarisov</i> Fishing vessel stability when trawling   |
| <b>МАТЕРИАЛЫ И СВАРКА</b>  | <b>MATERIALS AND WELDING</b>  |
| <i>Башаев В.К., Мотовилина Г.Д., Рябов В.В., Сыч О.В., Гусев М.А.</i> Хладостойкость высокопрочной легированной стали с пределом текучести 500 МПа. . . . . 29                     | <i>V.K. Bashaev, G.D. Motovilina, V.V. Ryabov, O.V. Sych, M.A. Gusev</i> Cold resistance of high strength alloy steel with a yield stress of 500 MPa              |
| <i>Михайлова М.А., Яковлев Н.С., Кордонец С.М., Манихин И.В.</i> Оборудование и методика испытаний защитных покрытий балластных цистерн и пространства двойного борта . . . . . 39 | <i>M.A. Mikhailova, N.S. Yakovlev, S.M. Kordonets, I.V. Manikhin</i> Test equipment and procedure for protective coatings of ballast tanks and double-side spaces |
| <b>МЕХАНИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ДВИЖИТЕЛИ</b>  | <b>MACHINERY INSTALLATIONS AND PROPULSION</b>   |
| <i>Сергеев А.А., Иванов М.Ю., Серов А.В., Семиничев Д.С.</i> Особенности эксплуатации гребных винтов современных судов ледового плавания и развитие правил Регистра. . 42          | <i>A.A. Sergeev, M.Yu. Ivanov, A.V. Serov, D.S. Semionichev</i> Propeller operation in modern ice ships and development of Register rules                         |
| <i>Шшишкин В.А., Кручинина И.Ю., Шурпяк В.К.</i> Перспективы применения топливных элементов при перевозках СПГ. . . . . 45   | <i>V.A. Shishkin, I.Yu. Kruchinina, V.K. Shurpyak</i> Prospective use of fuel cells in LNG transportation   |

*Шурпяк В.К.* Учет особенностей систем охлаждения при оценке энергетической эффективности судов . . . . . 51

*Береза П.И., Ярисов В.В.* Применение колесного движителя при проектировании амфибийных транспортно-пассажирских катеров. . . . . 55

### **ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ И РАДИОНАВИГАЦИОННОЕ ОБОРУДОВАНИЕ**

*Мищенко В.Ф., Устинов А.А.* Сравнительная оценка надежности различных вариантов судовых электроэнергетических систем. . . . . 58

*Маринич А.Н., Припотнюк А.В., Устинов Ю.М.* Радиолокационное обнаружение нефтяных пятен на взволнованной морской поверхности . . . . . 64

### **ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ**

*Рюмин С.Н.* Состав и средства создания базовой информационной модели для систем автоматизированного проектирования крупнотоннажных судов . . . . . 70

### **ПРОМЫШЛЕННОЕ ОБОРУДОВАНИЕ**

*Елистратов В.В., Большев А.С., Мегрецкий К.В.* Проектирование и научное обоснование морских ветроэлектрических станций. . . . . 77

### **АТОМНЫЕ СУДА**

*Королев В.И., Ластовцев А.Ю.* Плановое повышение безопасности атомных ледоколов – актуальное требование времени . . . . . 86

### **ПРОБЛЕМЫ ЧЕЛОВЕЧЕСКОГО ФАКТОРА**

*Белов И.М., Мацевич Л.М., Разлетова А.Б.* Оценка вредного воздействия вибрации на организм людей на судне в ледовых условиях . . . . . 91

*Костылев И.И., Мясников Ю.Н., Петухов В.А.* Безопасность мореплавания и проблемы подготовки морских инженеров . . . . . 94

**АННОТАЦИИ . . . . . 97**

**ПРАВИЛА ПРЕДОСТАВЛЕНИЯ СТАТЕЙ . . 104**

*V.K. Shurpyak* Cooling system features in ship energy efficiency estimation

*P.I. Berioza, V.V. Yarisov* Paddle wheel for amphibious transport and passenger boats design

### **ELECTRICAL AND RADIO NAVIGATIONAL EQUIPMENT**

*V.F. Mishchenko, A.A. Ustinov* Ship electrical power systems in comparative reliability analysis

*A.N. Marinich, A.V. Pripotniuk, Yu.M. Ustinov* Radar detection of oil spills in a rough sea

### **INFORMATION TECHNOLOGY**

*S.N. Riumin* Composition and development of basic information model for large ship CAD systems

### **INDUSTRIAL EQUIPMENT**

*V.V. Yelistratov, A.S. Bolshev, K.V. Megretsky* Design and scientific grounds for marine wind power stations

### **NUCLEAR SHIPS**

*V.I. Koroliyov, A.Yu. Lastovtsev* Systematic safety improvement for nuclear icebreakers: present day imperative

### **HUMAN ELEMENT PROBLEMS**

*I.M. Belov, L.M. Matsevich, A.B. Razlyotova* Assessment of negative vibration effects upon humans on board a ship in ice conditions

*I.I. Kostylev, Yu.N. Miasnikov, V.A. Petukhov* Maritime safety and marine engineers training

**ANNOTATIONS**

**ARTICLE SUBMITTAL REGULATIONS**

## ОБОЗРЕНИЕ

### Новые проекты судов с классом РС

На строительных площадках ООО «Балтийский завод – Судостроение» под техническим наблюдением Российского морского регистра судоходства (РС) реализуется сразу несколько проектов.

Одним из них является проект 22220 – новый тип российских атомных ледоколов, спроектированных ЦКБ «ОСК-Айсберг». Символ класса РС: **КМ⊗ Icebreaker9 [2] AUT2-ICS EPP**. Благодаря принятому конструктивному решению ледокол сможет менять осадку, что позволит ему эффективно работать как на глубокой воде в западных районах Арктики (Баренцево, Печорское и Карское моря), так и на более мелководных участках в устье Енисея и районе Обской губы. Судно будет способно продвигаться непрерывным ходом в сплошном ледяном поле толщиной до 2,8 м. На класс РС предполагается построить три таких ледокола. Эти суда станут самыми большими и самыми мощными ледоколами в мире. Сдача головного судна в эксплуатацию запланирована на конец 2017 г.



В 2014 г. на Невском судостроительно-судоремонтном заводе на класс РС продолжено строительство серии многофункциональных аварийно-спасательных судов проекта MPSV07. В июне завершено строительство третьего судна – «Спасатель Заборщиков», в августе спущено на воду четвертое – «Спасатель Демидов». Символ класса РС: **КМ⊗ Arc 5 [1] AUT1-ICS OMBO FF3WS DYNPOS-2 EPP salvage ship**.

Строительство серии ведется в соответствии с государственным контрактом для Федерального агентства морского и речного транспорта РФ и Дирекции государственного заказчика программ развития морского транспорта. Проект разработан ЗАО «Морское инженерное бюро-дизайн-СПб».



Суда данного проекта могут проводить снятие с мели и рифов аварийных судов, откачку воды из затопленных отсеков, буксировку, в том числе в

ледовых условиях, аварийных судов к месту убежищ, поиск, спасение и эвакуацию людей, оказывать помощь в тушении горящего на воде топлива, ликвидации пожаров на плавучих и береговых объектах, аварийных разливов нефти и нефтепродуктов, в том числе с температурой вспышки ниже 60 °С. Также они способны обеспечивать подводно-технические работы водолазов на глубине до 300 м, обследование морского дна и поврежденных объектов на глубинах до 1000 м.



РС подписал с азербайджанской верфью Baku Shipyard LLC контракт на постройку трех высокоскоростных судов проекта 38M crew boat (проектант – SHIPTECH, Сингапур) для Азербайджанского Каспийского морского пароходства.

Начало строительства – август 2014 г., срок сдачи заказчику – до мая 2016 г. По завершении постройки судам будет присвоен класс РС: **КМ⊗ HSC crew boat**.

Суда предназначены для доставки персонала (до 80 чел.) и различных грузов на плавучие буровые установки и другие морские объекты.



В Южной Корее на верфи STX Offshore and Shipbuilding Co., Ltd в 2014 г. под техническим наблюдением РС завершено строительство двух судов для перевозки сжиженного природного газа (СПГ) – «Великий Новгород» и «Псков». В процессе достройки находятся аналогичные суда "SCF Melampus" и "SCF Mitre". Символ класса РС: **КМ⊗ Ice2 AUT1 OMBO EPP ANTI-ICE LI CCO ECO-S WINTERIZATION(-30) gas carrier type 2G (methane)**.

Суда серии – современные газовозы типоразмера Atlanticmax с грузовыми танками мембранного типа общей грузоподъемностью 170 000 куб. м. Механизмы и оборудование сертифицированы для эксплуатации при температуре –30 °С. Суда предназначены для круглогодичной транспортировки газа практически со всех существующих терминалов СПГ, в том числе, с первого российского терминала СПГ «Пригородное» на о. Сахалин.

Серия строится по заказу ОАО «Совкомфлот» в рамках долгосрочных соглашений с компаниями «Газпром» и "Shell".



В рамках реализации проекта «Ямал СПГ» на южнокорейской верфи Daewoo Shipbuilding & Marine

Engineering под техническим наблюдением РС начато строительство первого газовоза с грузовыми танками мембранного типа суммарным объемом 170 000 куб. м и ледовыми усилениями категории Arc7. Суда проекта смогут работать круглогодично при температурах до  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  и будут способны самостоятельно преодолевать льды толщиной до 1,7 м. Предполагаемая дата ввода в эксплуатацию первого судна – июнь 2016 г.

Одной из ключевых стадий создания проекта этих судов стала процедура принципиального одобрения РС, включившая рассмотрение возможности применения мембранных систем хранения груза, разработанных французской компанией GTT (GazTransport & Technigaz) для проекта «Ямал СПГ».

### Шельфовые проекты

Среди достижений в области шельфовых проектов – участие РС в освоении морского нефтегазоконденсатного месторождения им. В. Филановского в северной части Каспийского моря – самого крупного месторождения по запасам нефти из открытых в России за последние 10 лет. РС осуществляет техническое наблюдение за всем комплексом морских сооружений – от изготовления материалов и изделий до проведения сложнейших морских операций по буксировке платформ и их монтажу на точке установки.



Под техническим наблюдением РС на предприятиях Астраханской области построены, отбуксированы и установлены в районе эксплуатации опорные основания объектов первой очереди освоения: ледостойкой стационарной платформы (ЛСП-1), платформы жилого модуля (ПЖМ-1), райзерного блока и центральной технологической платформы. С помощью транспортно-монтажной баржи «Юрий Кувыкин» (символ класса РС: **KE R2-RSN pontoon**) в район установки также доставлены и совмещены с опорными основаниями верхние строения ЛСП-1 и ПЖМ-1. В настоящий момент ведется достройка и оборудование этих объектов, проведена экспертиза проектной документации и осуществляется строительство объектов второй очереди.

Кроме того, под техническим наблюдением РС ведется укладка морского подводного трубопровода для данного месторождения. В рамках участия в проекте РС также оказывает весь спектр классификационных и конвенционных услуг при строительстве по заказу ОАО «ЛУКОЙЛ» судна-спасателя на сингапурской верфи Keppel Singmarine Pte Ltd и двух судов обеспечения морских нефтегазодобывающих платформ на предприятии Keppel Nantong в Китае.



В 2014 г. с платформы «Приразломная» была отгружена первая нефть, добытая на морском месторождении российской Арктики.

Первая морская ледостойкая стационарная платформа (МЛСП) на шельфе российской Арктики – «Приразломная» – спроектирована и построена под техническим наблюдением РС. Объект установлен в Печорском море, в 60 км от берега. Устойчивость платформы на дне обеспечивается ее собственным весом. При строительстве были использованы конструкционные материалы из специальных сплавов, устойчивых к низкой температуре и повышенным ледовым нагрузкам, что обеспечивает возможность круглогодичной эксплуатации платформы в экстремальных арктических условиях.

Технология работы МЛСП «Приразломная» полностью исключает сброс в море промышленных и бытовых отходов, масел, пластовой воды, загрязненных производственных, ливневых стоков и других вредных веществ.

Отходы бурения и производства помещаются в дренажные емкости, контейнеры и танки с последующей перегрузкой на транспортные суда для утилизации на специализированном полигоне. Пластовая вода, нефтесодержащие балластные, льяльные и сточные воды перед закачкой в поглощающую скважину (пласт) проходят всю необходимую очистку.

Обслуживают месторождение крупнотоннажные танкеры ледового класса, построенные на класс РС.





## БЕЗОПАСНОСТЬ МОРЕПЛАВАНИЯ И ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

**О.А. Изотов**  
канд. техн. наук, доц.

**А.В. Кириченко**  
д-р техн. наук, проф.

**С.В. Латухов**  
д-р геогр. наук, проф.

**О.В. Соляков**  
канд. техн. наук,  
канд. юрид. наук, доц.



ГУМРФ  
им. адм. С.О. Макарова

### АНАЛИЗ РИСКОВ АВАРИЙНЫХ РАЗЛИВОВ НЕФТИ В БАЛТИЙСКОМ МОРЕ

Сегодня Балтийское море подвергается сильному нефтяному загрязнению, его акватории загрязнены нефтью больше, чем Мировой океан в целом. Ежегодно с различными стоками в акваторию Балтийского моря попадает до 600 тыс. т нефти, что не удивительно, ведь на Балтийское море приходится до 10% мировых морских перевозок, ежедневно в нем находится более 6000 больших кораблей и танкеров.

С ростом объема транспортировки и добычи нефти в этом бассейне будет повышаться риск как систематического загрязнения, так и вызванного авариями и катастрофами.

Вместе с тем, при большой насыщенности региона опасными промышленными предприятиями последствия даже отдельно взятой аварии трудно предсказуемы. К тому же в ряде случаев одна авария является причиной другой. Так, например, разлитая на поверхности воды нефть в виде эмульсии может достигать водозаборов и, попадая в контуры охлаждения машин, приводить к авариям. Ущерб от разливов нефти может быть огромен. Вследствие катастрофы танкера «Престиж» в ноябре 2002 г. у берегов Испании

он составил 5 млрд евро. При этом возмещен он был не более чем на 3%.

Проблема загрязнения вод аварийными разливами нефти и нефтепродуктов, перевозимых танкерами, актуальна для всех морей, но для Балтийского моря в особенности. Это объясняется рядом причин, среди которых можно выделить большое число нефтяных портов (рис. 1), его относительно малую глубину и низкое содержание кислорода в воде. Малая глубина не обеспечивает требуемого перемешивания. Низкое содержание кислорода обусловлено характером грунтов, слагающих дно: эти грунты поглощают кислород из морской воды. Балтийское море относительно молодое и физико-химические процессы, происходящие в нем, еще не стабилизировались.

Разумеется, что все страны, имеющие выход к Балтийскому морю, ответственны за его чистоту, однако Россия, как наиболее крупный экспортер нефти морем, привлекает в этом отношении особое внимание. В последние годы объем перевозок нефти морем постоянно увеличивается за счет строительства новых морских портов неподалеку от Санкт-Петербурга. Первым таким портом явился Приморск, (120 км от Санкт-Петербурга), вторым –



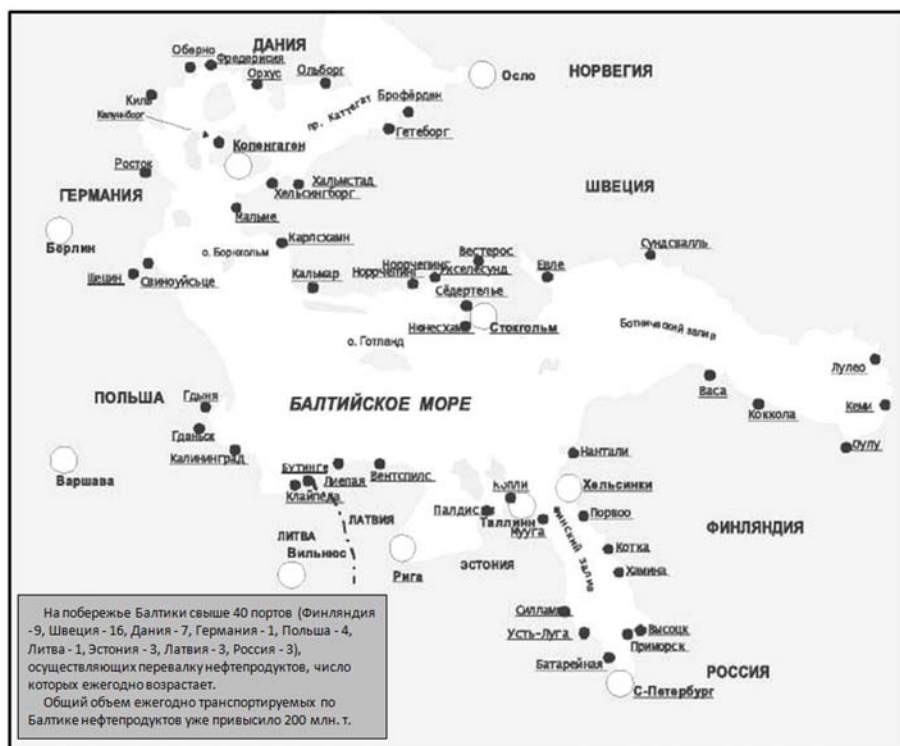


Рис. 1 Нефтяные порты Балтийского моря

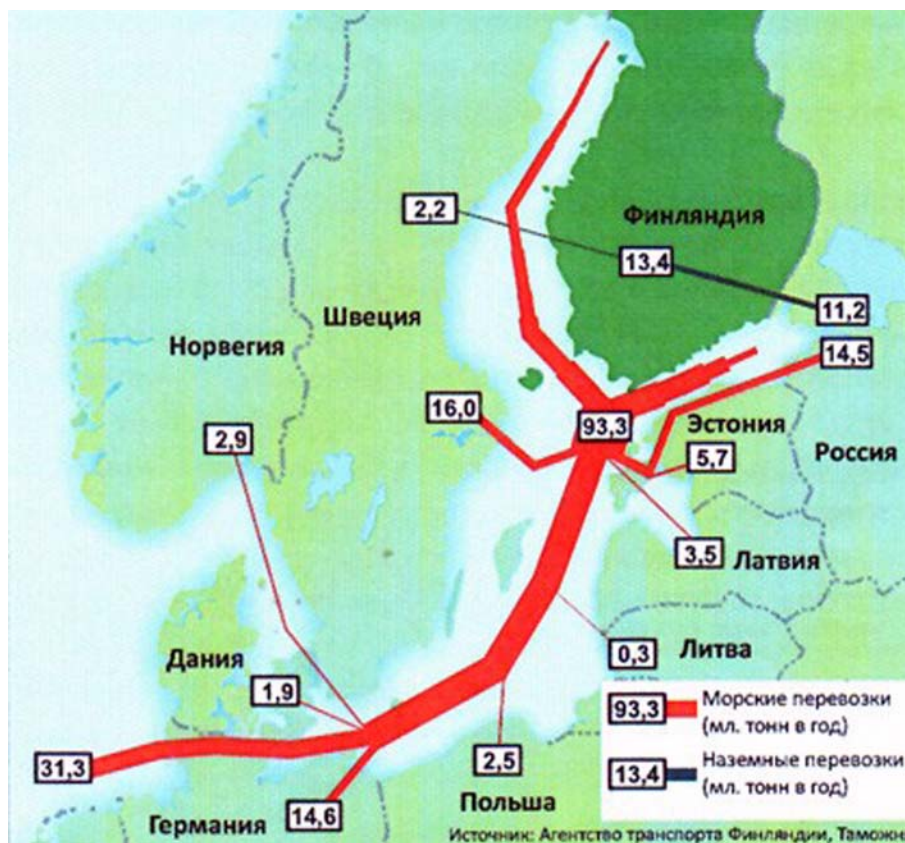


Рис. 2 Объем морских перевозок в акватории Балтики

порт Высоцк, расположенный на одноименном острове в 160 км. Третий значимый порт в Ленинградской области – Усть-Луга (200 км к западу от Северной столицы).

Ежегодный прирост числа судов, находящихся в плавании в Балтийском море, ожидается на уровне 3 – 8%, и это при том, что в настоящее время интенсивность движения судов уже достаточно высока. Результаты исследований, проведенных по программе TACIS, показывают, что рост перевозок нефти в бассейне Балтики к 2017 г. составит 39% по отношению к 1995 г., а возрастание общего объема перевозок – 92%. Существующий объем перевозок представлен на рис. 2. При этом возраст половины судов, осуществляющих эти перевозки, будет превышать 20 лет.

Частота прохода судов в таких основных районах акватории Балтики, как Скоу (Дания), выросла на 20% за период с 2005 по 2011 г. (рис. 3).

Анализ рисков используется в настоящее время в различных отраслях промышленности и является наиболее удобным инструментом для принятия решений в условиях неопределенности. Он основывается на статистике аварий или повреждений, произошедших в процессе работы транспорта. Риски нефтяного и химического загрязнения Балтийского моря показаны на рис. 4.

Факторами, которые представляют основную опасность в отношении возникновения пятен нефти, являются:

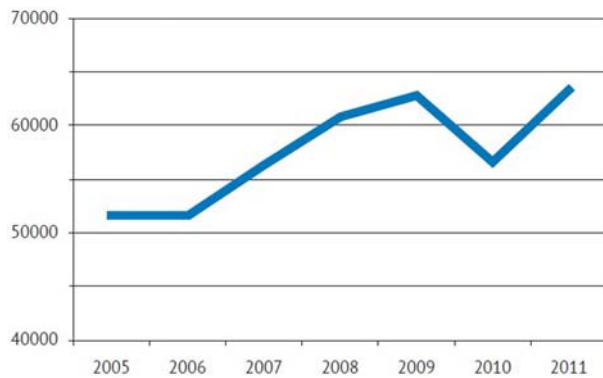


Рис. 3 Частота прохода судов в районе акватории Скоу (Дания)

- использование для транспортировки нефти судов, не соответствующих современным требованиям обеспечения безопасности;

- большая интенсивность движения судов;

- недостаточное обеспечение требований навигационной обстановки.

К перечисленным факторам можно добавить также сложные погодные условия и ледовую обстановку.

Для оценки вероятности аварий судов разработан ряд моделей, позволяющих оценивать ее с учетом тех или иных факторов.

Широкий спектр методов проведения анализа риска в значительной мере затруднен к использованию, когда дело касается аварий танкеров.

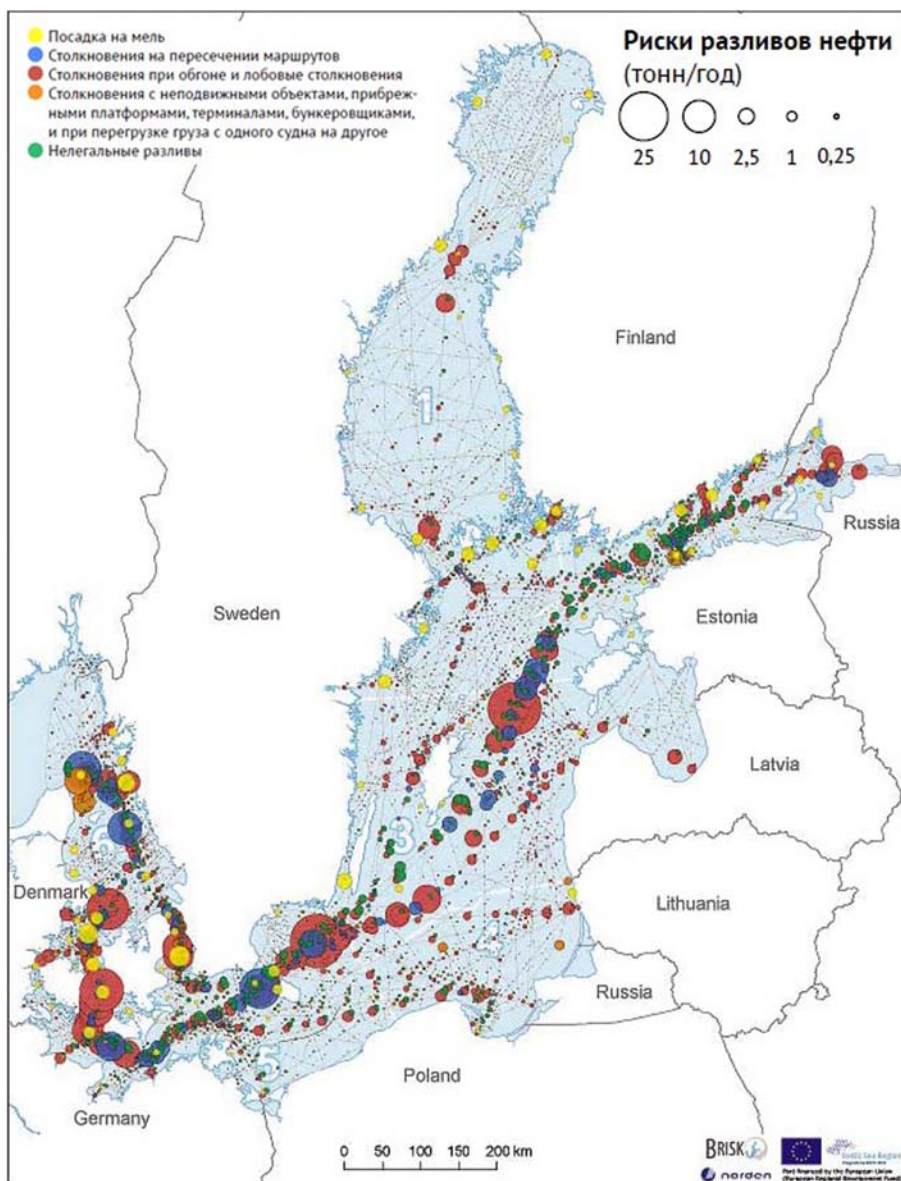


Рис. 4 Риски нефтяного и химического загрязнения Балтийского моря

Прогнозирование вероятности возникновения танкерных аварий с разливами нефти практически осуществляется лишь статистическими методами на основе ретроспективной информации. Оценка риска аварий, в целом, основывается на анализе причин (отказы технических устройств, ошибки персонала, внешние воздействия) возникновения и условий развития аварий. При этом показатели риска, в том числе количественные, выражаются в виде сочетания вероятности возникновения и тяжести последствий возможной аварии.

Крупные и особо крупные аварийные разливы нефти случаются не часто. Это ограничивает статистическую значимость исходной информации и повышает степень неопределенности результатов ее обработки.

Так, основными источниками разливов являются грузовые операции на терминалах, при которых происходит разрыв шлангов, поломки грузовых устройств, переливы танков и повреждение грузовых танков при швартовых операциях. Согласно

исследованиям TACIS, частота разливов нефти более 1 т при заходе судов на терминал может считаться равной  $5 \times 10^{-4}$ . При этом доля разливов в интервале 1 – 10 т составляет 0,79; в интервале 10 – 100 т – 0,17, в интервале 100 – 1000 т – 0,036, а более 1000 т – 0,008, то есть 96% всех разливов на терминалах не превышает 100 т.

Таким образом, согласно данной статистике, на 100 тыс. заходов танкеров на терминале может произойти два разлива нефти массой 100 т и более. Если исходить из этого, то, например, на терминале в Приморске при достижении им проектной мощности в 60 млн т/год при отгрузке нефти в танкеры дедейтом 120 тыс. т возможен один разлив в 400 лет объемом более 100 т.

В этой связи приведем еще один пример. При аварии танкера «Эксон Валдиз» на Аляске в 1989 г. было разлито более 70 тыс. т нефти, загрязнившей 1200 км побережья. Общие затраты на ликвидацию и компенсацию ущерба составили около 5 млрд долларов (а по некоторым оценкам – 9 млрд). Вероятность аварии этого танкера была рассчитана как одна за 241 год эксплуатации. Потребовалось же лишь 12 лет его работы.

Общая вероятность аварии равна 0,4 на 1000 рейсов; вероятность риска разлива нефти принимается равной 0,05 на 1000 рейсов в открытом море и 0,25 в опасных местах. Из расчетов следует, что средний наибольший вероятный объем разлива на Балтийском бассейне составляет 2500 т. Однако в этом бассейне возможны также разливы нефти не только регионального, но и федерального значения, например, из-за разрушения конструкций танкеров в результате столкновений, пожаров, взрывов и посадок на мель. Размеры разливов будут определяться конструкцией и дедейтом танкеров. На Балтике размеры вероятных разливов могут достигать 30 тыс. т.

По данным проектов готовности к реагированию на крупные разливы нефти и поступление опасных веществ BRISK и BRISK-RU, наиболее экономически эффективной мерой в инвестиционном отношении для снижения риска в районах с высокой интенсивностью судоходства является система осуществления контроля и наблюдения за движением судов и поддержания связи между ними, позволяющая избежать ошибок в судовождении.

В целом, наиболее экономически эффективным подходом является предотвращение техногенных катастроф. Однако если крупная авария все же происходит, необходимо принятие срочных мер, а следовательно необходима эффективная система реагирования и проведения аварийно-спасательных работ.

Еще в 2004 г. Европейский парламент провел анализ действенности проводимых мероприятий, при этом выяснилось, что в ряде регионов Европейского союза имеющиеся возможности ликвидации последствий катастрофических разливов нефти на море совершенно не адекватны серьезности сложившейся ситуации. В марте 2004 г. члены Европейского парламента, представители промышленности и морских служб обсудили меры по предотвращению разливов нефти и их ликвидации в Баренцевом и Балтийском морях. Было подчеркнуто, что возрастает риск, связанный с нефтяными танкерами в Баренцевом и Балтийском морях. Предполагается, что вероятность столкновения танкеров в этих морях увеличится до 20% к 2020 г. Согласно текущим тенденциям и статистике случаев, связанный с крупными разливами нефти, может происходить фактически каждые 5 – 10 лет, что будет приводить к тяжелым и даже необратимым последствиям для морской и прибрежной зоны.

Чтобы избежать этого, необходимы совместные усилия России и членов Европейского Союза.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воробьев Ю.Л. Предупреждение и ликвидация аварийных разливов нефти и нефтепродуктов / Ю.Л. Воробьев, В.А. Акимов, Ю.И. Соколов. – М.: Инюктаво, 2005. – 368 с.
2. Маценко С.В. Ликвидация разливов нефти и нефтепродуктов на море и внутренних акваториях. Расчет достаточности сил и средств / С.В. Маценко, Г.Г. Волков, Т.А. Волкова. – Новороссийск: МГА им. адм. Ф.Ф. Ушакова, 2009. – 92 с.
3. Риски нефтяного и химического загрязнения Балтийского моря / Результаты и рекомендации проектов ХЕЛКОМ BRISK и BRISK-RU. – Информационное бюро Совета Министров Северных стран в Калининграде [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www.norden39.ru](http://www.norden39.ru)
4. Семанов Г.Н. Разливы нефти в море и обеспечение готовности к реагированию на них. – М.: Журнал-каталог «Транспортная безопасность и технологии». – 2005. – № 2.
5. Латухов С.В. Экологическая безопасность судоходства: учебник / С.В. Латухов, О.В. Соляков, П.Г. Химич. – СПб.: ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова, 2013. – 153 с.





## ПРОЧНОСТЬ СУДОВ И ПЛАВУЧИХ СООРУЖЕНИЙ

**О.Е. Литонов**

д-р техн. наук, проф.,  
ФГУП «Крыловский  
государственный  
научный центр»



### ВЕТРОВЫЕ НАГРУЗКИ НА СРЕДСТВА ОКЕАНОТЕХНИКИ

#### ВВЕДЕНИЕ

**В**етровые нагрузки, действующие на морские сооружения, сегодня можно определять с достаточно высокой точностью. Тем не менее, вопросы сочетаемости ветровых нагрузок с другими нагрузками, действующими на те же сооружения, на фоне их нерегулярности не могут считаться до конца решенными. Ситуацию облегчает заметная соподчиненность ветровых нагрузок по отношению к другим более значимым нагрузкам, например, волновым и ледовым.

Дискуссионным моментом также является оценка вклада пульсационной составляющей ветровых нагрузок в усталостную повреждаемость конструкций. Активное внедрение программных комплексов при расчете напряженно-деформированного состояния конструкций полностью не решает проблемы. Намечившаяся тенденция к возвращению использования детерминистических методов расчета только усложняет возможность получения адекватной картины. Существующая практика расчетных оценок лишь удаляет итоговый результат от реальности. Для подтверждения этого рассмотрим сложившуюся ситуацию.

Для конкретизации сузим ее до одновременно действующих двух нагрузок: ветровой и волновой. Если начать с вероятностного описания этих нагрузок, то особых проблем для волновых реакций на них не наблюдается. Абсолютное большинство исследователей сходится на том, что они не противоречат в долговременном плане практически для всех морских сооружений распределению Вейбулла с параметрами масштаба " $a$ " и формы " $k$ ". Другое дело, оценка распределения композиции волновых реакций и пульсационной составляющей ветровых реакций, распределение ординат которой можно считать не противоречащим нормальному закону.

Особенно актуально с аналитических позиций совместное действие волновых и ветровых нагрузок для самоподъемных плавучих буровых установок (СПБУ). Применительно к ним важными обстоятельствами служат соизмеримость этих нагрузок и разные по величине коэффициенты динамичности.

Рекомендации, существующие на этот счет в смежных отраслях, например, в гидротехническом строительстве, основываются на признании факта малой вероятности арифметического сложения максимальных нагрузок от волнения и ветра.

Поэтому при проектировании сквозных сооружений морских нефтяных промыслов в случае одновременного действия волновой, ветровой и вертикальной нагрузок менее опасную горизонтальную силу предлагается учитывать с коэффициентом 0,8.

Понятно, что в принципе значение этого коэффициента должно зависеть от закона распределения не только отдельных составляющих нагрузок, но и их композиции, а также от уровня выбранной обеспеченности. Установление правильного коэффициента сочетания ветро-волновых нагрузок должно способствовать уточнению экстремальных усилий, что, в свою очередь, непосредственно работает на решение проблемы надежности и тесным образом связанной с ней проблемы металлоемкости конструкций.

### 1. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Прежде чем рассмотреть композицию амплитуд волновых ( $x_v$ ) и ветровых ( $x_w$ ) реакций, определим распределения ветровых нагрузок, являющихся, как известно, квадратичной функцией скорости ветра. Определяя скорость ветра как сумму

$$w_\Sigma = \bar{w} + w, \tag{1}$$

где  $\bar{w}$  – средняя скорость ветра,  
 $w$  – скорость ветровых пульсаций,

получим итоговую ветровую нагрузку в виде

$$Q_{w\Sigma} = \bar{Q}_w + Q_w(2w/\bar{w} + w^2/\bar{w}^2), \tag{2}$$

где  $Q_w$  – статический напор ветра.

Форма закона распределения  $Q_w$  определяется случайным множителем

$$u = 2w/\bar{w} + w^2/\bar{w}^2.$$

Используя известное соотношение из теории вероятностей  $p(u)du = p(w)dw$  и имея в виду, что амплитуды следуют закону Рэлея

$$p(w) = \frac{w}{\sigma_w^2} e^{-\frac{w^2}{2\sigma_w^2}},$$

где  $\sigma_w$  – стандарт ординат скорости пульсации ветра, получим

$$p(u) = \frac{\sqrt{u+1}-1}{2\vartheta_w\sqrt{u+1}} \cdot e^{-\frac{(\sqrt{u+1}-1)_2}{2\vartheta_w^2}}, \tag{3}$$

где  $\vartheta_w$  – коэффициент изменчивости пульсаций ветра.

Интегральное распределение ветровых реакций, соответствующее плотности распределения (3), имеет вид

$$P(u) = e^{-\frac{(\sqrt{u+1}-1)_2}{2\vartheta_w^2}}. \tag{4}$$

Можно показать, что в области малых обеспеченностей распределение (4) приемлемо аппроксимируется экспоненциальным распределением

$$P(u) = e^{-u/a_u} \tag{5}$$

с параметром распределения  $a_u \cong 1,79\vartheta_w$ .

На рис. 1 показано сопоставление интегральных распределений (4) и (5) для характерного значения  $\vartheta_w = 0,15$  в осях  $u - \ln P$ . Сопоставление произведено при 95%-ном доверительном уровне границ, подсчитанных для условного объема выборки, отвечающего стационарному режиму продолжительностью около 6 ч. Как можно видеть, за исключением начального диапазона, сходимость рассматриваемых законов вполне удовлетворительная, причем в экстремальной области наблюдаемое отклонение гипотетического закона направлено в безопасную сторону.

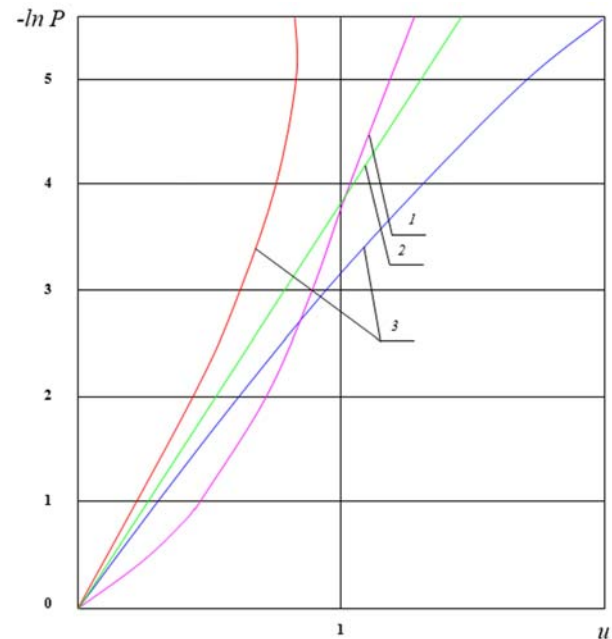


Рис. 1

Интегральное распределение амплитуд ветровых реакций:  
 1 – истинное распределение (4); 2 – гипотетическое распределение (5); 3 – 95%-ные доверительные границы

Композицию амплитуд волновых ( $x_v$ ) и ветровых ( $x_w$ ) нагрузок найдем в предположении независимости их распределений и при рассмотрении только той ветви их суммарного распределения, которая отсчитывается от уровня, отвечающего статическому напору ветра. Это приводит к выражению для дифференциальной плотности распределения

$$p(x_{\Sigma}) = \frac{\kappa}{a_v} \left( \frac{x_{\Sigma} - x_w}{a_v} \right) \frac{1}{a_w} e^{-\left(\frac{x_{\Sigma} - x_w}{a_v}\right)^{\kappa}} e^{-x_w/a_w} dx_w,$$

где  $a_v$  и  $a_w$  – параметры распределения амплитуд волновых и ветровых нагрузок (или напряжений).

Рассматриваемый интеграл не берется в квадратурах. Поэтому используем следующий прием: разложим выражение  $\exp\left(-\frac{x_{\Sigma} - x_w}{a_v}\right)^{\kappa}$  в ряд по степеням аргумента  $\left(\frac{x_{\Sigma} - x_w}{a_v}\right)^{\kappa}$ :

$$\exp\left(-\frac{x_{\Sigma} - x_w}{a_v}\right)^{\kappa} = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{(-1)^m}{m!} \left(-\frac{x_{\Sigma} - x_w}{a_v}\right)^{\kappa m}.$$

Тогда приходим к необходимости вычисления следующего интеграла:

$$p(x_{\Sigma}) = \frac{\kappa}{a_v} \sum_{m=0}^{\infty} \int_0^{x_{\Sigma}} \left\{ \frac{x_{\Sigma}}{a_v} \left(1 - \frac{x_w}{x_{\Sigma}}\right) \right\}^{\kappa m + \kappa - 1} \times \frac{(-1)^m}{m!} \frac{1}{a_w} e^{x_w/a_w} dx_w. \quad (6)$$

Для вычисления (6) используем относительную малость величин  $x_w$  по сравнению с  $x_{\Sigma}$ . После преобразований получим

$$p(x_{\Sigma}) = \frac{\kappa}{a_v} \left(\frac{x_{\Sigma}}{a_v}\right)^{\kappa-1} e^{-(x_{\Sigma}/a_v)^{\kappa}} \cdot (1 + \beta), \quad (7)$$

где  $\beta = a_w/a_v$ .

Интегральное распределение, соответствующее плотности распределения (7), имеет вид

$$p(x_{\Sigma}) = (1 + \beta) \cdot e^{-(x_{\Sigma}/a_v)^{\kappa}} \quad (8)$$

и справедливо только для «хвостовой» ветви  $x_{\Sigma} > a_v [\ln(1 + \beta)]^{1/\kappa}$ .

Наибольшее характеристическое значение, являющееся расчетным, в соответствии с (8) равно

$$x_{\Sigma}^{\max} = a_v \cdot \{\ln(1 + \beta)\}^{1/\kappa}. \quad (9)$$

## 2. ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Знание композиции распределения реакций, вызванных ветро-волновыми нагрузками, позволяет со статистических позиций рассмотреть предложение о представлении экстремальной величины суммарных реакций в виде

$$x_{\Sigma}^{\max} = x_v^{\max} + \eta_w \cdot x_v^{\max}, \quad (10)$$

где  $x_{\Sigma}^{\max}$ ,  $x_v^{\max}$ ,  $x_w^{\max}$  – квантили одной и той же обеспеченности;  $\eta_w$  – редуцированный коэффициент составляющей реакции от меньшей нагрузки (в данном случае ветровой).

Само по себе знание величины  $\eta_w$  не требуется в предлагаемой схеме расчета, однако для ориентировки в

отношении применяемых на практике коэффициентов сочетания получим его значение для частного случая  $\kappa=1$ . После подстановки в (10) соответствующих выражений получим выражение для редуцированного коэффициента  $\eta_w$ , графическое изображение которого в зависимости от уровня обеспеченности  $p$  представлено на рис. 2. На коэффициент  $\eta_w$  практически не влияет соотношение параметров  $a_w/a_v$  на всем реальном диапазоне его изменения. Можно отметить, что с увеличением обеспеченности меньшую горизонтальную нагрузку (в данном случае ветровую) следует вводить с большим редуцированием. Показательно, что в пределах изменения уровня обеспеченности, обычно принимаемого в расчетах при рассмотрении стационарного режима ( $p = 10^{-2} - 10^{-3}$ ), значение  $\eta_w$  не превосходит рекомендуемой строительными нормами и правилами величины  $\eta_w = 0,8$ .

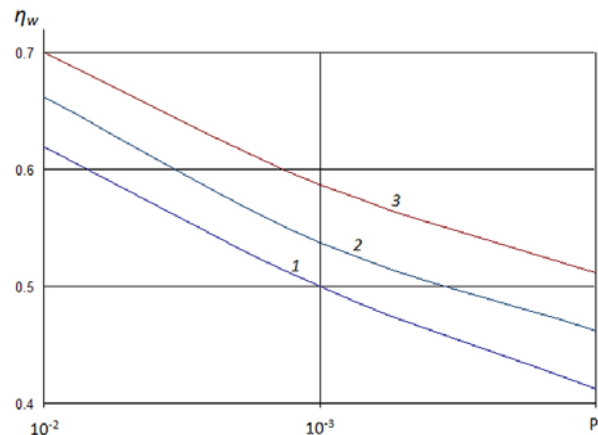


Рис. 2

Зависимость редуцированного коэффициента от расчетной обеспеченности и коэффициента изменчивости  $\vartheta_w$ :  
1 –  $W_w = 0,08$ ; 2 –  $W_w = 0,10$ ; 3 –  $W_w = 0,12$

Выше упоминалось, что возврат к детерминистическим методам расчета (на чем стоят целые школы) заставляет искать, хотя бы для ориентировки, связующие переходы для возможности сопоставлений.

Показательны метаморфозы, происходящие на пути получения расчетных оценок. Остановимся на интерпретации ветровых нагрузок, точнее, исходной информации по скоростным пульсациям, лежащей в основе их получения, продемонстрированной Det Norske Veritas (DNV) [2].

Этот вопрос подробно рассмотрен в статье [3]. Прежде всего в ней сообщается, что и в правилах Регистра [1], и в Классификационной заметке DNV [2] для описания ветровых пульсаций в частотной области рекомендуется спектр, только в [1] – это спектр Давенпорта, а в [2] – спектр Гарриса. В статье [3] показано, что эти спектры, несмотря на аналитические расхождения, дают практически тот же самый результат. Казалось бы, проблема ветровых нагрузок в этих документах решается идентичным образом.

Однако в [3] помещена рекомендация определять ветровую нагрузку на СПБУ на основе скорости ветра со столетней повторяемостью с осреднением  $\tau = 1$  мин. Возникает вопрос, как коррелируется эта рекомендация с требованиями [1].

В [3] показано, что связь между  $\omega_{\max}$  и  $\bar{w}$  можно записать в виде

$$\omega_{\max} = G \cdot \bar{w}, \quad (11)$$

где  $G$  – коэффициент порывистости.

Его значение при принятых параметрах достигает величины 1,38, что можно считать ориентировочной рекомендацией при переходе от вероятностной к детерминистической модели (или наоборот).

Известно, что сравнение результатов расчетов с использованием вероятностных методов и на детерминистической основе является неблагоприятной задачей, поскольку не существует однозначных критериев. Тем не менее, сделаем еще одну попытку увязать рассматриваемые альтернативные подходы.

Поскольку итоговую ветровую нагрузку можно записать с помощью суммы статического напора и «хвостовой» части полученного распределения для пульсационной составляющей (см. (5)) в виде

$$Q_{w\Sigma} = \bar{Q}_w + 1,7\bar{Q}_w \vartheta_w \ln n_w,$$

где  $n_w$  – объем выборки, отвечающий заданной продолжительности стационарного режима,  
 $\vartheta_w$  – коэффициент изменчивости ветровых пульсаций,

то можно выйти на соотношение

$$\frac{w}{\bar{w}} = \sqrt{1 + 1,7\vartheta_w \ln n_w}. \quad (12)$$

Соотношение  $w/\bar{w}$ , равное 1,38 – 1,40, реализуется при коэффициенте изменчивости  $\vartheta_w \cong 0,12$  и объеме выборки  $n_w$ , соответствующем стационарному режиму продолжительностью 1 ч.

По-видимому, величину  $G = 1,4$  можно считать рекомендацией при переходе от вероятностной к детерминистической модели. Если, конечно, не внесут свою лепту динамические реакции сооружений с конечной жесткостью, что приведет к необходимости введения коэффициента динамичности.

## ВЫВОДЫ

1. Адекватность оценок ветровых нагрузок может обеспечить только использование статистических методов анализа, особенно это касается динамически активных сооружений.

2. Для «хвостовой» части распределения описания ветровых нагрузок может быть использовано экспоненциальное распределение.

3. Для описания композиции волновых и ветровых реакций может быть использовано распределение Вейбулла с введением множителя, зависящего от соотношения параметров масштаба для ветровых и волновых реакций.

4. Для оценки связи между расчетной «максимальной» и расчетной средней скоростями, отвечающими альтернативным оценкам ветровых нагрузок (соответственно на детерминистической и вероятностной основах), можно рекомендовать в первом приближении

$$w_{\max} = 1,4\bar{w},$$

где  $\bar{w}$  – средняя скорость за 100-летний период;

$w_{\max}$  – максимальная скорость за 100-летний период при 10-минутном осреднении.

5. При проектировании морских сооружений допустимо ветровую нагрузку вводить с редуцированным коэффициентом 0,70.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила классификации, постройки и оборудования плавучих буровых установок и морских стационарных платформ. – СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2012.

2. Classification Notes No. 30.5. Environmental Conditions and Environmental Loads. Det Norske Veritas. – March, 2000.

3. Берхин И.М., Литонов О.Е. Усовершенствованная методика расчетов прочности конструкций самоподъемных плавучих буровых установок при ветро-волновых воздействиях // Научн.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. 2013. – Вып. 36. – С. 141 – 150.



**М.Д. Емельянов**

канд. техн. наук,  
ЗАО «ЦНИИМФ»



## УПРУГИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОМПОЗИТОВ СУДОВЫХ КОРПУСНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

**В** разрабатываемых «Совместных Правилах РРР и РС по классификации и постройке судов малых размерений», а также в «Правилах классификации и постройки малых судов ОТНК» (Международная ассоциация органов технического надзора и классификации) большое внимание уделено корпусам судов из армированных пластиков. Поскольку эти материалы создаются в процессе строительства судна, то необходимо до изготовления конструкции располагать их предполагаемыми характеристиками.

Аппроксимирующие зависимости упругих характеристик армированных пластиков, рассматриваемые в правилах, имеют ограниченное применение, поскольку они справедливы только для тех марок армирующих материалов и связующих, на основе которых они получены. Определение упругих свойств композита экспериментальными методами является трудоемкой задачей, которая может решаться, как правило, научными организациями с использованием тензометрирования (в отличие от испытаний образцов на прочность, которые могут выполняться силами лаборатории предприятия-изготовителя).

Оптимальным выходом из создавшейся ситуации является использование зависимостей, полученных на основе теории упругости и механики композиционных материалов, которые позволили бы определять упругие характеристики композита по известным упругим свойствам его компонентов (модулям нормальной упругости и коэффициентам Пуассона связующего и волокон).

В этом случае для любых комбинаций связующих и армирующих волокон, при известной объемной доле и схеме укладки волокон, можно определять упругие характеристики армированного пластика.

В настоящей статье предлагаются приближенные формулы для определения упругих свойств волокнистых композитов, предназначенные для использования в расчетах по проверке прочности конструкций из армированных пластиков.

Композиты рассматриваются как материал, состоящий из двух или нескольких компонентов (фаз). Одну из фаз называют матрицей, которая охватывает другую фазу, называемую включением. К включениям относятся отдельные макрочастицы (гранулы), короткие волокна (рубленный ровинг), длинные волокна (непрерывные нити), слои, а также пустоты (включения, у которых модуль упругости равен нулю). В армированных пластиках полимерное связующее служит матрицей.

Исходными параметрами для расчета упругих свойств композита являются следующие независимые характеристики компонентов: модули нормальной упругости волокон  $E_B$  и связующего  $E_C$ , коэффициенты Пуассона волокон  $\nu_B$  и связующего  $\nu_C$ . Модули сдвига  $G_B$  и  $G_C$  находятся по известному соотношению теории упругости

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$$

Упругие свойства композита также зависят от объемной доли волокон в композите, их длины, коэффициента укладки волокон  $\beta$  (отношение расстояний между волокнами в поперечных направлениях) и угла между направлениями волокон и приложением нагрузки. Влияние этих факторов представлено ниже.

### 1. ОДНОНАПРАВЛЕННОЕ АРМИРОВАНИЕ ПРЯМЫМИ ВОЛОКНАМИ

Упругие характеристики композита в направлении волокон большинство исследователей оценивают по правилу смесей, согласно которому модули нормальной упругости  $E_1$  и коэффициенты Пуассона  $\nu_{21}$ ,  $\nu_{31}$  равны:

$$E_1 = cE_B + (1 - c)E_C; \quad (1)$$

$$\nu_{21} = \nu_{31} = c\nu_B + (1 - c)\nu_C, \quad (2)$$

где индекс 1 относится к направлению основного армирования, 2 и 3 – к поперечному направлению.



В поперечном направлении к волокнам приближенные формулы для расчета упругих характеристик, приводимые в [1, 2, 3, 4], как правило, дают заниженный результат, поскольку они основаны на модели, в которой волокно в поперечном сечении заменяют армирующим слоем эквивалентной площади.

Более точные решения можно получить, если элементарный объем композита представить стержневой или слоистой моделями (рис. 1), совместное использование которых было предложено автором в [5]. В этих моделях, учитывая, что упругие характеристики носят интегральный характер, круглое поперечное сечение волокна заменено на квадратное, что не приводит к заметной потере точности вычислений.

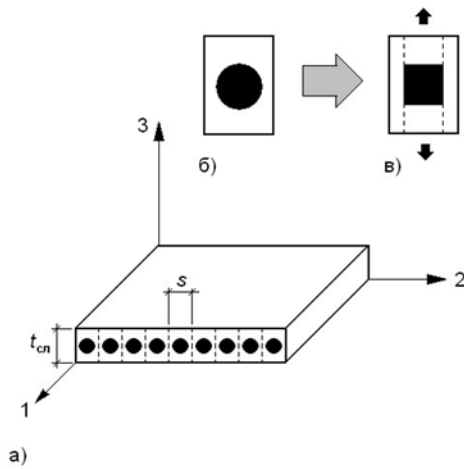


Рис. 1 Однонаправленный армированный пластик (а), элементарный объем (б) и стержневая (в) и слоистая (г) модели

### Стержневая модель

Основные приближенные решения для определения упругих характеристик по стержневой модели следующие:

$$E_2 = \sqrt{c/\beta} \left( \frac{\sqrt{\beta c}}{E_B} + \frac{1 - \sqrt{\beta c}}{E_c} \right)^{-1} + (1 - \sqrt{c/\beta}) E_c; \quad (3)$$

$$E_3 = \sqrt{\beta c} \left( \frac{\sqrt{c/\beta}}{E_B} + \frac{1 - \sqrt{c/\beta}}{E_c} \right)^{-1} + (1 - \sqrt{\beta/c}) E_c; \quad (4)$$

$$G_{12} = \sqrt{c/\beta} \left( \frac{\sqrt{\beta c}}{G_B} + \frac{1 - \sqrt{\beta c}}{G_c} \right)^{-1} + (1 - \sqrt{c/\beta}) G_c; \quad (5)$$

$$G_{31} = \sqrt{\beta c} \left( \frac{\sqrt{c/\beta}}{G_B} + \frac{1 - \sqrt{c/\beta}}{G_c} \right)^{-1} + (1 - \sqrt{\beta/c}) G_c; \quad (6)$$

$$\nu_{32}' = \sqrt{c/\beta} \frac{\sqrt{\beta c} \nu_B / E_B + (1 - \sqrt{\beta c}) \nu_c / E_c}{\sqrt{\beta c} / E_B + (1 - \sqrt{\beta c}) / E_c} + (1 - \sqrt{\beta/\gamma}) \nu_c; \quad (7)$$

$$\nu_{23}' = \sqrt{\beta c} \frac{\sqrt{c/\beta} \nu_B / E_B + (1 - \sqrt{c/\beta}) \nu_c / E_c}{\sqrt{c/\beta} / E_B + (1 - \sqrt{c/\beta}) / E_c} + (1 - \sqrt{\beta c}) \nu_c. \quad (8)$$

где  $c$  – объемная доля волокон;  
 $b = t_{cn}/s$  – коэффициент укладки волокон;  
 $t_{cn}$  – толщина монослоя;  
 $s$  – шаг нитей в ткани.

Примечание. Для прессованных материалов, как правило,  $\beta < 1$ ; при ручном способе наформовки слоев  $\beta$  может быть больше единицы.

### Слоистая модель

Основные приближенные решения для определения упругих характеристик по слоистой модели следующие:

$$E_2'' = \left[ \frac{\sqrt{\beta c}}{\sqrt{c/\beta}/E_B + (1 - \sqrt{c/\beta})/E_c} + \frac{1 - \sqrt{\beta c}}{E_c} \right]^{-1}; \quad (9)$$

$$E_3'' = \left[ \frac{\sqrt{c/\beta}}{\sqrt{\beta c}/E_B + (1 - \sqrt{\beta c})/E_c} + \frac{1 - \sqrt{c/\beta}}{E_c} \right]^{-1}; \quad (10)$$

$$G_2'' = \left[ \frac{\sqrt{\beta c}}{\sqrt{c/\beta}/G_B + (1 - \sqrt{c/\beta})/G_c} + \frac{1 - \sqrt{\beta c}}{G_c} \right]^{-1}; \quad (11)$$

$$G_{31}'' = G_{23}'' = \left[ \frac{\sqrt{c/\beta}}{\sqrt{\beta c}/G_B + (1 - \sqrt{\beta c})/G_c} + \frac{1 - \sqrt{c/\beta}}{G_c} \right]^{-1}; \quad (12)$$

$$\nu_{23}'' = E_3'' \left[ \sqrt{c/\beta} \frac{\sqrt{\beta c} \nu_B + (1 - \sqrt{\beta c}) \nu_c}{\sqrt{\beta c} E_B + (1 - \sqrt{\beta c}) E_c} + (1 - \sqrt{c/\beta}) \frac{\nu_c}{E_c} \right]; \quad (13)$$

$$\nu_{32}'' = E_2'' \left[ \sqrt{\gamma/\beta} \frac{\sqrt{c/\gamma} \nu_B + (1 - \sqrt{c/\gamma}) \nu_c}{\sqrt{c/\gamma} E_B + (1 - \sqrt{c/\gamma}) E_c} + (1 - \sqrt{\gamma c}) \frac{\nu_c}{E_c} \right]. \quad (14)$$

### Итоговые соотношения

Анализ различий между стержневой и слоистой моделями показывает, что стержневая модель не учитывает наличие касательных напряжений между стержнями, что приводит к заниженным результатам расчета. Поэтому ее можно использовать для определения нижней оценки упругих свойств. Слоистая модель, наоборот, предполагает отсутствие сдвига внутри слоя, что дает верхнюю оценку. Окончательно приближенные значения упругих характеристик можно получить как среднее геометрическое из верхней и нижней оценок по следующим формулам:

$$E = \sqrt{E'E''}; \quad G = \sqrt{G'G''}; \quad n = \sqrt{\nu'\nu''}. \quad (15)$$

Остальные упругие характеристики определяются по формулам:

$$\nu_{12} = \frac{E_2}{E_1} \nu_{21}; \quad \nu_{13} = \frac{E_3}{E_1} \nu_{31}; \quad (16)$$

$$G_{21} = G_{12}; \quad G_{31} = G_{13}; \quad G_{23} = G_{32}. \quad (17)$$

Сравнение экспериментальных [6] и теоретических значений упругих свойств однонаправленного стеклопластика СВМ на основе фенолополивинилацетально-формальдегидного связующего, полученного путем горячего прессования, приведены в табл. 1, исходные свойства компонентов СВМ – в табл. 2.

Таблица 1

| Характеристики композита                              | Значение          |               |                |
|---|-------------------|---------------|----------------|
|   | экспериментальное | теоретическое | Расхождение, % |
| Модуль упругости вдоль волокон $E_1 10^{-4}$ , МПа    | 4,66              | 4,44          | - 4,5          |
| Модуль упругости поперек волокон $E_2 10^{-4}$ , МПа  | 0,88              | 0,89          | + 1,1          |
| Модуль сдвига в плоскости слоя $G_{12} 10^{-4}$ , МПа | 0,312             | 0,356         | + 14,1         |

Примечание. В расчете принята объемная доля волокон  $c = 0,575$  и коэффициент упаковки волокон  $\beta = 0,9$ .

Таблица 2

| Свойства компонентов                            | Значение |
|---|----------|
| Модуль упругости волокон $E_b 10^{-4}$ , МПа    | 7,5      |
| Модуль упругости связующего $E_c 10^{-4}$ , МПа | 0,3      |
| Модуль сдвига волокон $G_b 10^{-4}$ , МПа       | 3,0      |
| Модуль сдвига связующего $G_c 10^{-4}$ , МПа    | 0,12     |
| Коэффициент Пуассона волокон $\nu_b$            | 0,25     |
| Коэффициент Пуассона связующего $\nu_c$         | 0,25     |

## 2. АРМИРОВАНИЕ ОРТОГОНАЛЬНЫМИ ТКАНЯМИ

При армировании пластика тканью, состоящей из двух слоев волокон (рис. 2), расположенных перпендикулярно друг к другу, упругие характеристики определяются как среднее арифметическое из значений характеристик вдоль основы и утка, т.е.:

$$E_1 = 0,5(E_{1o} + E_{2y}); E_2 = 0,5(E_{2o} + E_{1y}); E_3 = 0,5(E_{3o} + E_{3y});$$

$$G_{12} = 0,5(G_{12o} + G_{12y}); G_{13} = 0,5(G_{13o} + G_{12y}); G_{23} = 0,5(G_{23o} + G_{13y}); \quad (18)$$

$$\nu_{12} = 0,5(\nu_{12o} + \nu_{21y}); \nu_{13} = 0,5(\nu_{13o} + \nu_{23y}); \nu_{23} = 0,5(\nu_{23o} + \nu_{13y}),$$

где индексы «о» и «у» относятся к направлению основы и утка соответственно.

Объемная доля волокон  $c$  может быть найдена из соотношения

$$c = \frac{m_{\text{тк}}}{t_{\text{сл}} \rho_{\text{в}}} 10^{-3}, \quad (19)$$

где  $m_{\text{тк}}$  – поверхностная плотность ткани, г/м<sup>2</sup>;  
 $t_{\text{сл}}$  – толщина слоя пластика, армированного тканью, мм, (см. рис. 2);  
 $\rho_{\text{в}}$  – плотность волокон, г/см<sup>3</sup>.

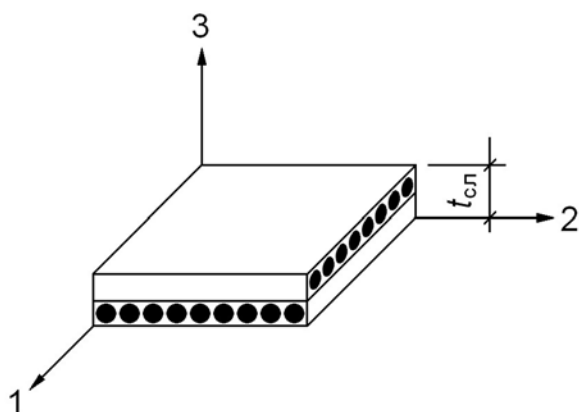


Рис. 2 Слой пластика, армированного прямыми волокнами в двух перпендикулярных направлениях

При этом объемные доли в направлении основы  $c_o$  и утка  $c_y$  распределяются следующим образом:

$$c_o = \frac{n_o}{n_y} c; \quad c_y = \frac{n_y}{n_o} c, \quad (20)$$

где  $n_o, n_y$  – количество нитей основы и утка, соответственно, на 1 см ширины.

Коэффициенты укладки волокон в направлении основы  $\beta_o$  и утка  $\beta_y$  определяются по формулам:

$$\beta_o = \frac{5t_{\text{сл}}}{n_o}; \quad \beta_y = \frac{5t_{\text{сл}}}{n_y}. \quad (21)$$

## 3. ПОВОРОТ ОСЕЙ В ПЛОСКОСТИ СЛОЯ

Случай, когда оси координат повернуты на угол  $\varphi$  к главным осям симметрии композита, показан на рис. 3.

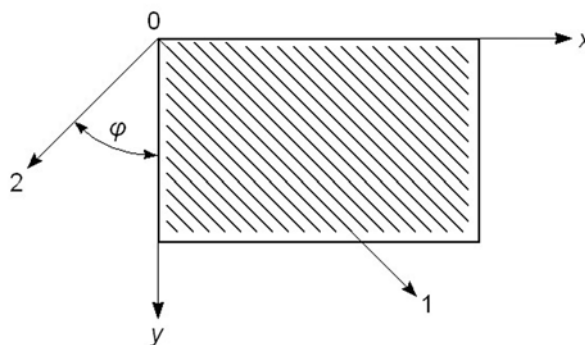


Рис. 3 Поворот системы координат на угол  $\varphi$

Упругие характеристики при повороте осей в плоскости слоя находятся по следующим формулам [4]:

$$E_x = \left[ \frac{\cos^4 \varphi}{E_1} + \left( \frac{1}{G_{12}} - \frac{2\nu_{21}}{E_1} \right) \sin^2 \varphi \cos^2 \varphi + \frac{\sin^4 \varphi}{E_2} \right]^{-1}; \quad (22)$$

$$E_y = \left[ \frac{\cos^4 \varphi}{E_2} + \left( \frac{1}{G_{12}} - \frac{2\nu_{21}}{E_1} \right) \sin^2 \varphi \cos^2 \varphi + \frac{\sin^4 \varphi}{E_1} \right]^{-1}; \quad (23)$$

$$G_{xy} = \frac{G_{12}}{1 - \left[ 1 - G_{12} \left( \frac{1 + 2\nu_{21}}{E_1} + \frac{1}{E_2} \right) \right] \sin^2 2\varphi}; \quad (24)$$

$$\nu_{yx} = \frac{\nu_{21} - \left[ 1 + \frac{E_1}{E_2} - E_1 \left( \frac{1}{G_{12}} - \frac{2\nu_{21}}{E_1} \right) \right] \cos^2 \varphi \sin^2 \varphi}{\cos^4 \varphi + E_1 \left( \frac{1}{G_{12}} - \frac{2\nu_{21}}{E_1} \right) \cos^2 \varphi \sin^2 \varphi + \frac{E_1}{E_2} \sin^4 \varphi}; \quad (25)$$

$$n_{xy} = n_{yx} \frac{E_y}{E_x}, \quad (26)$$

где  $\varphi$  – угол поворота главных осей симметрии относительно направления действия нагрузки.

Как следует из рис. 4, расчет по приведенным выше формулам хорошо согласуется с опытными данными.

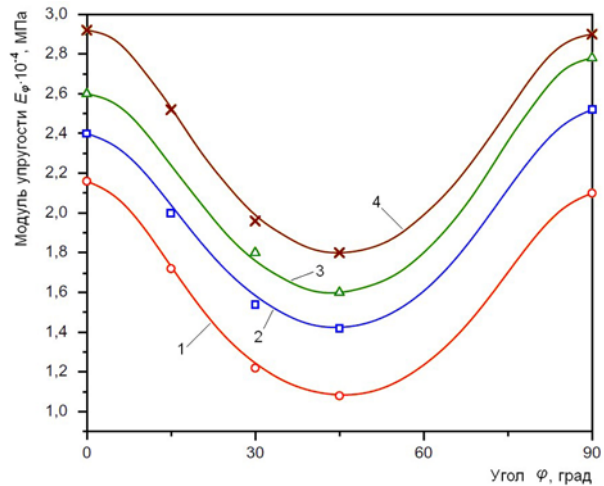


Рис. 4 Теоретические и экспериментальные [6] зависимости модуля упругости стеклопластика СВАН с разным содержанием волокон по массе от угла  $\varphi$ :  
1 – 61%, 2 – 69,6%, 3 – 72,5%, 4 – 75,6%

#### 4. ПОПРАВКА НА ИЗОГНУТОСТЬ ВОЛОКОН

Тканые армирующие материалы имеют пространственную изогнутость волокон, зависящую от типа переплетения нитей (рис. 5).

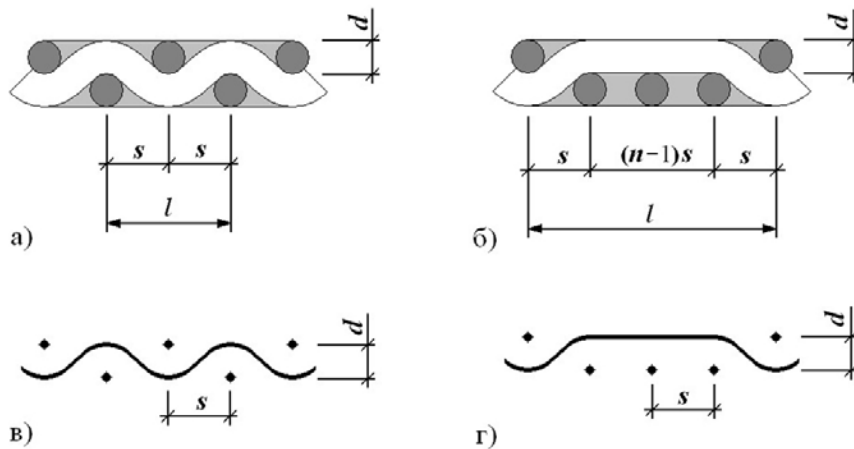


Рис. 5 Искривленность нитей в тканях:  
а – полотняное; б – сатиновое; в – идеализация нитей полотняного плетения синусоидой;  
г – идеализация нитей сатинового плетения кусочно-синусоидальной кривой

Для полотняного плетения модули упругости монослоев вдоль основы и вдоль утка с искривлением нитей по синусоиде находятся по формуле

$$\overline{E_{\alpha,y}^{(n)}} = \frac{2}{s} \int_0^{s/2} \left[ \frac{\cos^4 \theta}{E_1} + \left( \frac{1}{G_{13}} - \frac{2\nu_{31}}{E_1} \right) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + \frac{\sin^4 \theta}{E_3} \right]^{-1} dx, \quad (27)$$

где  $E_1, E_3$  – модули упругости вдоль волокон (индекс 1) и в вертикальном направлении (индекс 3);

$G_{13}$  – модуль сдвига в плоскости осей 1-3;

$\theta$  – угол наклона нити к горизонтали, равный

$$y = \frac{d}{s} \sin \frac{\pi x}{s},$$

где  $d, s$  – диаметр и шаг нитей.

Для сатинового и саржевого плетения модули упругости монослоев вдоль основы  $\bar{E}_0^{(c)}$  и вдоль утка  $\bar{E}_y^{(c)}$  с искривлением нитей по кусочно-синусоидальной кривой можно определить из выражения

$$\bar{E}_{0,y}^{(c)} = \frac{1}{n+1} [2\bar{E}_{0,y}^{(n)} + (n-1)E_1], \quad (28)$$

где  $n$  – количество нитей, над которыми проходят нити основы и утка (для саржи  $n = 2$ , для сатина  $n = 3, 5, 7$  и больше).

## 5. АРМИРОВАНИЕ МАТАМИ ИЗ НЕОРИЕНТИРОВАННЫХ ВОЛОКОН

Пластики, армированные хаотически ориентированными волокнами, обладают изотропией упругих свойств в плоскости слоя. Значения упругих характеристик можно получить путем интегрирования выражений (22), (24) и (25) по углу поворота осей  $\varphi$  с использованием зависимостей (15). В результате получим следующие расчетные формулы:

$$E = \frac{4}{3} \left[ \frac{1}{E_1} + \frac{1}{6} \left( \frac{1}{G_{12}} - \frac{2\nu_{21}}{E_1} \right) + \frac{1}{E_2} \right]^{-1}; \quad (29)$$

$$G = 2G_{12} \left[ 1 + G_{12} \left( \frac{1+2\nu_{21}}{E_1} + \frac{1}{E_2} \right) \right]^{-1}; \quad (30)$$

$$\nu = E/2G - 1. \quad (31)$$

## 6. АРМИРОВАНИЕ КОРОТКИМИ ВОЛОКНАМИ

В однонаправленном композите при наличии растягивающих напряжений, направленных вдоль волокон, у концов волокон возникает торцевая трещина, в результате чего на торцах отсутствуют нормальные напряжения. При этом передача нагрузки на волокно осуществляется касательными напряжениями через связующее (рис. 6).

Взаимодействие коротких волокон и матрицы (связующего) при одноосном растяжении изучалась многими исследователями (Аутвотер, Келли, Тайсон, Кокс, Розен и др.). Однако они пренебрегали участием матрицы в восприятии растягивающих нагрузок, что при малых объемных долях волокон занижает модуль упругости композита.

При упругом взаимодействии матрицы и волокна модуль упругости вдоль коротких волокон  $E_1^{(кв)}$  можно определить из выражения

$$E_1^{(кв)} = E_1(1 - d/\mu l), \quad (32)$$

где  $E_1$  – модуль нормальной упругости однонаправленного композита, армированного непрерывными волокнами по формуле (1);

$d, l$  – диаметр и длина волокна;

$\mu$  – коэффициент, учитывающий упругое взаимодействие между матрицей и волокном, равный

$$\mu = \sqrt{\frac{1}{2(1+\nu_c)} \cdot \frac{1+\sqrt{c}}{1-\sqrt{c}} \cdot \frac{c}{1+1(E_B/E_c-1)}}. \quad (33)$$

Остальные упругие характеристики вычисляются как для композита с непрерывными волокнами.

При хаотическом распределении волокон в плоскости слоя упругие свойства композита находятся по формулам (29) – (31).

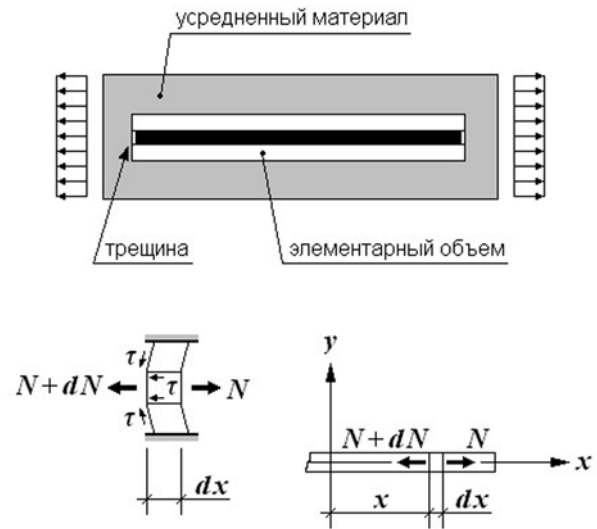


Рис. 6 Элементарный объем композита с короткими волокнами и расчетная схема

## 7. ВЛИЯНИЕ НАПОЛНИТЕЛЕЙ И ВОЗДУШНЫХ ПОР НА СВОЙСТВА КОМПОЗИТА

### Наполнители

Для получения паст и шпатлевок различного назначения в связующее вводят наполнитель. В качестве наполнителя могут применяться мелкий песок, молотый кварц, бентонит, каолин, тальк и др., а также полые микросферы, например, для изготовления слоя заполнителя трехслойных панелей или объемов плавучести.

Упругие свойства композитов, содержащих гранулированный или порошкообразный наполнитель, могут быть представлены стержневой и слоистой моделями. Согласно стержневой модели модуль нормальной упругости  $E'$  и коэффициент Пуассона  $\nu'$  равны:

$$E' = c^{2/3} \left( \frac{c^{1/3}}{E_B} + \frac{1 - c^{1/3}}{E_c} \right) + (1 - c^{2/3})E_c; \quad (34)$$

$$\nu' = \frac{c^{2/3} c_{1/3} \nu_B + (1 - c_{1/3}) \nu_c E_B / E_c}{c^{1/3} + (1 - c^{1/3}) E_B / E_c} + (1 - c^{2/3}) \nu_c. \quad (35)$$

Слоистая модель приводит к следующим зависимостям для модуля нормальной упругости  $E''$  и коэффициента Пуассона  $\nu''$ :

$$E'' = \left\{ c^{1/3} \left[ c^{2/3} E_B + (1 - c^{2/3}) E_c \right]^{-1} + \frac{1 - c^{1/3}}{E_c} \right\}^{-1}; \quad (36)$$

$$\nu'' = E'' \left[ c^{1/3} \frac{c_{2/3} \nu_B + (1 - c^{2/3}) \nu_c}{c^{2/3} E_B + (1 - c^{2/3}) E_c} + (1 - c^{1/3}) \frac{\nu_c}{E_c} \right]. \quad (37)$$

Окончательно эффективные модуль нормальной упругости  $E_3$ , коэффициент Пуассона  $\nu_3$  и модуль сдвига  $G_3$  могут быть определены по следующим формулам:

$$E_3 = \sqrt{E'E''}; \nu_3 = \sqrt{\nu'\nu''}; G_3 = \frac{E_3}{2(1+\nu_3)}. \quad (38)$$

Характер изменения эффективного модуля упругости в зависимости от объемной доли стеклянных сферических включений для композита на основе полиэфирного связующего при соотношении модулей упругости  $E_b/E_c = 40,8$  и коэффициентах Пуассона  $\nu_b = 0,21$  и  $\nu_c = 0,45$  представлен кривой 1 на рис. 7, а. Как следует из приведенного графика, расчет по формуле (38) хорошо согласуется с результатами эксперимента [7].

#### Агрегаты включений

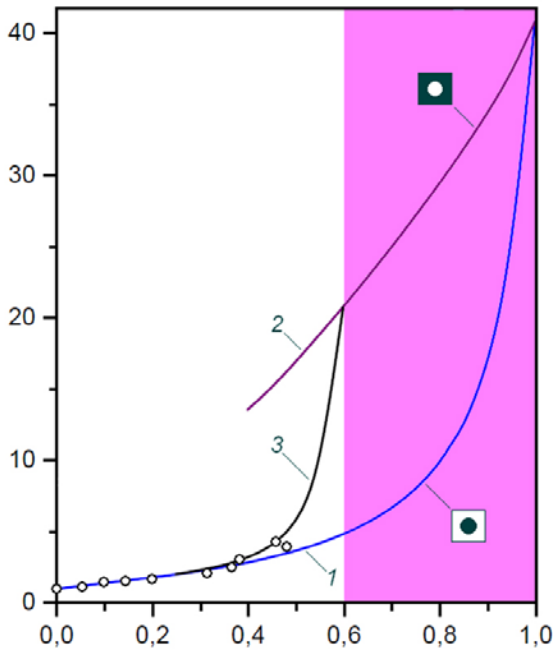
Как следует из экспериментальных данных, когда объемная доля включений приближается к предельному значению, модуль упругости возрастает больше,

чем следует из решений по формуле (34). Это является следствием образования агрегатов включений (см. рис. 7, б), когда включения соприкасаются друг с другом, образуя замкнутый скелет. То есть происходит инверсия, в результате которой матрица и включение меняются ролями. Вероятность возникновения агрегатов зависит от вида упаковки включений и равна

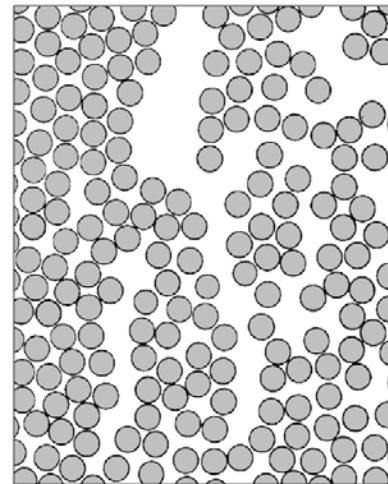
$$p = (c/c_{пр})^n \text{ при } c \leq c_{пр}, \quad (39)$$

где  $c_{пр}$  – предельное значение объемной доли включений, зависящее от вида упаковки;  
 $n$  – количество включений, необходимое для образования упаковки данного вида.

Если размеры включений одинаковы, то образуется октаэдрическая упаковка с предельным значением объемной доли  $c_{пр} = 0,6$  и количеством включений  $n = 6$ . При полидисперсных фракциях включений наиболее плотной упаковкой является, например, икосаэдрическая или, когда частицы мелкой фракции заполняют пространство между частицами крупной фракции.



а) модуль упругости композита



б) характер распределения включений в композите [2]

Рис. 7 Зависимость модуля упругости композита от объемной доли сферических включений:  
1 – по формулам (34), (32) и (38); 2 – расчет при инверсии фаз матрица-включение; 3 – с учетом агрегатов включений с октаэдрической упаковкой;  $\circ$  – опытные данные [7]

Размеры и упругие характеристики агрегатов существенно отличаются от включений, их образующих. Поэтому систему из агрегатов, одиночных включений и связующего можно рассматривать как композит, состоящий из агрегатов и матрицы, которая в свою очередь представляет собой связующее с одиночными включениями.

Модуль упругости матрицы  $E_m$ , содержащей связующее и одиночные включения, определяется по формулам (34), (36) при объемной доле одиночных включений  $c_o$ , равной

$$c_o = \begin{cases} \frac{c(1-p)}{1-p \cdot c/c_{пр}} & \text{при } c < c_{пр}; \\ c_{пр} & \text{при } c = c_{пр}. \end{cases} \quad (40)$$

Модуль упругости композита, состоящего из агрегатов и матрицы, содержащей связующее и одиночные включения, находятся по формулам (34), (36) путем замены  $E_b$  на модуль упругости агрегатов  $E_a$ ;  $E_c$  – на модуль упругости матрицы  $E_m$  при объемной доле агрегатов  $c_a$ , равной

$$c_a = p \cdot c / c_{пр}. \quad (41)$$

При этом модуль упругости агрегатов  $E_a$  вычисляется при инверсии связующего и включений по формулам (34), (36), т.е. если  $E_b$  и  $E_c$  поменять местами при  $c = (1 - c_{пр})$ .

Результаты расчета по предлагаемому методу приведены на рис. 7, а (кривая 3) и хорошо согласуются с модулем упругости образцов композита, полученного в результате испытаний [7] при объемных долях включений, близких к  $c_{пр}$ . Аналогично определяются эффективные коэффициент Пуассона и модуль сдвига композита с учетом образования агрегатов включений.

#### Воздушные поры

В процессе формования пластиков в композите остается некоторое количество не удаленного воздуха или газообразных продуктов полимеризации связующего. Образующуюся при этом пустотность  $c_n$  (объемная доля воздушных пор) можно определить из сопоставления теоретической плотности композита и полученной на основании опытных данных по формуле

$$c_n = 1 - \frac{m_b/\rho_b + m_c/\rho_c}{V_o}, \quad (42)$$

где  $m_b$ ,  $m_c$  – массы включений (волокон) и связующего, израсходованных при формовании композита, соответственно;

$\rho_b$ ,  $\rho_c$  – плотности включений (волокон) и отвержденного связующего соответственно;  
 $V_o$  – объем полученного композита.

При этом  $c_b + c_c + c_n = 1$ , где  $c_c$  – объемная доля связующего в композите.

Учет влияния пустотности на упругие характеристики композита удобно производить через изменение свойств полимерной матрицы. Модуль упругости связующего с воздушными порами  $E_c^{(n)}$  находится по формулам (34), (36) и (38) путем приравнения  $E_b = 0$ :

$$E_c^{(n)} = E_c \frac{1 - \left(\frac{c_n}{c_n + c_c}\right)^{2/3}}{\sqrt{1 + \frac{c_n}{c_n + c_c} - \left(\frac{c_n}{c_n + c_c}\right)^{2/3}}}. \quad (43)$$

Аналогично определяются коэффициент Пуассона связующего с порами  $\nu_c^{(n)}$  и модуль сдвига  $G_c^{(n)}$ .

Таким образом, стержневая и слоистая модели позволяют получить достаточно простые формулы, имеющие приемлемую точность для инженерной практики, которые можно использовать для проверки прочности корпусных конструкций судов из армированных пластиков.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алфутов Н.А. Расчет многослойных пластин и оболочек из композиционных материалов / Н.А. Алфутов [и др.]. – М.: Машиностроение, 1984. – 264 с.
2. Сендецкий Дж. Упругие свойства композитов. Том 2. Механика композиционных материалов. – М.: Мир, 1978. – С. 61 – 101.
3. Композиционные материалы. Справочник. – Киев: Наукова думка, 1985. – 592 с.
4. Альперин В.И. Конструкционные стеклопластики / В.И. Альперин [и др.]. – М.: Химия, 1979. – 360 с.
5. Емельянов М.Д. Оценка упругих свойств композитов с дисперсным армированием // Тр. ЦНИИМФ «Прочность корпуса и защита судов от коррозии». – Л.: Транспорт, 1988. – С. 73 – 81.
6. Ашкенази Е.К., Ганов Э.В. Анизотропия конструкционных материалов. Справочник. – Л.: Машиностроение, 1972. – 216 с.
7. Кристенсен Р. Введение в механику композитов. – М.: Мир, 1982. – 334 с.





## МОРЕХОДНЫЕ КАЧЕСТВА СУДОВ

**Н.Л. Великанов**  
д-р техн. наук, проф.

**С.И. Корягин**  
д-р техн. наук, проф.

**В.В. Ярисов**  
канд. техн. наук



### ОСТОЙЧИВОСТЬ РЫБОЛОВНЫХ СУДОВ НА ПРОМЫСЛЕ

Требования Международной морской организации (ИМО) и Российского морского регистра судоходства предусматривают дополнительную проверку остойчивости рыболовных судов, которые во время промысловых операций могут оказаться под кренящим воздействием сил от орудий лова [1, 2, 9].

#### Расчетные ситуации

Предполагается дополнительно проверять остойчивость рыболовных судов в следующих двух расчетных ситуациях.

#### Ситуация А

Судно в дрейфе выбирает кошельковый невод с уловом на тихой воде (кошелькование). Во время выборки кошелькового невода возникает угроза потери остойчивости промыслового судна. Проведенные в промысловых рейсах замеры углов крена [3 – 8] показали, что динамические углы крена достигают  $13^\circ$ , статические –  $4^\circ$ .

При выборке кошелькового невода стяжной трос на промысловом судне СЧС – 150 проходит через закрепленный на выстреле канифас-блок 1 (рис. 1), подвижный ролик 2 (канифас-блок) и поступает на барабан 3 (турачку) лебедки. Канифас-блок располагается на выстреле в средней части судна практически над фальш-бортом [3, 7, 8] (рис. 2). Около 30 судов этого типа эксплуатируются в различных бассейнах.

Выберем за начала подвижных систем координат, жестко связанных с судном, точку  $O_1$  – пересечения мидель-шпангоута с основной

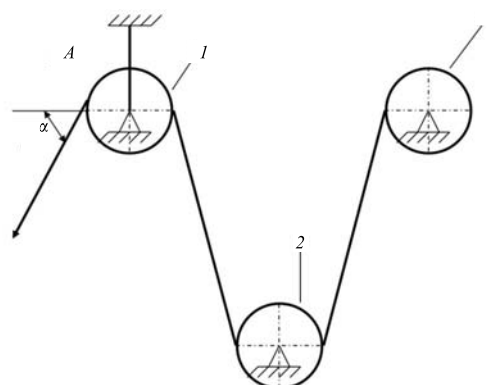


Рис. 1 Схема расположения стяжного троса на промысловом судне СЧС – 150

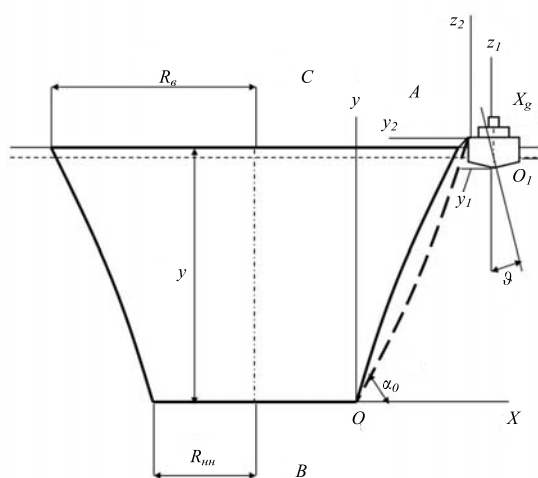


Рис. 2 Расчетная схема для расчета остойчивости судна при выборке кошелькового невода

линией судна и точку  $A_1$  – схода стяжного троса с канифас-блока (рис. 1, 2). Ось  $OX_1$  совпадает с основной линией судна и направлена в нос,  $OY_1$  – на правый борт, ось  $OZ_1$  – вертикально вверх.

Оси  $A_{x2}, A_{y2}, A_{z2}$  параллельны осям  $OX_1, OY_1, OZ_1$  соответственно. Горизонтальная  $OX$  (рис. 3) и вертикальная  $OY$  оси координат жестко связаны с нижней подборой невода и движутся вместе с ней. Ветвь  $OA$  стяжного троса и ось  $BC$  невода лежат в плоскости  $XOY$ .

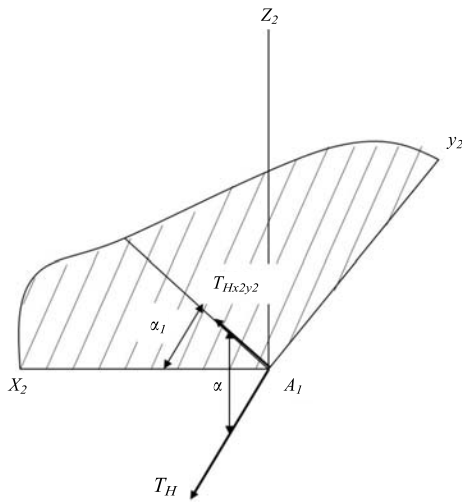


Рис. 3 Схема сил, действующих на судно при выборке кошелькового невода в условиях крена

Со стороны стяжного троса на судно действует сила  $T_H$  (рис. 3) – сила натяжения стяжного троса. Точка  $A_1$  приложения этой силы в общем случае не совпадает с мгновенным центром вращения судна. При выборке стяжного троса за два конца одновременно они могут проводиться через канифас-блоки, подвешенные на разных выстрелах, расстояние между которыми вдоль борта может достигать 10 м. На судно со стороны стяжного троса будет действовать две силы:  $T_{H1}$  и  $T_{H2}$ . Судно под действием силы  $T_H$  получает крен, дифферент, начинает разворачиваться и дрейфовать. Разворот и дрейф на современных сейнерах могут преодолеваются с помощью сдвоенных рулей, носовых и кормовых подруливающих устройств или мощного промышленного бота [6]. Крен и дифферент всегда присутствуют.

Определим по схеме [5] углы крена и дифферента судна при выборке кошелькового невода [7].

Сила натяжения стяжного троса  $T_H$  в точке  $A_1$  (точка схода с канифас-блока, рис. 1 – 3) при наклонении судна

$$T_H = T_{A1} + q_1(Z_{1A} - T)\cos\theta\cos\psi, \quad (1)$$

где  $T_{A1}$  – сила натяжения стяжного троса в точке  $A_1$  (пересечения свободной поверхности воды и стяжного троса, рис. 2);  
 $q_1$  – сила тяжести одного метра стяжного троса в воздухе;  
 $y$  – разность ординат верхней и нижней подбор невода, расположенных по соответствующим окружностям;  
 $Z_{1A}$  – аппликата точки  $A$ ;  
 $T$  – осадка судна;  
 $\theta$  – угол крена;  
 $\psi$  – угол дифферента.

Сила  $T_{A1}$  равна

$$T_{A1} = \sqrt{X_{A1}^2 + Y_{A1}^2}, \quad (2)$$

где  $X_{A1}$  – горизонтальная составляющая силы натяжения стяжного троса в точке  $A_1$ ;  
 $Y_{A1}$  – вертикальная составляющая силы натяжения стяжного троса в точке  $A_1$ .

Судно наклоняется на какой-либо борт под действием составляющей силы  $T_H$  (1) на плоскость  $Y_2AZ_2$ , горизонтальная проекция которой

$$T_{y2} = T_H \cos\alpha \sin\alpha_1 = X_{A1} \sin\alpha_1. \quad (3)$$

Соответствующая вертикальная проекция составляющей

$$T_{Z2} = -T_H \sin\alpha = -\sqrt{(q_1(Z_{1A} - T)\cos\psi\cos\theta + T_{A1})^2 - X_{A1}^2}. \quad (4)$$

При действии вертикальной составляющей корпус судна погрузится на величину  $\Delta T$ , равную

$$\Delta T = \Delta V / wS, \quad (5)$$

где  $\Delta V$  – объем дополнительно погруженной части корпуса;  
 $S$  – площадь ватерлинии;  
 $w$  – коэффициент, учитывающий отклонение бортов от вертикали (в районе переменных ватерлиний  $w = 1$ ).

В центре тяжести дополнительно погруженного объема приложена направленная вверх сила плавучести  $\gamma\Delta V$ , равная по величине и направленная противоположно силе  $T_{Z2}$  (4), т.е.

$$\gamma\Delta V = \sqrt{(q_1(Z_{1A} - T)\cos\psi\cos\theta + T_{A1})^2 - X_{A1}^2}, \quad (6)$$

где  $\gamma$  – удельный вес воды.

Из зависимостей (5), (6)

$$\Delta T = \frac{\sqrt{(q_1(Z_{1A} - T)\cos\psi\cos\theta + T_{A1})^2 - X_{A1}^2}}{w\gamma S}. \quad (7)$$

Восстанавливающий момент при малых углах крена равен

$$M_\theta = D_c(h_o + \Delta h)\sin\theta, \quad (8)$$

где  $D_c$  – водоизмещение судна ( $D_c = \gamma V$ );  
 $h_o$  – поперечная метацентрическая высота судна;  
 $\Delta h$  – изменение поперечной метацентрической высоты при крене.

Величина  $\Delta h$  по аналогии со случаем приема груза, не превосходящего 10 – 15% от водоизмещения

$$\Delta h = \frac{\sqrt{(q_1(Z_{1A} - T)\cos\psi\cos\theta + T_{A1})^2 - X_{A1}^2}}{D_c + \sqrt{(q_1(Z_{1A} - T)\cos\psi\cos\theta + T_{A1})^2 - X_{A1}^2}} \times [T + \Delta T/2 - h_o - Z_{1A}]. \quad (9)$$



По выражениям (7) – (9) восстанавливающий момент равен

$$M_0 = D_c \left\{ h_o + \frac{\sqrt{(q_1(Z_{1A} - T)\cos\psi\cos\theta + T_{A1})^2 - X_{A1}^2}}{D_c + \sqrt{(q_1(Z_{1A} - T)\cos\psi\cos\theta + T_{A1})^2 - X_{A1}^2}} \times [T - h_o - Z_{1A} + \frac{\sqrt{(q_1(Z_{1A} - T)\cos\psi\cos\theta + T_{A1})^2 - X_{A1}^2}}{2w\gamma S}] \right\} \sin\theta. \quad (10)$$

Кренящий момент представим как сумму моментов от вертикальной составляющей кренящей силы натяжения (4)  $M_1$  и горизонтальной (3)  $M_2$  согласно [4 – 6]:

$$M_{кр} = M_1 + M_2 \quad (11)$$

Момент  $M_1$  равен

$$M_1 = \sqrt{(q_1(Z_{1A} - T)\cos\psi\cos\theta + T_{A1})^2 - X_{A1}^2} \times [y_{1A}\cos\theta + (Z_{1A} - T - \frac{\Delta T}{2})\sin\theta]. \quad (12)$$

Составляющая кренящего момента  $M_2$

$$M_2 = X_{A1}\sin\alpha_1[(Z_{1A} - T)\cos\theta - y_{1A}\sin\theta]. \quad (13)$$

Кренящий момент по выражениям (7), (11) – (13)

$$M_{кр} = \sqrt{(q_1(Z_{1A} - T)\cos\psi\cos\theta + T_{A1})^2 - X_{A1}^2} \cdot [y_{1A}\cos\theta + (Z_{1A} - T - \frac{\sqrt{(q_1(Z_{1A} - T)\cos\psi\cos\theta + T_{A1})^2 - X_{A1}^2}}{2w\gamma S})\sin\theta] + X_{A1}[(Z_{1A} - T)\cos\theta - y_{1A}\sin\theta]\sin\alpha_1. \quad (14)$$

Формула (14) применима для углов крена, не превосходящих  $10^\circ$ , дифферента –  $1,5^\circ$ . В этом случае можно приближенно считать, что

$$\sin\theta = \theta; \quad \cos\theta = 1; \quad \sin\psi = \psi; \quad \cos\psi = 1. \quad (15)$$

В положении равновесия кренящий момент равен восстанавливающему

$$M_{кр} = M_0. \quad (16)$$

Тогда из зависимостей (10), (14) – (16) угол крена от действия силы натяжения стяжного троса

$$\theta = \{y_{1A}\sqrt{(q_1[Z_{1A} - T] + T_{A1})^2 - X_{A1}^2} + X_{A1}\sin\alpha_1(Z_{1A} - T)\} \left\{ D_c \left[ h_o + \frac{\sqrt{(q_1[Z_{1A} - T] + T_{A1})^2 - X_{A1}^2}}{D_c + \sqrt{(q_1[Z_{1A} - T] + T_{A1})^2 - X_{A1}^2}} \times [T + \frac{\sqrt{(q_1[Z_{1A} - T] + T_{A1})^2 - X_{A1}^2}}{2w\gamma S} - h_o - Z_{1A}]] + X_{A1}y_{1A}\sin\alpha_1 - \sqrt{(q_1[Z_{1A} - T] + T_{A1})^2 - X_{A1}^2} \times (Z_{1A} - T - \frac{\sqrt{(q_1[Z_{1A} - T] + T_{A1})^2 - X_{A1}^2}}{2w\gamma S}) \right\}^{-1}. \quad (17)$$

По зависимости (17) можно вычислить угол крена в любой момент при выборке кошелького невода по характеристикам судна, стяжного троса и гидродинамической силе, действующей на кошельковый невод.

Приравнивая работу кренящего момента и восстанавливающего, из равенства (16)

$$\int_0^\theta M_{кр} d\theta = \int_0^\theta M_0 d\theta. \quad (18)$$

Из зависимостей (17), (18) угол крена при мгновенном приложении нагрузки

$$\theta_m = 2\theta. \quad (19)$$

По равенству (19) угол крена судна при мгновенном приложении силы в два раза больше угла крена при статическом приложении той же силы натяжения стяжного троса.

Судно наклоняется в продольной плоскости под действием составляющей силы  $T_n$  на плоскость

$x_2A_1Z_2$  (рис. 3), вертикальная составляющая которой описывается выражением (4), горизонтальная – выражением (3):

$$T_{x2} = T_n \cos\alpha \cos\alpha_1 = X_{A1} \cos\alpha_1. \quad (20)$$

При наклонении судна на угол  $\psi$  в продольной плоскости восстанавливающий момент согласно [3] равен

$$M_c = D_c (H_{o1} + \Delta H_1) \sin\psi, \quad (21)$$

где  $H_{o1}$  – продольная метацентрическая высота судна,  
 $\Delta H_1$  – изменение продольной метацентрической высоты при дифференте.

Величина  $\Delta H_1$  по аналогии со случаем приема малого груза (меньшего 10 – 15% от  $D$ ) равна

$$\Delta H_{o1} = \frac{T_{Z2}}{D_c + T_{Z2}} H_{o1}. \quad (22)$$

Тогда из зависимостей (4), (21), (22)

$$M_{\psi} = D_c H_{o1} \left( 1 + \frac{\sqrt{(q(Z_{1A} - T)\cos\psi\cos\theta + T_{A1})^2 - X_{A1}^2}}{D_c + \sqrt{(q_1(Z_{1A} - T)\cos\psi\cos\theta + T_{A1})^2 - X_{A1}^2}} \right) \quad (23)$$

Дифференцирующий момент представим как сумму моментов от вертикальной составляющей  $M_3$  (зависимость (4)) и горизонтальной  $M_4$  (зависимость (3))

$$M_{\text{диф}} = M_3 + M_4. \quad (24)$$

Изменение осадки судна при действии составляющей (зависимость (4)) по аналогии с выражением (7) равно

$$\Delta T_1 = \frac{\sqrt{(q_1(Z_{1A} - T)\cos\psi\cos\theta + T_{A1})^2 - X_{A1}^2}}{w\gamma S}. \quad (25)$$

Момент  $M_3$  равен

$$M_3 = \sqrt{(q_1(Z_{1A} - T)\cos\psi\cos\theta + T_{A1})^2 - X_{A1}^2} \times [x_{A1}\cos\psi + (Z_{1A} - T + \Delta T/2)\sin\psi]. \quad (26)$$

Момент  $M_4$  равен

$$M_4 = \cos\alpha_1 X_{A1} [(Z_{1A} - T)\cos\psi - x_{1A}\sin\psi]. \quad (27)$$

Дифференцирующий момент по выражениям (24) – (27)

$$M_{\text{диф}} = \sqrt{(q_1(Z_{1A} - T)\cos\psi\cos\theta + T_{A1})^2 - X_{A1}^2} [x_{1A}\cos\psi + (Z_{1A} - T - \frac{\sqrt{(q_1(Z_{1A} - T)\cos\psi\cos\theta + T_{A1})^2 - X_{A1}^2}}{2w\gamma S})\sin\psi] + X_{A1} [(Z_{1A} - T)\cos\psi - x_{1A}\sin\psi]\cos\alpha_1. \quad (28)$$

В положении равновесия дифференцирующий момент равен восстанавливающему

$$M_{\text{диф}} = M_{\psi}. \quad (29)$$

По выражениям (15), (23), (28), (29) угол дифферента

$$\psi = \{x_{1A}\sqrt{(q_1(Z_{1A} - T) + T_{A1})^2 - X_{A1}^2} + X_{A1}[Z_{1A} - T]\cos\alpha_1\} \left\{ D_c H_{o1} \left( 1 + \frac{\sqrt{(q_1[Z_{1A} - T] + T_{A1})^2 - X_{A1}^2}}{D_c + \sqrt{(q_1[Z_{1A} - T] + T_{A1})^2 - X_{A1}^2}} \right) + X_{A1}x_{1A}\cos\alpha_1 - (Z_{1A} - T - \frac{\sqrt{(q_1[Z_{1A} - T] + T_{A1})^2 - X_{A1}^2}}{2w\gamma S}) \sqrt{(q_1[Z_{1A} - T] + T_{A1})^2 - X_{A1}^2} \right\}^{-1}. \quad (30)$$

По выражению (30) угол дифферента в процессе выборки кошелькового невода зависит от характеристик судна и стяжного троса и гидродинамической силы, действующей на кошельковый невод.

Приравниваем работу дифференцирующего момента и восстанавливающего

$$\int_0^{\psi} M_{\text{диф}} d\psi = \int_0^{\psi} M_{\psi} d\psi. \quad (31)$$

По зависимостям (30), (31) угол дифферента при мгновенном приложении нагрузки

$$\psi_m = 2\psi. \quad (32)$$

Угол дифферента (зависимость (32)) судна при мгновенном приложении силы натяжения стяжного троса, также как и при крене, в два раза больше угла дифферента при статическом приложении той же силы.

#### Ситуация В

Судно буксирует трал или другое орудие лова, которое может зацепиться за подводное препятствие (ситуация В типична для бортовых траулеров, но может реализоваться также и на траулерах кормового траления при обрыве одного из ваеров).

Предполагается, что тяга ваеров приложена к судну в точке А (рис. 4), расположенной в корму от центра тяжести судна, и что эта тяга не совпадает с диаметральной плоскостью судна. Поэтому после замата при попытках за счет упора винта оторвать трал от грунта судно начинает совершать циркуляцию

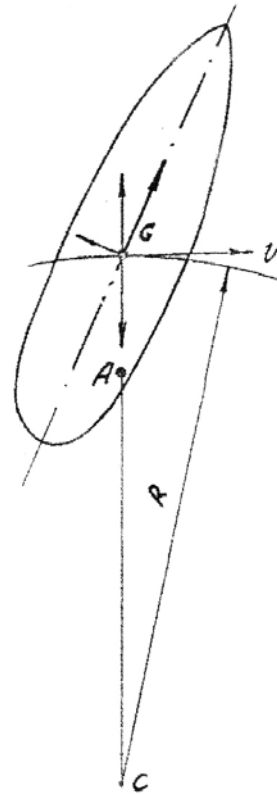


Рис. 4 Расчетная ситуация В

на тот борт, к которому смещена тяга ваеров. При этом вертикальная составляющая тяги и дополнительная сила плавучести образуют одну кренящую пару, а поперечная горизонтальная составляющая тяги и сопротивление воды при движении по окружности образуют вторую кренящую пару.

Если по условиям эксплуатации и техники промысла какая-либо из этих ситуаций не реализуется, соответствующие требования, изложенные ниже, не применяются.

**Критерии и нормативы остойчивости**

*Ситуация А*

Предполагается, что угол  $\varepsilon$  между вертикалью и силой тяги  $P$  (рис. 5) может меняться во время выборки в широком диапазоне и его значение может соответствовать наиболее опасному кренящему моменту.

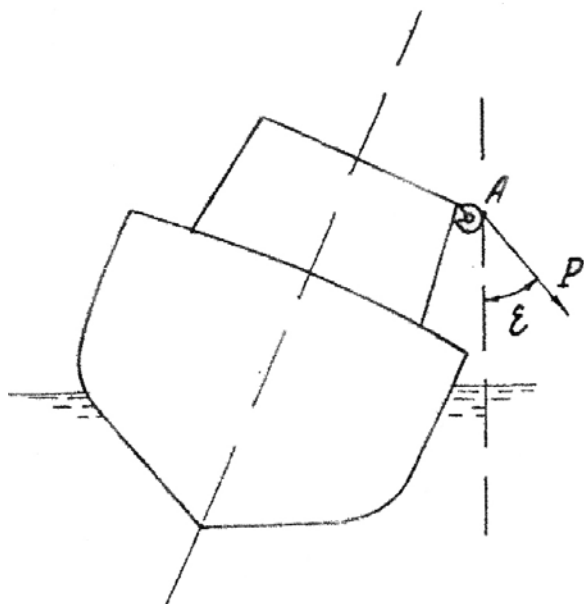


Рис. 5 Расчетная ситуация А

В качестве критерия остойчивости принимается отношение

$$l_{доп}/l_{крА}, \tag{33}$$

где  $l_{крА} = M_{кр}/\Delta$  – кренящее плечо для ситуации А;  
 $M_{крА}$  – максимальное значение кренящего момента от тяги промысловых механизмов при выборке орудий лова;  
 $l_{доп}$  – допустимое значение кренящего плеча.

В качестве допустимого значения кренящего плеча принимается плечо статической остойчивости судна при крене  $\theta = 10^\circ$ , а если угол входа палубы в воду  $\theta_a \leq 10^\circ$ , то за допустимое принимается значение плеча статической остойчивости при крене  $\theta = \theta_a$ .

Остойчивость считается достаточной в ситуации А, если

$$l_{доп}/l_{крА} \geq 1. \tag{34}$$

*Ситуация В*

Ситуация В рассматривается как аварийная. В качестве критерия остойчивости принимается статический угол крена в этой ситуации. Остойчивость считается достаточной, если расчет показывает, что соблюдается неравенство

$$\theta_{СТ} \leq \theta_{доп}. \tag{35}$$

Здесь  $\theta_{доп}$  – допустимый угол крена, который равен наименьшему из 3-х значений:

$$\left. \begin{aligned} \theta_{доп1} &= \theta_m - 10^\circ \\ \theta_{доп1} &= \theta_f \end{aligned} \right\}, \tag{36}$$

где  $\theta_m$  – угол первого максимума диаграммы статической остойчивости;

$\theta_f$  – наименьший из углов заливания, который следует определять в предположении, что все двери и люки открыты, кроме тех, которые открываются только в порту.

Порядок расчета кренящего плеча  $l_{кр}$  для оценки остойчивости в ситуации А

Кренящее плечо рассчитывается по формуле

$$l_{крА} = \frac{F_m}{\Delta} \sqrt{y_a^2 + (z_a - d)^2}, \tag{37}$$

где  $F_m$  – наибольшая номинальная тяга, которая может быть приложена к орудию лова со стороны промысловых механизмов (лебедок, силовых блоков и т.д.);

$y_a$  – расстояние между диаметральной плоскостью и точкой А, в которой снасть, передающая тягу, отходит от судна (рис. 6);

$z_a$  – расстояние между основной плоскостью и той же точкой А.



Рис. 6

Порядок расчета статического угла крена  $\theta_{ст}$  в ситуации В

Статический угол крена определяется как абсцисса точки пересечения диаграммы статической остойчивости и кривой кренящего плеча (рис.7). Кренящее плечо в ситуации В определяется для каждого угла крена по формуле:

$$l_{крВ} = p \frac{Ne}{\Delta} \{ 1,8 \cos \beta [(z_a - d) \sin \theta + y_a \cos \theta] + \frac{1}{2} \sin 2\beta [(z_a - d) \cos \theta + y_a \sin \theta] \}, \quad (38)$$

где  $p$  – удельный упор движителей. В расчете следует принимать:

$p = 0,010$  тс/л.с. для обычных гребных винтов;

$p = 0,015$  тс/л.с. для гребных винтов в насадках;

$Ne$  – номинальная мощность главного двигателя;

$\beta$  – угол между диаметральной плоскостью и прямой, проведенной через проекции центра тяжести (точка  $G$ ) и точки  $A$  на основную плоскость (рис. 7).

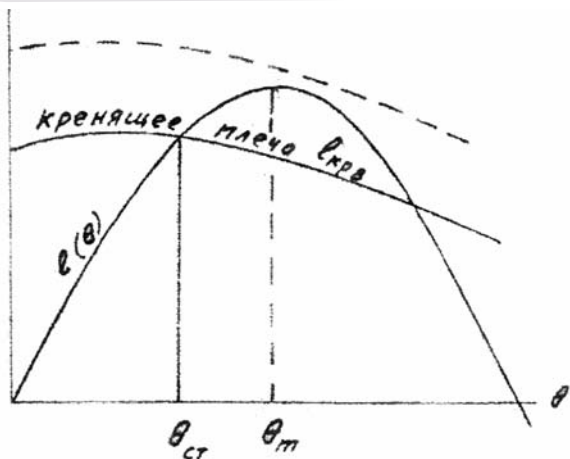


Рис. 7

#### Расчетный случай нагрузки

Остойчивость судна на промысле по предлагаемым расчетным зависимостям оценивается в следующем расчетном случае нагрузки: судно без груза; с 25% запасов топлива и воды, со 100% запасов льда и соли, без обледенения; на палубе размещен улов за один промысловый цикл (траление, замет невода и т.п.); орудие лова находится за бортом.

#### Указания в информации об остойчивости

Результаты дополнительной оценки остойчивости должны быть отражены в информации об остойчивости. Кроме того, в информации должны содержаться следующие указания для капитана.

Если при выборке орудий лова возникают углы крена, превышающие  $10^\circ$ , или палуба начинает входить в воду, необходимо немедленно уменьшить тяговое усилие промысловых механизмов.

Результаты расчетов остойчивости при зацепе орудий лова за грунт и попытках оторвать его за счет упора винта показывают, что могут возникнуть большие кренящие усилия, особенно при малой длине ваеров. Эти усилия могут быть приложены динамически в случае обрыва одного из ваеров, что усугубляет опасность. В такой обстановке должно быть обеспечено немедленное выполнение всех команд по управлению главным двигателем, рулем и лебедкой. При длине ваеров за бортом меньше 1,2 глубины места зацепа безопасность судна против опрокидывания не гарантируется.

Категорически воспрещается пытаться отрывать орудие лова от грунта за счет разгона судна и следующего рывка при ослабленном вначале ваере.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Торремолиносский протокол. ИМО. Лондон, 1993.
2. Правила классификации и постройки малых морских рыболовных судов. – СПб.: Российский морской регистр судоходства. – 2005.
3. Ананьев Д.М., Набиканова М.В., Нечаев Ю.И., Севастьянов Н.Б. Моряку об остойчивости // Под ред. Н.Б. Севастьянова. – Калининград: Кн. изд-во, 1972. – 244 с.
4. Великанов Н.Л., Корягин С.И. Механика системы «кошельковый невод – промысловое судно». – Калининград: Изд-во БФУ им. И. Канта, 2012. – 250 с.
5. Бачище А.В. Расчет и проектирование судовых грузоперерабатывающих устройств. – Калининград: КТИРПХ, 1992. – 256 с.
6. Гройсман М.Я. Моделирование нагрузок при выборке кошельковых неводов // Рыбн. хоз – во. – 1978. – № 3. – С. 56 – 58.
7. Мельников В.Н. Устройство орудий лова и технология добычи рыбы. – М.: Агропромиздат, 1991. – 384 с.
8. Ольховский В.Е., Яковлев В.И., Меньшиков В.И. Математическое обеспечение автоматизации тралового и кошелькового лова. – М.: Пищевая промышленность, 1980. – 168 с.
9. Стригин А.Г., Ульд Сиди Шейх, Ярисов В.В. Влияние промысловых операций на безопасность мореплавания промыслового судна // Научно-технические разработки в решении проблем рыбопромыслового флота и подготовки кадров: Материалы V Межвузовской научно-технической конференции аспирантов, докторантов и соискателей. – Калининград: БГАРФ, 2002. – С. 144 – 150.





## МАТЕРИАЛЫ И СВАРКА

**В.К. Башаев**

ФАУ «Российский морской  
регистр судоходства»



**Г.Д. Мотовилина**

канд. техн. наук

**В.В. Рябов**

**О.В. Сыч**

канд. техн. наук

**М.А. Гусев**



ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей»

## ХЛАДОСТОЙКОСТЬ ВЫСОКОПРОЧНОЙ ЛЕГИРОВАННОЙ СТАЛИ С ПРЕДЕЛОМ ТЕКУЧЕСТИ 500 МПа

### ВВЕДЕНИЕ

**А**рктическое судостроение и создание сложных платформ и судов для работы в Арктике и транспортировки углеводородов по Северному морскому пути в ближайшее время станут одними из передовых направлений отечественной промышленности.

Проекты разработки углеводородных месторождений шельфа Арктики и дальневосточных морей России предусматривают строительство целого ряда крупномасштабных конструкций, эксплуатирующихся при предельно низких климатических температурах ( $-40...-50^{\circ}\text{C}$ , а для внутренних бассейнов – до  $-60^{\circ}\text{C}$ ) при интенсивном воздействии циклических ветроволновых и ледовых нагрузок, с возможными сейсмическими воздействиями. К таким конструкциям относятся морские стационарные буровые платформы, плавучие буровые установки различных типов, транспортные суда и ледоколы, терминалы, подъемнотранспортное оборудование и др.

При проектировании и строительстве объектов морской техники для эксплуатации в ледовых условиях арктических морей требуется применение высокопрочных хладостойких свариваемых сталей с гарантированным пределом текучести не менее 500 МПа. Наличие вязко-хрупкого температурного перехода в сталях создает потенциальную опасность хрупких разрушений при понижении температуры эксплуатации. Очевидно, что из-за возможности тяжелых экономических и экологических последствий такая опасность должна быть устранена.

Можно констатировать, что современные нормативные документы зарубежных классификационных обществ и зарубежные стандарты, регламентирующие применение сталей для конструкций, размещаемых на шельфе, и судов ледового плавания, предусматривают значительно меньший объем сертификационных испытаний и менее жесткие требования по сравнению с правилами Российского морского регистра судоходства. Это относится, в частности, к испытаниям

по определению характеристик работоспособности и параметров свариваемости при сварке проб с различной погонной энергией [1, 2].

При оценке характеристик работоспособности основного металла высокопрочной легированной стали программы испытаний Регистра включают определение критических температур вязко-хрупкого перехода, коррелирующих с температурой торможения хрупкого разрушения, температуры нулевой пластичности  $NDT$  и температуры вязко-хрупкого перехода  $T_{кб}$ , а также определение критического раскрытия в вершине трещины  $CTOD$ .

По результатам всего комплекса испытаний определяется наиболее высокая температура  $T_d$ , соответствующая обеспечению всех заданных критериев и означающая, что сталь может применяться для всех наиболее ответственных и тяжело нагруженных элементов корпусных конструкций при расчетной температуре эксплуатации [3].

Целью данной статьи является исследование влияния структуры, формируемой в высокопрочной стали с пределом текучести не менее 500 МПа

различного легирования после термомеханической обработки, закалки с прокатного нагрева или отдельного печного нагрева с последующим высокотемпературным отпуском, на характеристики ее работоспособности.

## 1. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве материала для исследования выбран листовой прокат из высокопрочных легированных сталей марок E500 и F500W, химический состав которых представлен в табл. 1.

Исследуемый листовой прокат толщиной 25, 30, 35 и 60 мм отличался типом исходной заготовки (сляб или слиток), технологией изготовления (термомеханическая обработка, закалка с прокатного или отдельного печного нагрева с последующим высокотемпературным отпуском) и уровнем легирования (табл. 2).

Требования, предъявляемые к листовому прокату из сталей исследуемых марок, приведены в табл. 3.

Таблица 1

Химический состав исследуемых сталей

| Марка стали | Толщина листа, мм | Содержание элементов |      |      |       |       |          |       |       |       |       |       |       |
|-------------|-------------------|----------------------|------|------|-------|-------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|             |                   | C                    | Si   | Mn   | S     | P     | Ni+Cu+Cr | Al    | N     | V     | Ti    | Nb    | Mo    |
| E500        | 25                | 0,08                 | 0,25 | 1,50 | 0,001 | 0,008 | 1,10     | 0,053 | 0,003 | 0,008 | 0,018 | 0,035 | 0,013 |
| F500W       | 35                | 0,09                 | 0,24 | 0,65 | 0,002 | 0,006 | 2,37     | 0,020 | 0,008 | 0,010 | –     | 0,029 | 0,190 |
|             | 30, 60            | 0,09                 | 0,29 | 0,65 | 0,001 | 0,006 | 3,49     | 0,030 | 0,006 | 0,004 | 0,003 | 0,025 | 0,122 |
|             | 60                | 0,08                 | 0,27 | 0,64 | 0,003 | 0,007 | 3,32     | 0,040 | 0,006 | 0,032 | 0,004 | 0,026 | 0,141 |

Таблица 2

| Марка стали | Тип исходной заготовки | Технология производства | Толщина листа, мм | Параметр трещиностойкости $P_{ст}$ , % | Углеродный эквивалент $C_{эkv}$ , % | Удельное легирование $C_{эkv}$ (%) / толщина листа, мм |
|-------------|------------------------|-------------------------|-------------------|--|-------------------------------------|--|
| E500        | Сляб                   | TMCP                    | 25                | 0,19                                   | 0,41                                | 0,016  |
| F500W       | Слиток                 | З+О                     | 35                | 0,22                                   | 0,46                                | 0,013  |
|             | Сляб                   |                         | 30                | 0,25                                   | 0,61                                | 0,020  |
|             | Сляб                   |                         | 60                | 0,25                                   | 0,61                                | 0,010  |
|             |                        | ЗПН+О                   | 60                | 0,24                                   | 0,59                                | 0,010  |

Углеродный эквивалент  $C_{эkv}$  и параметр трещиностойкости  $P_{ст}$  определялись по формулам:

$$C_{эkv} = C + \frac{Mo + Cr + V}{5} + \frac{Cu + Ni}{15} + \frac{Mn}{6}, \%$$

$$P_{ст} = C + Si/30 + Mn/20 + Cu/20 + Ni/60 + Cr/20 + Mo/15 + V/10 + 5B, \%$$

Таблица 3

Требования, предъявляемые к высокопрочным хладостойким сталям с расчетной температурой эксплуатации  $-40^\circ\text{C}$ 

| Временное сопротивление $\sigma_B$ , МПа | Предел текучести $\sigma_{0,2}$ , МПа | Относительное удлинение $A_5$ , % | Работа удара $KV^{-60}$ Дж* | Температура вязко-хрупкого перехода $T_{кб}$ , $^\circ\text{C}^{**}$ | Трещиностойкость, $CTOD$ , мм, для стали толщиной до 50 мм*** | Трещиностойкость $CTOD$ , мм, для стали толщиной до 70 мм | Температура нулевой пластичности $NDT$ , $^\circ\text{C}$ , для стали толщиной |          |          |
|--|---------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|--|---|---|--|----------|----------|
|  |                                       |                                   |                             |  |   |   | до 30 мм   | до 40 мм | до 50 мм |
| 610 – 770                                | 500                                   | 18                                | 80                          | Ниже $-33$   | $\geq 0,20$   | $\geq 0,25$   | $-50$  | $-60$    | $-65$    |

\* – по требованию ГОСТ Р 52927-2008 на поперечных образцах;  
\*\* – по правилам РС [1]  $T_{кб} = 1,1T_d + 10^\circ\text{C}$ ;  
\*\*\* – по правилам РС [1, часть XII «Материалы», 3.2.3.2].

Исследование микроструктуры было выполнено методами оптической металлографии с помощью микроскопа «Axiovert 40 MAT» на шлифах после травления в соответствии с требованиями ГОСТ 5639-82.

Исследование тонкой структуры было проведено на фольгах с применением просвечивающего электронного микроскопа JEM-200CX при ускоряющем напряжении 120 кВ. Фольги для просвечивающей электронной микроскопии от исследуемых листовых прокатов изготавливались из испытанных образцов Шарпи, вырезанных поперек направления прокатки, на расстоянии 10 мм от поверхности листов. Окончательная подготовка образцов проводилась методом электролитического утонения на установке Struers TenuPol-5.

Исследование поверхности разрушения изломов образцов после испытаний на определение температуры вязко-хрупкого перехода  $T_{кб}$ , испытанных при отрицательных температурах, выполнено с применением растрового электронного микроскопа EM – 535.

Испытания по определению температуры вязко-хрупкого перехода  $T_{кб}$  проводили на универсальной гидравлической испытательной машине SCHENCK PEZ-4371 в соответствии с требованиями правил РС. Процентное содержание волокнистой составляющей в изломе определяется в соответствии с ГОСТ 30456-97. Температуру вязко-хрупкого перехода  $T_{кб}$  определяли при испытании статическим трехточечным изгибом до разрушения серии полнотолщинных поперечных образцов прямоугольного сечения с глубоким круглым надрезом. Испытывали образцы при ряде последовательно понижающихся температур. Критическую температуру вязко-хрупкого перехода  $T_{кб}$  определяли по графику температурной зависимости средней доли вязкой составляющей в изломах, как соответствующую 70% средней доли вязкой составляющей [1, 2].

Испытания для определения температуры нулевой пластичности ( $NDT$ ) проводили на вертикальном копре К90 путем нагружения падающим грузом с энергией разрушения 1350 Дж при понижающихся температурах в соответствии с требованиями правил РС и стандарта ASTM E-208. Испытаниям подвергали специальные образцы с нанесенной хрупкой наплавкой на растягиваемой поверхности и предварительно выполненным надрезом в наплавке. Охлаждение образцов перед испытанием проводили в термостатических камерах.

Результаты оценивали согласно стандарту ASTM E208 следующим образом:

- образец «разрушен» означает, что трещина распространилась от наплавки по основному металлу хотя бы до одной из боковых сторон образца по растягиваемой поверхности;

- образец «не разрушен» — трещина визуально обнаружена как минимум в металле наплавки, но она

не достигла при своем распространении боковых сторон образца.

Критическую температуру  $NDT$  определяли как наибольшую температуру с интервалом 5 °С, при которой хотя бы один образец отвечал критерию «разрушен» [1, 2, 12].

Испытания на трещиностойкость  $CTOD$  основного металла проводили в соответствии с требованиями правил РС и стандарта BS 7448 P.1. Выращивание усталостной трещины проводили на машине SCHENCK-250 кН при частоте 5 – 8 Гц. Суммарное число циклов нагружения для образца составило не менее 55000. Образцы испытывали при управлении испытательной машиной SCHENCK – 1000 кН по перемещению при квазистатическом нагружении со скоростью перемещения нагружающей траверсы, обеспечивающей возрастание коэффициента интенсивности напряжений для упругого участка нагружения образцов порядка  $1,5 \text{ Н/мм}^2\sqrt{\text{м/с}}$ , чему соответствовала скорость перемещения траверсы 0,2 мм/мин. Для поддержания заданной температуры в течение всего испытания образцы находились в криотермокамере [1, 2, 13].

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОВЕДЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

### *Результаты определения стандартных механических свойств*

На рис. 1 представлены результаты определения прочностных характеристик и относительного удлинения при одноосном растяжении, а также работы удара листового проката из сталей марок F500W и E500 в зависимости от толщины листов, технологии производства и удельного легирования.

Прочностные и пластические характеристики всех исследуемых листовых прокатов удовлетворяют требованиям, предъявляемым к высокопрочным хладостойким сталям с пределом текучести не менее 500 МПа. Однако следует отметить понижение уровня прочностных характеристик до минимально требуемых значений при одновременном повышении вязко-пластических свойств (относительного удлинения – до 23%, работы удара – до 300 Дж) для листового проката толщиной 35 мм из стали с углеродным эквивалентом  $C_{экв} = 0,46\%$ , изготовленного по технологии закалки с отдельного печного нагрева с последующим отпуском из слитка. Высокий уровень прочностных (предела текучести – 550 – 660 МПа, временного сопротивления – 650 – 710 МПа) и вязко-пластических свойств (относительного удлинения – 20 – 22,5%, работы удара при температуре испытаний – 60 °С – не менее 200 Дж) листового проката толщиной 30 – 60 мм обеспечивается при повышении углеродного

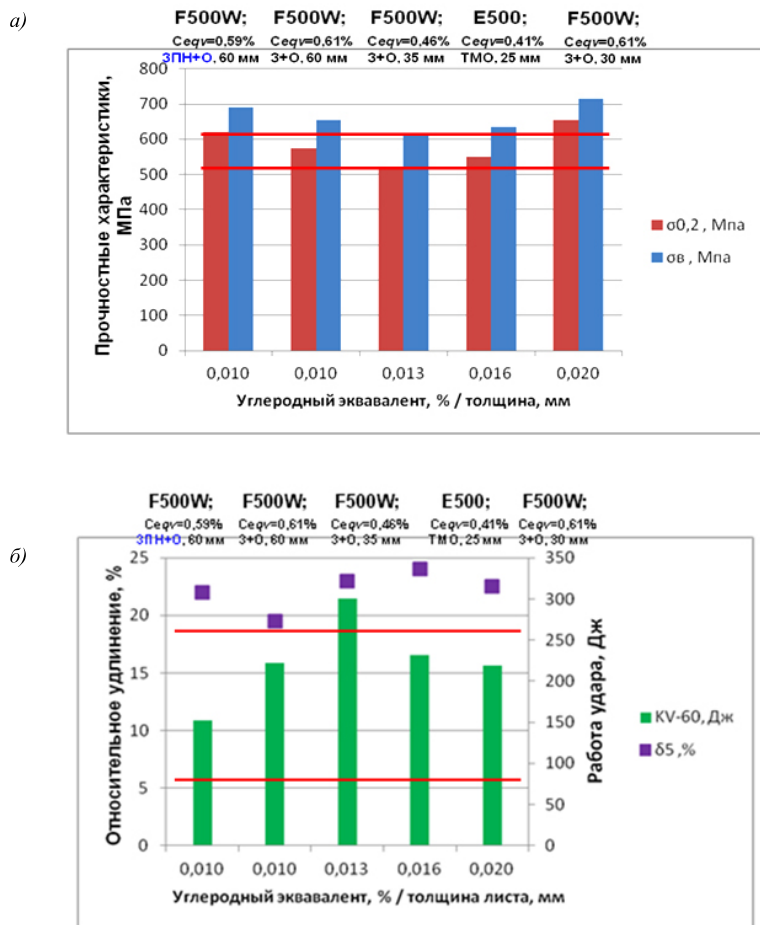


Рис. 1 Результаты испытаний исследуемых листовых прокатов:  
 а – определение предела текучести и временного сопротивления;  
 б – определение относительного удлинения и работы удара при температуре испытаний  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$

эквивалента  $C_{\text{экв}}$  до 0,61% и использовании технологии закалки с отдельного печного нагрева с отпуском. Для листового проката из стали с углеродным эквивалентом  $C_{\text{экв}} = 0,59\%$ , изготовленного по технологии закалки с прокатного нагрева с отпуском, получены высокие значения прочностных характеристик (на 90 – 110 МПа выше требуемых значений). При этом наблюдается понижение работы удара при температуре испытаний  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$  до 150 Дж. Применение термомеханической обработки для производства листового проката толщиной 25 – 30 мм из стали с углеродным эквивалентом  $C_{\text{экв}} = 0,41\%$  позволяет сформировать гарантированный комплекс прочностных (на 40 – 50 МПа выше минимально требуемых значений) и вязкопластических свойств (относительного удлинения – 24 % и работы удара при температуре испытаний  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$  – не менее 200 Дж).

На рис. 2 представлены результаты исследования сопротивления хрупким разрушениям при испытании образцов на ударный изгиб при пониженных темпера-

турах. Полученные зависимости свидетельствуют о достаточно низких температурах вязко-хрупкого перехода для всех рассматриваемых сталей. Все марки обеспечивают требуемые минимальные значения работы удара (не менее 80 Дж) при температурах вплоть до  $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

На рис. 3 представлены результаты исследования поверхности разрушения образцов после испытаний на ударный изгиб при температуре  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Изломы всех исследуемых ударных образцов имеют вязкий характер. Область зарождения магистральной трещины – протяженная с развитым макрорельефом. Разрушение образцов проходит по телу зерен по типу слияния микропор с образованием вязкого ямочного рельефа.

#### Результаты определения характеристик работоспособности

Результаты определения температуры вязко-хрупкого перехода  $T_{\text{кв}}$  и температуры нулевой пластичности  $NDT$  листового проката в зависимости от толщины листов, технологии производства и удельного легирования представлены на рис. 4, а. На рис. 4, б приведены результаты испытаний на трещиностойкость  $CTOD$  при отрицательных температурах  $-40\text{...}-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Изменение параметра трещиностойкости  $CTOD$  при понижении температуры испытаний различно для листового проката из стали с разным легированием, изготовленного по технологии закалки с отпуском и термомеханической обработки (рис.4, б). Для листового проката толщиной 30 мм из стали марки F500W с углеродным эквивалентом  $C_{\text{экв}} = 0,61\%$  значения параметра трещиностойкости  $CTOD$  практически не изменяются вплоть до температуры  $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ , в то время как для листа толщиной 60 мм наблюдается снижение параметра трещиностойкости  $CTOD$  при понижении температуры испытания. Для листового проката толщиной 25 мм из стали марки E500 с углеродным эквивалентом  $C_{\text{экв}} = 0,41\%$ , изготовленного по технологии термомеханической обработки, высокий уровень  $CTOD$  обеспечивается только до температуры испытаний  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Определение температуры вязко-хрупкого перехода крупногабаритных проб от листового проката толщиной 25 – 35 мм подтвердили высокий уровень хладостойкости по критерию  $T_{\text{кв}} = -38\text{...}-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  вне зависимости



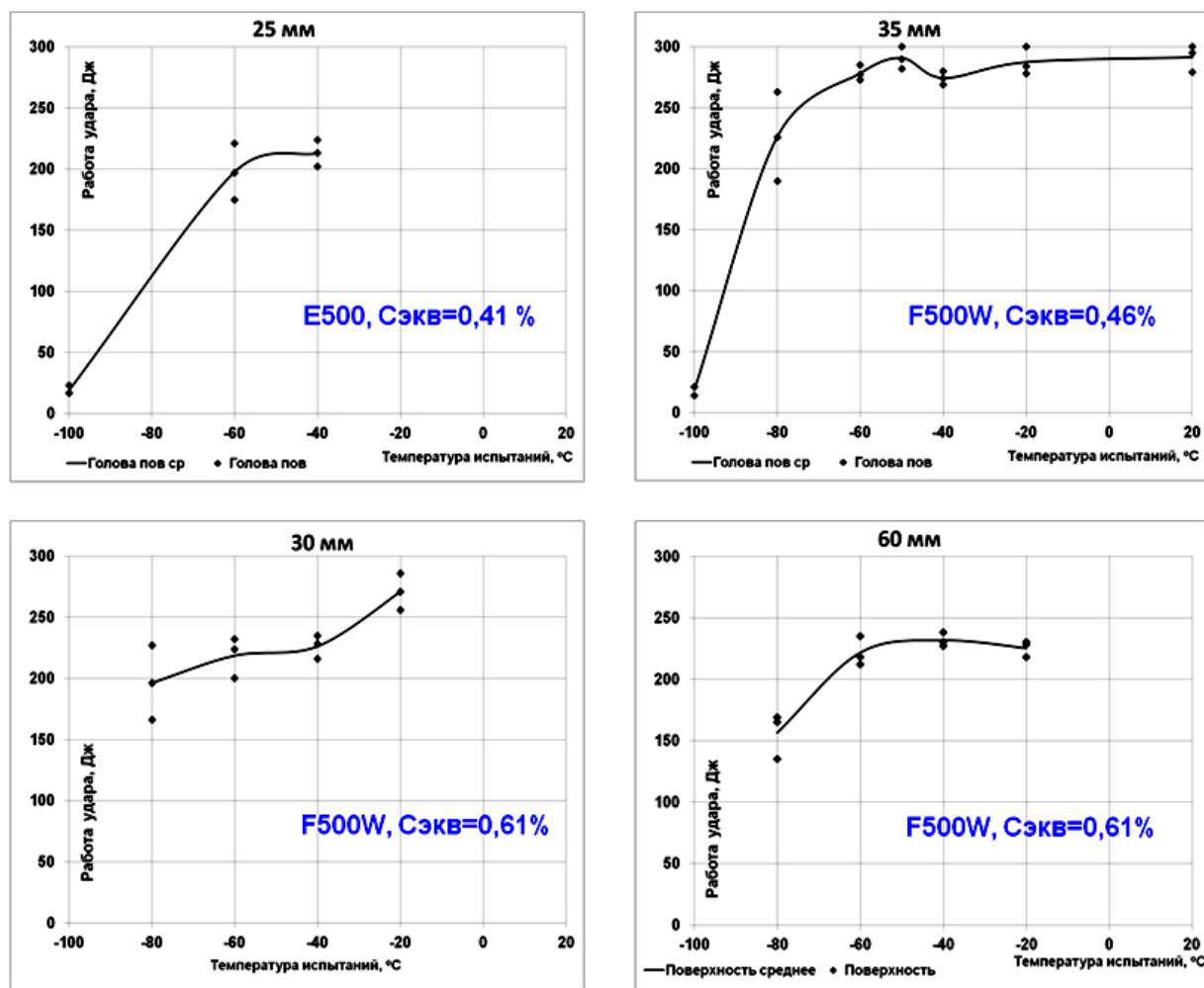


Рис. 2 Изменение работы удара листового проката из сталей исследуемых марок в зависимости от температуры испытания

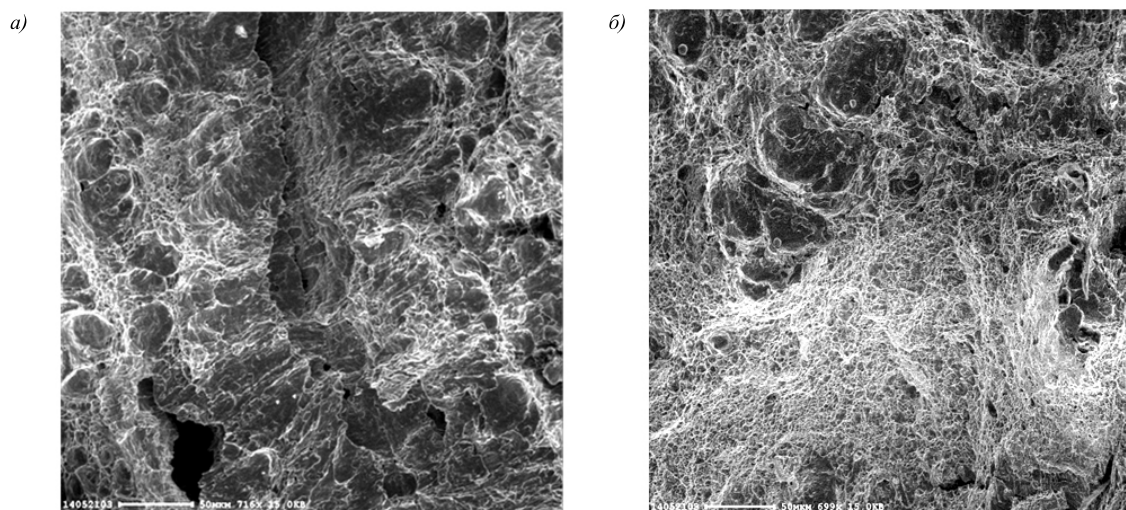


Рис. 3 Вид поверхности разрушения ударных образцов после испытаний при температуре  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ , отобранных от листового проката:  
 а – толщиной 25 мм из стали марки E500 с  $C_{\text{экв}}=0,41\%$  (ТМО),  $KV^{-60\text{ }^{\circ}\text{C}}=233$  Дж;  
 б – толщиной 35 мм из стали марки F500W (З+О),  $KV^{-60\text{ }^{\circ}\text{C}}=285$  Дж

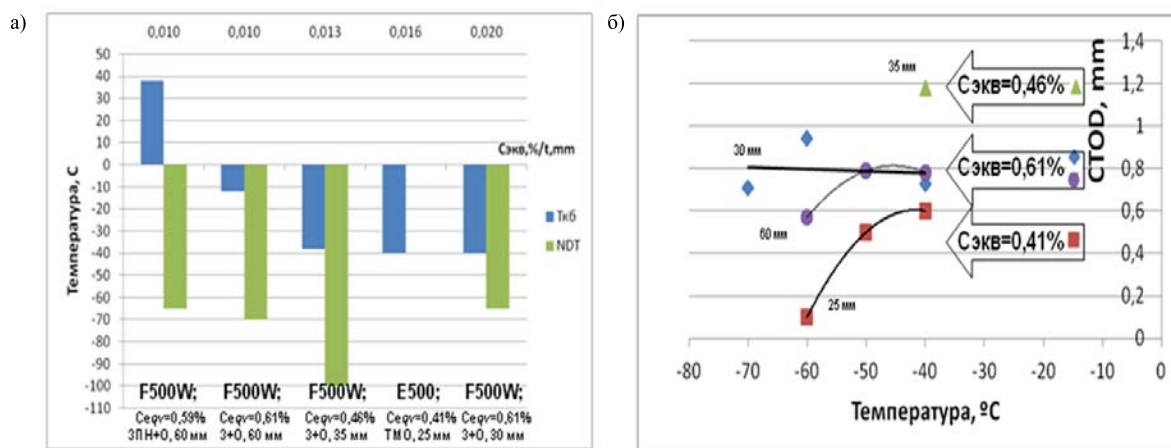


Рис. 4 Результаты определения характеристик работоспособности листового проката в зависимости от толщины листов, технологии производства и удельного легирования:

*a* – температуры вязко-хрупкого перехода  $T_{кб}$  и температуры нулевой пластичности  $NDT$ ; *б* – трещиностойкости  $CTOD$

от исходной заготовки (сляб или слиток), технологии изготовления (термомеханическая обработка или закалка с отдельного печного нагрева с последующим отпуском) и углеродного эквивалента ( $C_{эқв}$  от 0,41 до 0,61%). Значения температуры нулевой пластичности  $NDT$  для листовых прокатов толщиной 25 – 35 мм составляют  $-65...-100$  °C. Однако для листов толщиной 60 мм наблюдается снижение сопротивления хрупким разрушениям по критерию  $T_{кб}$ . Кроме того, для листов, изготовленных по технологии закалки с прокатного ( $C_{эқв}=0,59$  %) и отдельного печного нагрева ( $C_{эқв}=0,61$  %) с последующим отпуском, можно отметить существенное отличие значений температуры вязко-хрупкого перехода  $T_{кб}$ :  $+38$  °C и  $-12$  °C соответственно, при этом температура нулевой пластичности  $NDT$  для обоих листов составляет  $-65...-70$  °C (рис. 4, *a*).

На рис. 5 приведены фотографии изломов полнотолщинных проб после испытаний на определение температуры вязко-хрупкого перехода  $T_{кб}$ .

Согласно требованиям правил РС, после выполнения испытаний для определения температуры вязко-хрупкого перехода  $T_{кб}$  контролируется наличие расслоений (расщеплений) в изломе в области волокнистой составляющей [1].

Появление расслоений (расщеплений) связано с появлением зон объемного напряженного состояния, которые образуются в вершине трещины, распространяющейся при поломке пробы. Предположительно, механизм разрушения такого типа связан с наличием компоненты напряжений в направлении толщины листа ( $Z$ ), достигающей максимума  $\sim 2,5$  от предела текучести. Напряжение в направлении, перпендикулярном плоскости трещины (поперек

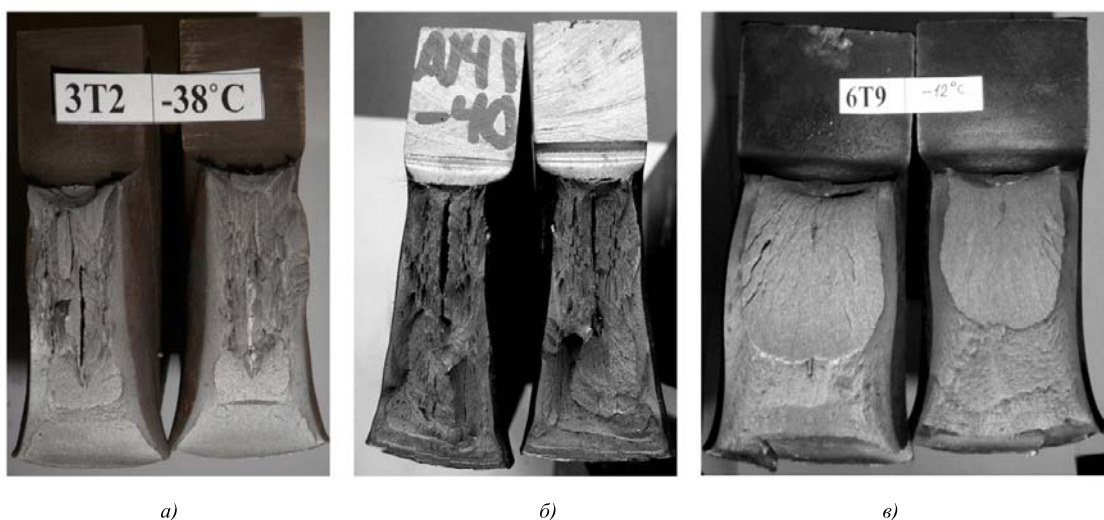


Рис. 5 Фотографии изломов полнотолщинных проб после испытаний на определение температуры вязко-хрупкого перехода  $T_{кб}$ :

*a* – от листового проката толщиной 30 мм из стали марки F500W,  $C_{эқв}=0,61$  %, 3+0,  $T_{кб}=-38$  °C;

*б* – от листового проката толщиной 25 мм из стали марки E500,  $C_{эқв}=0,41$  %, ТМО,  $T_{кб}=-40$  °C;

*в* – от листового проката толщиной 60 мм из стали марки F500W,  $C_{эқв}=0,61$  %, 3+0,  $T_{кб}=-12$  °C

направления прокатки,  $Y$ ), существенно выше и достигает  $\sim 3,5\sigma$  от предела текучести; в этом направлении выше и напряжение отрыва. Поэтому в изотропном материале развитие разрушения происходит исключительно в направлении  $Y$ , образуя поверхность излома [5].

Для неизотропных материалов критическое напряжение отрыва в направлении  $Z$  может оказаться существенно ниже, чем напряжение в направлении  $Y$ . В результате при распространении трещины происходят опережающие ее продвижение расщепления. При снижении температуры испытания ниже температуры вязко-хрупкого перехода разрушение стали проходит преимущественно сколом, и расслоения в изломе, как правило, не наблюдаются. Для появления расщеплений в области вязкого разрушения необходимо, чтобы размер структурной неоднородности, определяющей слоистое строение, был не менее  $0,1 - 0,2$  размера зоны действия высоких напряжений в направлении  $Z$ . При вязком механизме разрушения величина критического раскрытия трещины при ее страгивании равна  $150 - 200$  мкм, поэтому следует ожидать, что к образованию расслоений при разрушении приводят элементы структурной неоднородности размером более  $100$  мкм [5].

Причинами пониженного сопротивления отрыву в направлении  $Z$  могут служить, например, дендритная ликвация и возникающая вследствие этого неоднородная структура, протяженные границы раздела между структурными составляющими, неметаллические включения в виде скоплений, цепочек или отдельных протяженных хрупких включений [11].

Для выяснения природы и причин возникновения расщеплений в изломах проб исследуемых сталей после испытаний на определение температуры вязко-хрупкого перехода  $T_{кб}$  был проведен анализ неметаллических включений и микроструктуры, а также фрактографические исследования поверхности разрушения полнотолщинных проб.

Исследование поверхности разрушения проб после испытания на определение температуры вязко-хрупкого перехода  $T_{кб}$ , выполненное методами растровой электронной микроскопии, показало, что по сравнению с листами толщиной  $25 - 30$  мм, с протяженной областью зарождения магистральной трещины, при

разрушении проб от листов толщиной  $60$  мм зона зарождения магистральной трещины практически отсутствует. Очагом зарождения магистральной трещины при разрушении проб от листов толщиной  $25 - 30$  мм являются множественные выходы микротрещин (рис. 6, *a*), очагом зарождения магистральной трещины в пробах от листов толщиной  $60$  мм – скопления крупных неметаллических включений, распределенные вдоль направления прокатки, или границы отдельных крупных зерен (рис. 6, *б, в*).

Анализ микроструктуры образцов, выполненный с помощью оптической металлографии и просвечивающей электронной микроскопии, показывает, что микроструктура листового проката толщиной  $25$  и  $35$  мм характеризуется высокой дисперсностью и однородностью по толщине проката, что позволяет обеспечить высокую хладостойкость высокопрочной стали. Морфология и соотношение структурных составляющих определяется технологией производства (рис. 7). Структура листового проката толщиной  $35$  мм из стали с углеродным эквивалентом  $C_{экв} = 0,46\%$ , изготовленного с применением закалки и высокого отпуска, представляет собой преимущественно гранулярный бейнит при наличии речного бейнита в количестве до  $20\%$  (рис. 7, *a, в*). Микроструктура листового проката толщиной  $25$  мм после термоме-

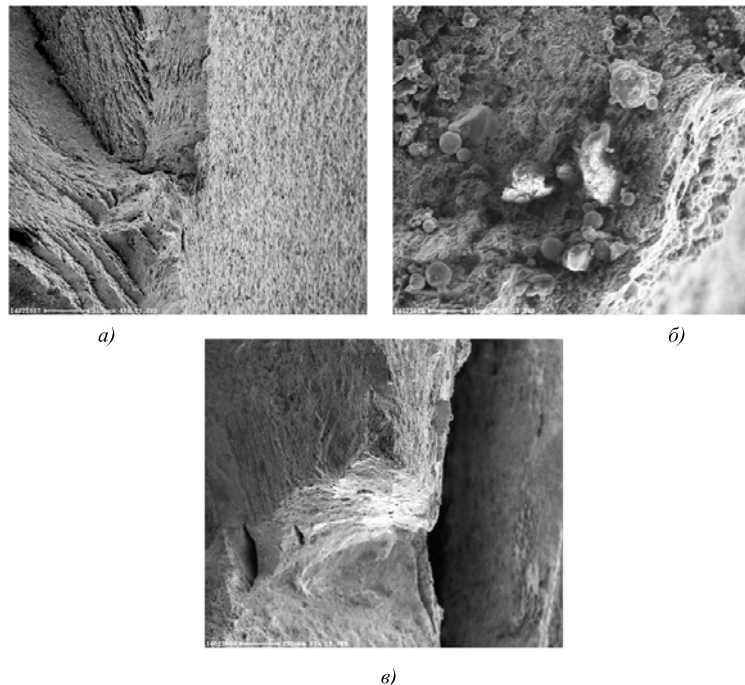


Рис. 6 Область зарождения трещины в полнотолщинных пробах, испытанных на определение температуры вязко-хрупкого перехода  $T_{кб}$ :  
*a* – вид поверхности разрушения пробы от листового проката толщиной  $30$  мм стали категории F500W,  $C_{экв} = 0,61\%$ , 3+O;  
*б, в* – вид поверхности разрушения пробы от листового проката толщиной  $60$  мм из стали категории F500W,  $C_{экв} = 0,61\%$ , 3+O (зарождение магистральной трещины начинается на скоплении крупных неметаллических включений (*б*) и по границам крупных зерен (*в*))

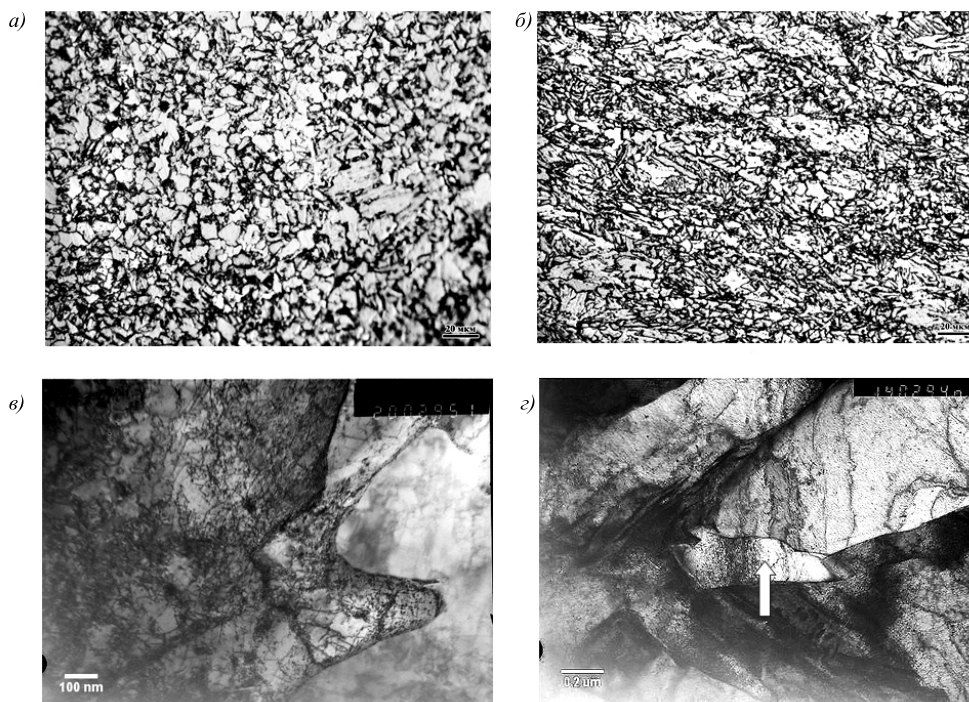


Рис. 7 Структура в середине по толщине листового проката:  
*а, в* – толщиной 35 мм из стали с углеродным эквивалентом  $C_{э\text{кв}} = 0,46\%$  марки F500W, изготовленного с использованием закалки и высокого отпуска;  
*б, г* – толщиной 25 мм из стали с углеродным эквивалентом  $C_{э\text{кв}} = 0,41\%$  марки E500, изготовленного с использованием термомеханической обработки (стрелкой отмечено зерно феррита, расположенное на стыке областей реечного бейнита)

ханической обработки (рис. 7, *б, г*), представлена как гранулярным, так и реечным бейнитом (в количестве около 50% общей исследованной площади шлифа). В структуре данного листа содержатся также такие фазы, как феррит и вырожденный перлит, доля которых в совокупности не превышает 15%.

Структура листового проката толщиной 60 мм из стали марки F500W, изготовленного по технологии закалки как с отдельного печного нагрева (рис. 8, *а, в*), так и после закалки с прокатного нагрева (рис. 8, *б, г*), представляет собой преимущественно бейнит, имеющий выраженную полосчатость в направлении прокатки. Полосчатость образована областями бейнита реечной и гранулярной морфологии разной дисперсности. Необходимо отметить, что технология закалки влияет на размеры бейнитных областей. В листовом прокате, изготовленном с применением закалки с отдельного печного нагрева, размеры бейнитных кристаллитов не превышают 30 мкм, тогда как в листовом прокате после закалки с прокатного нагрева размеры бейнитных областей могут достигать 70 мкм. В областях расположения дисперсных бейнитных кристаллитов с повышенной травимостью обнаружены скопления различных неметаллических включений. Эти неметаллические включения представляют собой обедненные кальцием алуминаты и алюмосиликаты протяженностью до 120 мкм, зернограничные карбиды

цементитного типа и включения пластичных сульфидов марганца. Наличие в листовом прокате полосчатой неоднородной структуры, обогащенной неметаллическими включениями, снижает работу, затрачиваемую на зарождение магистральной трещины, и способствует появлению расщеплений на поверхности изломов при статических и динамических испытаниях образцов натурной толщины [11].

## ВЫВОДЫ

Изготовление листового проката из высокопрочной легированной стали с гарантированным пределом текучести 500 МПа осуществляется с использованием трех технологических схем, применение которых обуславливается техническими возможностями оборудования, толщиной листов и требованиями к категории хладостойкости. При этом характеристики хладостойкости определяются внутренней структурой, которая зависит от выбранной композиции легирования, типа исходной заготовки, технологии производства и толщины листов.

- Формирование дисперсной бейнитной структуры в листовом прокате толщиной 25 – 35 мм обуславливает получение температуры вязко-хрупкого перехода

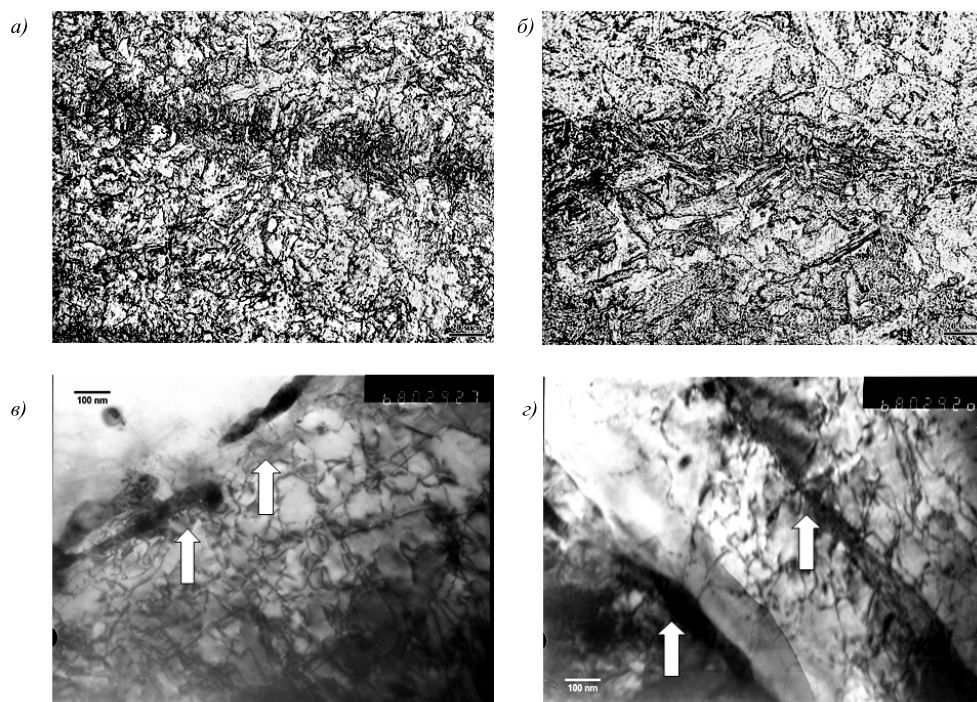


Рис. 8 Структура в середине по толщине листового проката толщиной 60 мм из стали марки F500W:  
 а, б – с углеродным эквивалентом  $C_{\text{экв}} = 0,61\%$ , изготовленного с использованием закалки с отдельного печного нагрева и высокотемпературного отпуска;  
 в, г – с углеродным эквивалентом  $C_{\text{экв}} = 0,59\%$ , изготовленного с использованием закалки с прокатного нагрева и высокотемпературного отпуска (стрелками отмечены выделения цементитного типа на границах раздела гранулярного (в) и реечного (г) бейнита)

$T_{\text{кб}}$  на крупногабаритных пробах, равной  $-38...-40$  °С, и температуры нулевой пластичности  $NDT -65...-100$  °С. Варьирование содержания легирующих элементов в стали и технологии производства листов данных толщин дает возможность управлять морфологией и дисперсностью бейнита, что позволяет сохранять высокие показатели хладостойкости. Применение термомеханической обработки при изготовлении листов толщиной 25 – 35 мм из стали с содержанием марганца 1,5% при суммарном содержании никеля и меди 1,0 – 1,1% позволяет сформировать преимущественно реечный бейнит, тогда как после закалки с отпуском в стали с содержанием марганца 0,65% при суммарном содержании никеля, меди и хрома 2,35 – 2,45% формируется дисперсный бейнит преимущественно гранулярного типа.

• При увеличении толщины листового проката до 60 мм снижается скорость охлаждения, что при недостаточном содержании легирующих элементов увеличивает вероятность формирования неравномерной бейнитной структуры с крупными областями гранулярного и реечного бейнита. В связи с этим для увеличения прокаливаемости стали при закалке листового проката в толщинах 40 – 60 мм необходимо повышение углеродного эквивалента до 0,59 – 0,61% за счет увеличения суммарного содержания никеля, меди и хрома до 3,3 – 3,5 %.

• Для изготовления толстолистового проката (40 – 60 мм) может быть использована как закалка с отдельного печного, так и с прокатного нагрева с последующим высокотемпературным отпуском. Однако следует учесть, что технология закалки влияет на дисперсность бейнитных областей. При использовании закалки с прокатного нагрева необходим правильный выбор параметров деформации листового проката перед закалкой, в противном случае, в сочетании с неудовлетворительным металлургическим качеством стали, это может привести к получению крайне низких показателей хладостойкости ( $T_{\text{кб}} = +38$  °С).

• Повышение хладостойкости толстолистового проката может быть достигнуто за счет повышения металлургического качества исходной заготовки и проработки структуры при последующих технологических операциях для повышения однородности и дисперсности структуры по всей толщине листа. Из-за высокого уровня легирования рассматриваемой стали измельчение аустенитного зерна при прокатке в основном происходит за счет процессов статической рекристаллизации в паузах между проходами, в то время как динамическая рекристаллизация происходит частично. Полученная разнородность не устраняется и при метадинамической рекристаллизации. Неоднородность в величине аустенитного зерна может сохраняться после проведения термоулучшения вследствие

склонности стали к структурной наследственности и таким образом может привести к снижению хладостойкости листового проката больших толщин.

• Использование исходной заготовки большой толщины (слиток) позволяет понизить углеродный эквивалент стали с 0,61 до 0,46% за счет качественной проработки структуры при прокатке и формирования дисперсной структуры с бейнитом преимущественно гранулярной морфологии, которая и обеспечивает получение повышенных значений низкотемпературной ударной вязкости и пониженных температур вязкохрупкого перехода:  $T_{\text{к6}} = -40$  °С,  $NDT = -100$  °С.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила классификации, постройки и оборудования плавучих буровых установок и морских стационарных платформ. – СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2012.
2. Правила классификации и постройки морских судов. – СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2013.
3. Ильин А.В., Хлусова Е.И., Гусев М.А. Стали с индексом «аге» для оффшорных конструкций – критерии применимости и методики сертификационных испытаний // Доклад на 12-м Международном энергетическом форуме, Санкт-Петербург, 18 – 20 сентября 2012 г.
4. ГОСТ Р 52927-2008. Прокат для судостроения из стали нормальной, повышенной и высокой прочности. Технические условия.
5. Ильин А.В., Гусев М.А. Новые методики исследования сопротивления разрушению металла труб для магистральных газопроводов // Черная металлургия. Бюл. науч.-тех. и экон. информ./ – 2013. – Вып. 6 (1362). С. 47 – 59.
6. Горынин И.В., Малышевский В.А., Семичева Т.Г., Хлусова Е.И. Создание новых экономнолегированных хладостойких сталей для судостроения и морской техники // Вопросы материаловедения. – 2005. – № 2 (42). – С. 27 – 29.
7. Владимиров Н.Ф., Семичева Т.Г., Хлусова Е.И., Голованов А.В. Разработка технологии и освоение производства новых хладостойких свариваемых сталей для ледостойких буровых платформ // Производство проката. – 2005. – № 10. – С. 6 – 13.
8. Рыбин В.В., Малышевский В.А., Хлусова Е.И. Структура и свойства хладостойких сталей для конструкций северного исполнения // Вопросы материаловедения. – 2006. – № 1 (45). – С. 24 – 44.
9. Горынин И.В., Рыбин В.В., Малышевский В.А., Хлусова Е.И. Принципы легирования, фазовые превращения, структура и свойства хладостойких свариваемых судостроительных сталей // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2007. – № 1. – С. 9 – 15.
10. Орыщенко А.С., Малышевский В.А., Хлусова Е.И. Современные конструкционные стали для Арктики // Судостроение. – 2013. – № 3. – С. 46 – 49.
11. Малахов Н.В., Мотовилина Г.Д., Хлусова Е.И., Казаков А.А. Структурная неоднородность и методы ее снижения для повышения качества конструкционных сталей // Вопросы материаловедения. – 2009. – № 3 (59). – С. 52 – 64.
12. ASTM E208. Standard Test Method for Conducting Drop-Weight Test to Determine Nil Ductility Transition Temperature of Ferritic Steels. – 2006.
13. BS 7448 – Part 1. Fracture mechanics toughness tests – Method for determination of  $K_{Ic}$  critical CTOD and critical  $J$  values of metallic materials.



#### ОБОЗРЕНИЕ: ЦНИИ «ПРОМЕТЕЙ» – 75 ЛЕТ

Федеральному государственному унитарному предприятию «Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов» «Прометей» в 2014 г. исполняется 75 лет.

Сегодня «Прометей» – крупнейший межотраслевой материаловедческий центр, признанный лидер в области разработки принципиально новых, имеющих общегосударственное значение материалов и технологий, обеспечивающих решение задач научно-технического развития промышленности и сохранение обороноспособности государства.

Институт начал свою деятельность в 1939 г. с создания и освоения

производства брони для легендарных танков Т-34, КВ и самолеташтурмовика ИЛ-2. Из материалов, разработанных «Прометеем», построен весь отечественный Военно-Морской Флот — подводный и надводный, множество гражданских судов различного назначения, а также атомные электростанции, ледостойкие буровые платформы и другие конструкции, способные эксплуатироваться под высокими нагрузками в агрессивной среде.

Разработки «Прометей» направлены на развитие ключевых отраслей – судостроения, машиностроения, гидроэнергетики и военной техники, атомной, тепловой, газодобы-

вающей и нефтеперерабатывающей промышленности, чьи изделия, конструкции и оборудование работают в экстремальных условиях эксплуатации.

Многие известные ученые и специалисты в области металлургии, сварки, неметаллических композиционных материалов, нанотехнологий входят в состав секции «Материалы и сварка» Научно-технического совета РС. Председателем секции, а также членом президиума НТС РС является заместитель директора института, профессор Виктор Андреевич Малышевский.

**М.А. Михайлова**

канд. техн. наук

**Н.С. Яковлев**

ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей»

**С.М. Кордонец**ФАУ «Российский морской  
регистр судоходства»**И.В. Манихин**ФГУП «Крыловский  
государственный  
научный центр»

## ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДИКА ИСПЫТАНИЙ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ БАЛЛАСТНЫХ ЦИСТЕРН И ПРОСТРАНСТВА ДВОЙНОГО БОРТА

Для обеспечения безопасной эксплуатации судов в развитие правил II-I/3-2 и XII-6 Международной конвенции по охране человеческой жизни на море 1974 г. (СОЛАС) Международная морская организация (ИМО) приняла резолюцию MSC.215(82), регламентирующую требования к защитным покрытиям для балластных цистерн и пространств двойных бортов морских судов, а также разработала Стандарт качества защитных покрытий (PSPC). Применение стандарта обязательно ко всем новым судам с июля 2008 г.

Для включения в проектную документацию новых судов и применения в балластных цистернах защитные покрытия должны иметь Свидетельство о типовом одобрении Российского морского регистра судоходства, которое выдается на основании положительных результатов квалификационных испытаний на соответствие требованиям PSPC, выполненных лабораторией, независимой от изготовителя лакокрасочных материалов (ЛКМ).

PSPC предусматривает следующие виды испытаний:

- для защитных покрытий балластных цистерн забортной воды – в качающемся танке, моделирующем условия в балластных цистернах, и в камере конденсации влаги;
- для защитных покрытий пространств двойных бортов навалочных судов длиной 150 м и более – в камере конденсации.

В приложении 1 к PSPC сформулированы требования к процедуре испытаний защитных покрытий для балластных цистерн забортной воды в качающемся танке:

1. Продолжительность испытаний – 180 дней.
2. Число образцов для испытаний – 5.

3. Размер каждого образца  $200 \times 400 \times 3$  мм. Два из образцов имеют приваренные U-образные планки. Один образец имеет разрушаемый цинковый анод.

4. Испытательный цикл: две недели с естественной или искусственной морской водой и одна неделя без воды.

5. Температура морской воды – приблизительно  $35^\circ\text{C}$ .

6. Интервал качания танка – 3 с или менее.

7. Требования к испытательным образцам:

*Испытательный образец № 1* должен быть нагретым в течение 12 ч до  $50^\circ\text{C}$  и охлажденным в течение 12 ч до  $20^\circ\text{C}$ , для того, чтобы смоделировать условия верхней палубы.

Испытательный образец циклически заплескивается естественной или искусственной морской водой для того, чтобы моделировать килевую и бортовую качку судна. Интервал заплескивания – 3 с или менее.

Образец имеет прорезанную до голой стали линию поперек ширины (перпендикулярно длинной стороне образца).

*Испытательный образец № 2* имеет установленный разрушаемый цинковый анод для оценки эффективности катодной защиты. Круглый вырез диаметром 8 мм, до голой стали, расположен на испытательном образце на расстоянии 100 мм от анода для оценки совместимости покрытия с катодной защитой. Испытательный образец циклически погружается в естественную или искусственную морскую воду (две недели погружен в морскую воду при  $35^\circ\text{C}$  и одна неделя без воды).

*Испытательный образец № 3* должен быть охлажден с обратной стороны, чтобы обеспечить

разницу температур для того, чтобы смоделировать охлажденную переборку в балластном крыльевом танке, и заплескан естественной или искусственной морской водой для того, чтобы смоделировать килевую и бортовую качки судна. Разница температур приблизительно 20 °С, интервал заплескивания – 3 с или менее.

Образец имеет прорезанную до голой стали линию поперек ширины (перпендикулярно длинной стороне образца).

*Испытательный образец № 4* должен циклически заплескиваться естественной или искусственной морской водой для того, чтобы смоделировать килевую и бортовую качки судна. Интервал заплескивания – 3 с или менее.

Образец имеет прорезанную до голой стали линию поперек ширины (перпендикулярно длинной стороне образца).

*Испытательный образец № 5* должен подвергаться сухому нагреву в течение 180 дней до 70 °С для того, чтобы смоделировать нагревание листов, находящихся на границе между нагретым топливным танком и балластной цистерной двойного дна.

В нашей стране ни одна испытательная лаборатория не оснащена качающимся испытательным танком. Закупка его невозможна – он серийно не выпускается, поэтому было принято решение о проектировании и изготовлении качающегося испытательного танка. Разработка, изготовление и оснащение лаборатории ФГУП «ЦНИИ КМ «Прометей» качающимся испытательным танком позволяет ей выполнять квалификационные испытания и ликвидировать практически полную зависимость отечественного гражданского судостроения от зарубежных поставщиков морских покрытий для балластных цистерн.

Для обеспечения моделирования воздействующих факторов на каждый из образцов, предусмотренных PSPC, было решено испытуемые образцы закрепить в танке согласно схеме, представленной на рис. 1.

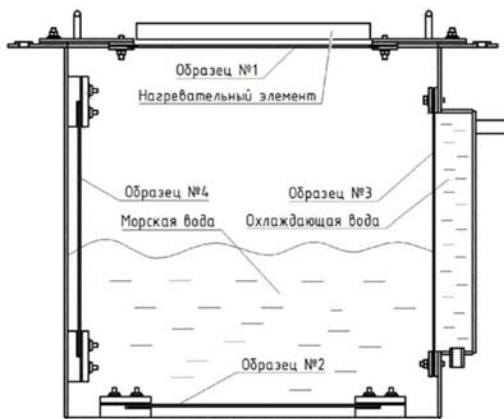


Рис. 1 Схема крепления образцов в танке

Разработанный качающийся танк представляет собой испытательный стенд, состоящий из следующих частей (рис. 2):

- рамного основания 1, установленного на фундаменте в помещении;
- подвижной рамы 2, установленной на полусах 3, заделанных в основание 1;
- двух танков 4, выполненных из титана, частично заполненных водой, с затопленными внутри образцами, установленными на подвижной раме 2;
- мотора-редуктора 5, обеспечивающего качание рамы 2 с танками 4 относительно основания 1 с помощью кривошипно-шатунного механизма 6;
- криостата 7, обеспечивающего подачу охлаждающей воды к образцу № 3;
- нагревательного элемента 8, обеспечивающего обогрев образца № 1;
- нагревательного элемента 9, обеспечивающего нагрев морской воды в танке;
- щита управления 10, на который выведены показания и органы регулировки температур и частоты качания танка.

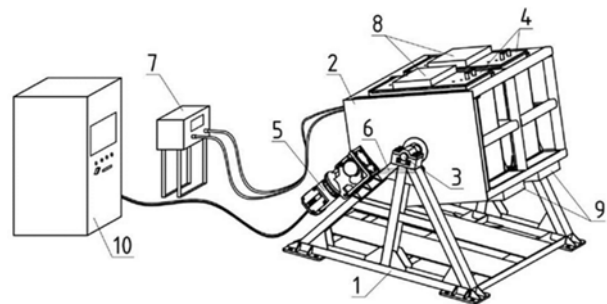


Рис. 2 Конструктивный облик качающегося танка

Работа нагревательных элементов и криостата регулируется автоматически по данным датчиков температуры, установленных в танке.

Контакт титана со сталью исключен путем применения полимерных прокладок и втулок.

Испытательный качающийся танк соответствует требованиям PSPC, проектная документация согласована с Российским морским регистром судоходства.

Для проведения испытаний на соответствие PSPC разработан руководящий документ – «Методика квалификационных испытаний защитных лакокрасочных покрытий для балластных цистерн судов и межбортных пространств балкеров. Методические указания», включающий методики испытаний в качающемся танке и в камере конденсации.

В методике указано, что до испытаний должны быть получены следующие данные о ЛКМ, входящих в систему покрытий:



- результаты идентификации основы и отвердителя методами ИК-спектроскопии (допускается использовать результаты ИК-спектрометрии, предоставляемые производителем ЛКМ);

- плотность основы и отвердителя в соответствии с международными стандартами [1 – 4].

Результаты испытаний должны соответствовать показателям и значениям критериев, приведенным в таблице.

В настоящее время выполняется аттестация испытательного оборудования и согласование с Регистром. Начиная с IV квартала 2014 г. ФГУП «ЦНИИ КМ «Прометей» сможет выполнять квалификационные испытания на соответствие PSPC.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ISO 2811-1:1997. Краски и лаки. Определение плотности. Часть 1. Пикнометрический метод.

2. ISO 2811-2:1997. Краски и лаки. Определение плотности. Часть 2. Метод погруженного тела (метод отвеса).

3. ISO 2811-3:1997. Краски и лаки. Определение плотности. Часть 3. Осцилляционный метод.

4. ISO 2811-4:1997. Краски и лаки. Определение плотности. Часть 4. Метод с применением цилиндра под давлением.

| Критерий  | Допустимые показатели и значения критериев  |   |
|---|---|---|
|   | для эпоксидных систем   | для альтернативных систем   |
| Пузыри (степень вздутия)  | Не допускаются  | Не допускаются  |
| Коррозия (степень ржавления)  | Не допускается  | Не допускается  |
| Количество пор  | 0   | 0   |
| Адгезия при адгезионном характере отрыва                            | > 3,5 МПа<br>Адгезионный характер разрушения между подложкой и покрытием или между слоями покрытия на 60% площади или более | > 5 МПа<br>Адгезионный характер разрушения между подложкой и покрытием или между слоями покрытия на 60% площади или более |
| Адгезия при когезионном характере отрыва                            | > 3,0 МПа<br>Когезионное разрушение на 40% площади или более  | > 5 МПа<br>Когезионное разрушение на 40% площади или более  |
| Плотность тока катодной защиты, рассчитанная исходя из потери массы | < 5 мА/м <sup>2</sup>   | < 5 мА/м <sup>2</sup>   |
| Отслаивание покрытия вокруг искусственного круглого выреза          | < 8 мм  | < 5 мм  |
| Распространение коррозии от надреза                                 | < 8 мм  | < 5 мм  |
| Дефекты U-образной планки   | Любые дефекты, трещины или отслоения на углах или сварных швах недопустимы  | Любые дефекты, трещины или отслоения на углах или сварных швах недопустимы  |



#### ОБОЗРЕНИЕ: НОВЫЕ НОРМАТИВНЫЕ ДОКУМЕНТЫ РС

##### Вышли в свет:

Правила классификации и постройки морских судов, 2015, в 3 томах (на русском и английском языках);

Правила по оборудованию морских судов. Правила по грузоподъемным устройствам морских судов.

Правила о грузовой марке морских судов, 2015 (на русском и английском языках);

##### Готовятся к изданию:

Правила классификационных освидетельствований судов в эксплуатации, 2015 (на русском и английском языках);

Руководство по техническому наблюдению за судами в эксплуатации с Приложениями, 2015 (на русском и английском языках).



## МЕХАНИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ДВИЖИТЕЛИ

**А.А. Сергеев**

**М.Ю. Иванов**

**А.В. Серов**

канд. техн. наук

**Д.С. Семионичев**

канд. техн. наук

ФАУ «Российский морской  
регистр судоходства»



## ОСОБЕННОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ГРЕБНЫХ ВИНТОВ СОВРЕМЕННЫХ СУДОВ ЛЕДОВОГО ПЛАВАНИЯ И РАЗВИТИЕ ПРАВИЛ РЕГИСТРА

Одна из главных задач постройки современных арктических транспортных и ледокольных судов – обеспечение безаварийной эксплуатации в ледовых условиях винторулевого комплекса. Надежность винторулевого комплекса ледоколов и судов активного ледового плавания является одним из основных факторов, который определяет их экономическую эффективность, а во многих случаях и безопасность эксплуатации. Например, поломка гребного винта ледокола в процессе проводки каравана приводит к большим временным и материальным потерям.

При эксплуатации транспортных арктических судов в ледовых условиях гребные винты взаимодействуют со льдом. Лед представляет собой чрезвычайно прочную среду, в связи с чем силы и моменты, возникающие на гребных винтах при взаимодействии лопастей со льдом, существенно отличаются от соответствующих величин, наблюдаемых при работе судна на чистой воде. Для арктических ледоколов ледовые силы и моменты на гребных винтах могут быть в 2 – 3 раза выше, чем соответствующие гидродинамические. Поэтому научно обоснованный подход к оценке надежности ледокольных гребных винтов и разработка их норм прочности обуславливают в первую

очередь необходимость учета реальных эксплуатационных ледовых нагрузок. При этом оценка прочных размеров гребных винтов должна осуществляться на основе обоснованной гипотезы статической или усталостной прочности. Корректное определение эксплуатационных ледовых нагрузок и, соответственно, разработка обоснованных норм прочности невозможны без учета реальных физических процессов, происходящих при взаимодействии лопастей со льдом.

В данной статье сделан обзор режимов взаимодействия со льдом гребных винтов судов арктического плавания, которые были определены в ходе выполнения работ по Федеральной целевой программе «Развитие гражданской морской техники» на 2009 – 2016 годы и при совершенствовании требований части VII «Механические установки» Правил классификации и постройки морских судов Регистра [1].

Выбор режима взаимодействия гребного винта со льдом является определяющим методологическим моментом для корректного построения расчетной схемы назначения прочных размеров элементов пропульсивного комплекса из условия обеспечения усталостной и статической прочности.

Схемы взаимодействия гребного винта со льдом наиболее подробно рассмотрены в [2 – 8].

Режимы движения ледоколов и судов ледового плавания во льдах отличаются большим разнообразием, поэтому для теоретического и экспериментального их изучения вводятся так называемые «эталонные» ледовые условия, в которых реализуются наиболее характерные черты протекающих при этом процессов.

Результаты натурных и модельных экспериментов показывают, что попадание обломков ледяного покрова под корпус судна и, следовательно, к движителям происходит в следующих ситуациях:

- при движении судна в сплошных ровных льдах;
- при движении в мелкобитых льдах и отсутствии ледовых сжатий;
- при преодолении торосистых перемычек.

Другие ледовые условия, в которых может осуществляться движение судов, с точки зрения взаимодействия движителей со льдом могут быть сведены к указанным выше «эталонным» условиям.

При рассмотрении «эталонных» условий необходимо учитывать характер движения судна, а именно движется ли судно передним или задним ходом.

Из рассмотрения физических процессов при взаимодействии лопасти гребного винта со льдом можно выделить три возможных режима:

- отбрасывание льдин лопастью;
- фрезерование лопастью ледовых блоков;
- разрушение льдин лопастью.

В настоящее время при определении ледовых нагрузок на движитель в качестве основного и наиболее опасного для прочности лопасти рассматривается режим фрезерования.

При рассмотрении режимов взаимодействия лопасти со льдом необходимо иметь ответы (по крайней мере, оценочные) на следующие вопросы:

- при каких условиях лопасти фрезеруют кусок льда, а в каких отбрасывают;
- при каких условиях происходит разрушение куска льда от взаимодействия с лопастью;

- какая глубина врезания лопасти в лед может реализовываться в зависимости от толщины и от геометрических характеристик льда.

Следует отметить, что при любом из перечисленных выше процессов частично происходит фрезерование, то есть внедрение части лопасти в лед. Обычно под процессом фрезерования при определении ледовых нагрузок понимают относительно длительный процесс взаимодействия движителя со льдом. При этом

можно выделить два характерных режима взаимодействия лопасти с куском льда: взаимодействие концевой кромкой лопасти и взаимодействие входящей кромкой.

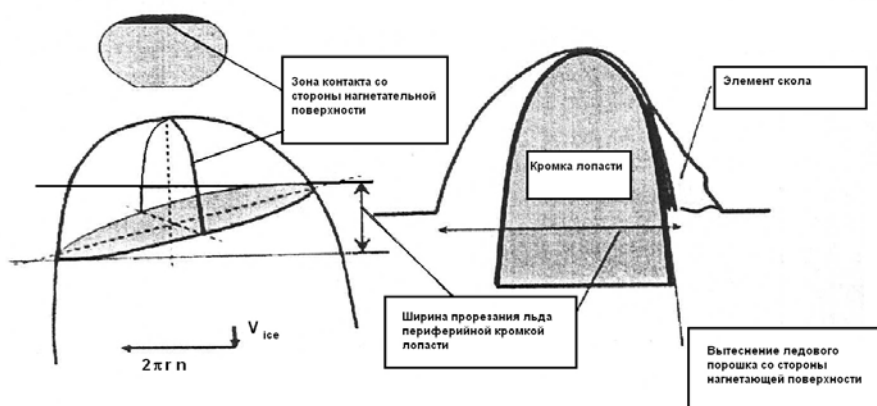
Угол атаки лопасти гребного винта  $\alpha(r)$  на радиусе  $r$  является основным параметром, определяющим режимы его взаимодействия со льдом. В свою очередь, угол атаки определяется аксиальной скоростью взаимодействия гребного винта со льдом и угловой скоростью вращения на радиусе  $r$ . В зависимости от указанных параметров реализуются различные схемы взаимодействия лопасти гребного винта со льдом, которые представлены ниже.

При положительных углах атаки  $\alpha(r) > 0$  входящая кромка лопасти или ее периферийные (верхние) сечения врезаются в лед, при малой массе льдины последняя отбрасывается лопастями гребного винта или раскалывается (рисунок). Большие обломки льда не могут быть отброшены. В этом случае входящая кромка или периферийные сечения прорезают или фрезеруют льдину.

Согласно анализу результатов натурных испытаний [9, 10] для такого типа фрезерования льда ледовая нагрузка (давление) приложена к кромке лопасти в основном со стороны засасывающей поверхности, что приводит к воздействию на лопасть отрицательной ледовой силы  $F_{ice}^-$ , направленной в сторону, противоположную движению судна, и приложенной приблизительно на относительном радиусе 0,8.

При действии кромочной отрицательной силы  $F_{ice}^-$  одновременно возникают изгибающий  $Q_{bend}$  и скручивающий  $Q_{spind}$  лопасть ледовые моменты, совместное действие которых приводит к тому, что наибольшие растягивающие напряжения возникают впереди от центра корневого сечения на засасывающей стороне лопасти.

Фрезерование льда периферийными сечениями лопасти характерно для больших углов атаки лопасти гребного винта в сравнении с режимом фрезерования



Процесс прорезания льда периферийной частью лопасти

$V_{ice}$  – аксиальная скорость взаимодействия гребного винта со льдом;  
 $2\pi n$  – угловая скорость цилиндрического сечения гребного винта на радиусе  $r$ ;  
 $n$  – частота вращения гребного винта

льда входящей кромкой гребного винта и становится преобладающим для относительно легких ледовых условий (когда характерная толщина льда значительно меньше длины лопасти гребного винта).

Этот тип фрезерования принимается в качестве одного из основных режимов для назначения прочных размеров периферийных сечений лопастей. Воздействие ледового давления на периферийные сечения лопасти со стороны нагнетающей поверхности определяет их прочные размеры. Совместное действие ледовой нагрузки с гидродинамическим упором является определяющим для назначения прочных размеров лопастей гребных винтов в легких ледовых условиях (когда характерная толщина льда значительно меньше длины лопасти гребного винта).

Более подробно процессы разрушения льда на режимах фрезерования кромками и периферийными сечениями лопасти рассмотрены в работах [2 – 7, 11].

При проектировании лопастей гребных винтов необходимо также по возможности учитывать нерасчетные режимы взаимодействия гребного винта со льдом, которые являются чрезвычайно опасными. Например, режим реверса, когда направление движения судна не соответствует направлению вращения гребного винта и возможен прямой удар обломка льдины о поверхность лопасти, а при движении судна с остановленными гребными винтами может произойти навал льда на лопасть. При эксплуатации в ледовых условиях реверсирование гребных винтов должно осуществляться крайне осторожно для снижения частоты возникновения этих режимов взаимодействия.

Один из нерасчетных режимов возникает также при заклинке гребного винта в процессе взаимодействия со льдом, что требует корректного и обоснованного назначения пропульсивной мощности и величины момента главного двигателя для обеспечения его работоспособности в ледовых условиях, то есть для поддержания скорости вращения гребного винта, тяговых характеристик пропульсивного комплекса и предотвращения остановки гребного винта с последующим его повреждением. Эксплуатационные рекомендации разрабатываются в рамках ледового сертификата в виде допустимых скоростей движения судна, ограничивающих зону его безопасной эксплуатации [8].

Несмотря на принимаемые проектантом меры, нельзя полностью сбрасывать со счета вероятность возникновения вышеупомянутых нерасчетных случаев взаимодействия гребного винта со льдом. При возникновении этой ситуации должен реализоваться принцип «селективной» прочности, заложенный в Правилах классификации и постройки морских судов Регистра. Согласно этому принципу, при возникновении сверхкритической нерасчетной нагрузки при поломке лопасти все остальные элементы валопровода должны оставаться неповрежденными [1].

По результатам выполнения работ по Федеральной целевой программе «Развитие гражданской морской техники» на 2009 – 2016 годы была решена задача по нормированию прочных размеров гребных винтов с относительным радиусом ступицы более 0,35r, уточнены требования к выбору коэффициентов, учитывающих влияние ледовых нагрузок на лопасти для судов с категориями ледовых усилений **Arc8** и **Arc9**, дополнены требования к величине минимальной требуемой мощности пропульсивных установок судов неарктических категорий и создан проект рекомендаций по использованию методов конечных элементов при расчете прочности лопастей гребных винтов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила классификации и постройки морских судов. – СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2014.
2. Belijashov V.A. Method for calculating ice loads encountered by propeller blades // The 12th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC-93). – Hamburg. – 1993, August 17 – 20. – Proceedings. – Volume 2. – p. 359 – 368.
3. Беляшов В.А., Шпаков В.С. О механике разрушения льда лопастями гребных винтов // Механика и физика льда. – М.: Наука, 1983. – С. 21 – 29.
4. Soininen H. A propeller-ice contact model. Dissertation for the degree of Doctor of Technology // VTT technical research centre of Finland. – Espoo, 1988. – 116 p.
5. Veitch B. Prediction of ice contact forces on a marine screw propeller during the propeller-ice cutting process. Dissertation for the degree of Doctor of Technology // Helsinki, Acta Polytechnica Scandinavia. Mechanical engineering Series. – 1995. – № 118. – 140 p.
6. Soininen H., Veitch B. Propeller-ice interaction. Joint research project arrangement № 6 (JPRA № 6), Joint conclusion report // Finland, VTT Technical Research Centre of Finland. – Espoo. – VTT Research Notes № 1762. – 1996. – 31 p.
7. Koskinen P., Jussila M., Soininen H. Propeller ice loads models // Finland. – VTT Technical research centre of Finland. – Espoo. – VTT Research Notes № 1739. – 1996. – 82 p.
8. Пересыпкин В., Цой Л., Шурпак В. Международный полярный кодекс: российские предложения // Морской флот. – 2012. – № 4. – С. 12 – 19.
9. Koskinen P., Jussila M. Long term measurements of ice loads on propeller blade of M/S Gudingen // Finland. – Espoo. – VTT Technical Research Centre of Finland. – VTT Research Notes 1260. – SF – 02150. – 46 p.
10. Jussila M., Koskinen P. Ice loads on CP-propeller and propeller shaft of small ferry and their statistical distributions during winter 87 // Eight International Con-

ference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. – 1989, March 19 – 23. – Proceedings. – P. 351 – 358.

11. Современные методы обработки пропульсивных комплексов судов ледового плавания. Ледовые

нагрузки / В. И. Евенко, А. А. Сергеев, А. В. Андришин [и др.] // Научн.-техн. сб. – Российский морской регистр судоходства, 2009. – № 32. – С. 182 – 204.



**В.А. Шишкин**

д-р техн. наук, проф.,  
ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова



**В.К. Шурпяк**

канд. техн. наук,  
ФАУ «Российский морской  
регистр судоходства»



**И.Ю. Кручинина**

д-р техн. наук, доц.,  
ФГБУН «Институт химии силикатов  
им. И.В. Гребенщикова» РАН (ИХС РАН)



**Институт химии силикатов**

## ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ ПЕРЕВОЗКАХ СПГ

**Р**ост глобальных энергетических потребностей промышленности и населения одновременно с необходимостью снижения его экологических последствий делает актуальным поиски принципиально новых технических решений, в том числе для современных и перспективных судов. Одним из направлений таких поисков является применение электрохимических генераторов (ЭХГ) на судах-газовозах. Это направление привлекательно принципиальной возможностью повышения как энергоэффективности и экологической безопасности таких судов, так и накопленного опыта проектирования и эксплуатации криогенной техники. Необходимо отметить, что публикации о разработках иностранными классификационными обществами технических требований к применению на судах ЭХГ подтверждают актуальность таких разработок и в Российском морском регистре судоходства.

В связи с приближением добычи нефти и газа к предельным уровням обеспеченности запасами с неизбежным ее снижением в дальнейшем, развитые страны предпринимают различные акции в целях гарантирования поставок нефти и газа на свои внутренние рынки. Происходит формирование новых мировых рынков энергоресурсов, в частности природного газа. Становление этого рынка связано с развитием инфраструктуры сжижения газа,

что обеспечит необходимую гибкость поставок, освобождая их от трубопроводных коммуникаций

Перспективы роста потребления природного газа в качестве бункерного топлива определяются более низкими ценами и экологическими преимуществами по сравнению с нефтяными топливами.

Следует отметить, что экологические требования ИМО существенно ужесточаются [1, 2]. Так, с 1 января 2015 г. в зонах Северного и Балтийского морей, а также пролива Ла-Манш максимальное содержание серы в топливе не должно превышать 0,1%. Чтобы снизить зависимость морского флота от нефти, Еврокомиссия призвала обеспечить до 2020 г. наличие в 139 морских портах ЕС газозаправочного оборудования для бункеровки судов, а во внутренних портах – до 2025 г. [3]. Постепенный перевод значительной части тоннажа судов на более экологичное топливо в перспективе представляется неизбежным. В последние годы в этом качестве все чаще используется сжиженный природный газ (СПГ) (Liquefied Natural Gas, LNG). Этому способствует ряд факторов.

Во-первых, уже в 2009 – 2011 гг. стоимость 1 млн БТЕ (Британских Термических Единиц), получаемых при сжигании СПГ, была на 40 – 60 % ниже стоимости тяжелых углеводородов, при сжигании которых высвобождается такое же количество энергии. При этом объемы вредных выбросов

значительно меньше:  $\text{CO}_2$  – примерно на 25%,  $\text{NO}_x$  – на 80 %, а  $\text{SO}_x$  и твердые частицы в выхлопных газах практически отсутствуют.

Во-вторых, уже сейчас трудно найти на рынке нефтяные топлива с содержанием серы до 0,1%, а быстрое увеличение их мирового производства потребует существенного увеличения затрат, как и гидроочистка топлив для снижения содержания серы до требуемых параметров.

В-третьих, оборудование судов скрубберами для очистки выхлопных газов от серы и двуокисей азота существенно увеличит капитальные и эксплуатационные расходы судовладельцев.

К 2020 г. ожидается, что в мире будет в эксплуатации около 1000 судов с двигателями, работающими на СПГ. Из них примерно 400 судов будут принадлежать европейским судовладельцам.

По оценкам Det Norske Veritas (DNV), мировой спрос на СПГ для бункеровки судов в 2020 г. составит от 4 до 7 млн т. В Европе этот спрос может быть на уровне 1,4 – 2,2 млн т. DNV полагает, что к 2030 г. примерно 45% судов мирового флота будут использовать СПГ в качестве топлива. К таким оценкам следует относиться с осторожностью, поскольку пока при использовании СПГ остается не решенным ряд проблем, таких, как обеспечение криогенного хранения сжиженного газа при температуре  $-163\text{ }^\circ\text{C}$ , соответствующая переподготовка судовой команды, уменьшение грузоподъемности судов по сравнению с бункеровками нефтяными топливами. В то же время при переоборудовании контейнеровозов под бункеровку СПГ теряется примерно только 3% слотов [3].

Оценивая перспективы применения бункерного СПГ для движения судов, необходимо заметить, что пока не рассматривается вопрос о выборе типа главного двигателя (ГД). Реальные возможности такого выбора традиционно ограничиваются паротурбинной, газотурбинной, парогазотурбинной или дизельной установкой.

К их достоинствам нужно отнести большой опыт проектирования, производства и эксплуатации, высокую надежность, а также возможность свободного использования как нефтяных, так и газовых топлив. Однако, при прочих равных условиях, решающим условием выбора ГД является его экологичность, экономичность и цена используемых топлив при условии обеспечения возможности использования как нефтяных, так и газовых топлив т.е. двухтопливности.

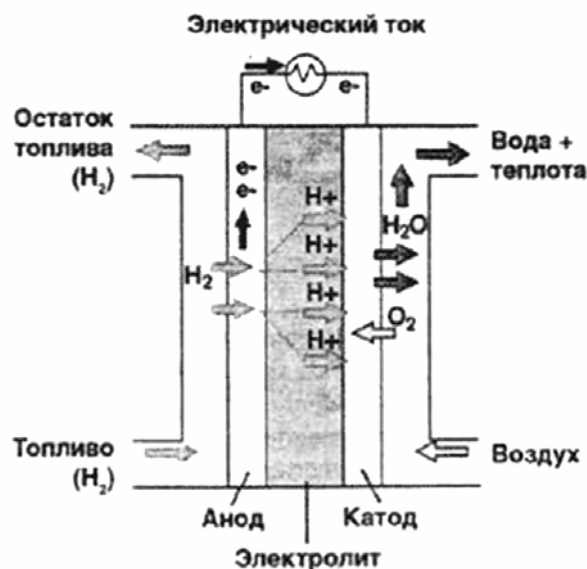
Что касается цены и качества топлив, то, применительно к морским судам, они мало отличаются друг от друга. Более существенны различия в экономичности между малооборотными дизелями, газотурбинными установками, парогазовыми турбинными установками и паротурбинными установками. Хотя эти различия в КПД и в экологических

показателях обычно не выходят за пределы 10 – 15%, наибольшее распространение в качестве ГД при использовании бункерного СПГ на судах получили двухтопливные малооборотные дизели.

Важной особенностью судов-газовозов является возможность использования испаряющегося при перевозке СПГ в качестве топлива для таких ГД.

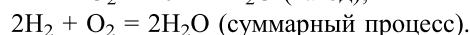
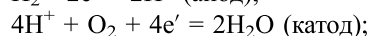
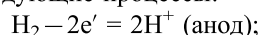
Однако помимо традиционных ГД в последние десятилетия все больше внимания привлекают к себе электрохимические генераторы (ЭХГ) электрического тока как батареи топливных элементов (ТЭ) с вспомогательными системами на водородных и других газовых топливах.

ТЭ является электрохимическим источником электрического тока (см. рисунок), в котором осуществляется процесс прямого превращения энергии топлива и окислителя, поступающих к электродам, непосредственно в электрическую энергию, минуя традиционные процессы горения топлива, сопровождающиеся большими потерями энергии [8].



Принцип действия ТЭ

На электродах водородно-воздушных ТЭ идут следующие процессы:



Большинство типов ТЭ работает на водороде, получаемом различными путями, но существуют прототипы, которые позволяют использовать непосредственно углеводороды, например метан, а также окись углерода.

Существует множество первичных ТЭ, принципиально различающихся составом электролита,

требованиями к рабочему агенту, параметрами процесса [4, 5].

К вторичным ТЭ относят ТЭ регенерирующего типа или обратимые ТЭ. Они используются в качестве источника восстановленного топлива, например:  $H_2$  и  $O_2$  (электролиз воды),  $Li$  и  $H_2$  (разложение  $LiH$  при температуре  $850\text{ }^\circ\text{C}$ ) и др. При этом обратимый ТЭ будет работать попеременно, то в режиме электролизёра, то в режиме ТЭ, а в системах с циклическим поступлением электроэнергии от возобновляемых источников (например, солнца или ветра) или от атомных электростанций (в провальные часы нагрузок) уменьшит размеры, вес системы и в значительной степени ее стоимость [9].

В качестве потенциально пригодных для применения на судах можно выделить ТЭ, которые приведены в таблице.

ТЭ типа PEMFC работают с эффективностью 40 – 60% при температурах 50 – 100  $^\circ\text{C}$ , используют ионообменную мембрану в качестве электролита, но требуют применения дорогостоящих платиновых катализаторов на аноде и катоде либо применения новых технологий, разработанных для снижения расхода платины [4, 5]. Съем мощности у этих ТЭ очень высокий (3,8 – 13,5 кВт/кв. м). В связи с низкими рабочими температурами требуется установка дополнительного внешнего устройства для реформинга углеводородов, что увеличивает стоимость установки. ТЭ типа PEMFC устойчиво работают в переменных

режимах нагрузки и имеют короткий срок выхода в рабочее состояние (1 – 3 с) [7]. Эти свойства ТЭ типа PEMFC делают их популярными для использования в транспортных средствах, хотя стоимость двигателя на базе этих ТЭ пока остается высокой.

ТЭ на основе карбонатов типа MCFC работают при 600 – 700  $^\circ\text{C}$ . Такие рабочие температуры позволяют использовать топливо непосредственно в самой ячейке, без использования отдельного реформера.

Этот процесс получил название «внутренний реформинг». Он позволяет значительно упростить конструкцию ТЭ. ТЭ на основе расплавленного карбоната требуют значительного времени запуска и не позволяют оперативно регулировать выходную мощность, поэтому основная область их применения – крупные стационарные источники тепловой и электрической энергии [4, 7]. Нарботка в университете Магдебурга так называемого «горячего модуля» компании MTU уже превысила 30000 ч эксплуатации.

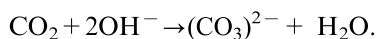
Как видно из таблицы, КПД топливных элементов PAFC составляет 40 – 50%. Тем не менее, поскольку эти ТЭ элементы работают при достаточно высокой температуре, то имеется возможность использовать пар, образующийся в результате работы. В этом случае общий КПД может достигать 80%. Для производства энергии водородсодержащее сырье необходимо так же, как и для PEMFC, преобразовать в чистый водород в процессе реформинга.

Основные типы и параметры топливных элементов

| Тип ТЭ (FC)                            | Рабочая температура, $^\circ\text{C}$ | Электролит               | Топливо  | Основные характеристики   | КПД, %  | Потребители                                    |
|--|---------------------------------------|--------------------------|--|---|---------|--|
| ТЭ с протонообменной мембраной (PEMFC) | Ниже 100                              | Полимерная мембрана      | Водород, метан, метанол, бензин                      | Мощность от 1 Вт до 250 кВт, стоимость 1100 – 4000 долл./кВт                                | 40 – 60 | Автомобили, портативные устройства             |
| Твердоокисидные ТЭ (SOFC)              | 500 – 1000                            | Смесь оксидов            | Водород, углекислый газ, метан                       | Мощность от 200 кВт до 400 МВт, требует постоянной нагрузки; стоимость 700 – 2000 долл./кВт | 50 – 65 | Стационарные системы электро- и теплоснабжения |
| ТЭ на основе карбонатов (MCFC)         | 600 – 700                             | Карбонат лития или калия | Водород, окись углерода                              | Мощность от 2 до 400 МВт, требует постоянной нагрузки; стоимость 600 – 1000 долл./кВт       | 50 – 60 | Стационарные системы электро- и теплоснабжения |
| ТЭ на основе фосфорной кислоты (PAFC)  | 160 – 210                             | Фосфорная кислота        | Водород; содержание окиси углерода и серы до 1 – 2 % | Мощность от 50 кВт до 400 МВт, стоимость 1000 – 3000 долл./кВт                              | 40 – 50 | Электроснабжение, автобусы                     |
| Щелочной ТЭ (AFC)                      | 50 – 300                              | Раствор гидроксида калия | Водород  | Мощность от 50 до 100 кВт   | 45 – 60 | Космическая техника, подводный флот            |
| Метанольный ТЭ (DMFC)                  | 60 – 130                              | Полимерная мембрана      | Жидкий метанол                                       | Мощность менее 10 кВт   | 40 – 55 | Компьютеры, приборы, телефоны                  |

Например, если в качестве топлива используется бензин, то необходимо удалить серосодержащие соединения, поскольку сера может вывести из строя платиновый катализатор, что соответственно увеличивает стоимость ТЭ [8, 9].

В щелочных ТЭ в качестве электролита используется концентрированная (85% вес) щелочь калия (KOH) – при высоких рабочих температурах (выше 250 °С), и менее концентрированная (35 — 50% вес) KOH – при низких температурах. Последние разработанные системы могут работать при температурах ниже 100 °С. Восстановление кислорода в щелочной среде происходит намного быстрее, чем в кислотной среде, как в ТЭ PEMFC. Таким образом, становится возможным использовать, в дополнение к катализаторам из благородных металлов, другие электрокатализаторы, например, Ni, Ag, оксиды металлов, шпинели. Недорогие катализаторы, такие как никель и серебро фирмы Raney, были исследованы на ранних стадиях разработок ТЭ типа AFC. В качестве топлива может использоваться только чистый водород и в качестве окислителя – чистый кислород. Моноксид углерода отравляет катализатор, двуокись углерода реагирует с электролитом (KOH) с образованием  $K_2CO_3$  (твердая соль), изменяя таким образом состав электролита. Даже малые количества  $CO_2$  в воздухе приводят к повреждению щелочного ТЭ. В этом случае образуются карбонаты в соответствии со следующей реакцией:



В последнее время интерес к щелочным ТЭ значительно снизился. Практические проблемы экономически эффективного удаления  $CO_2$  в воздухе, поставляемом на катод, ограничивают использование щелочных ТЭ в самолетах и подводных лодках.

Британская компания Zetek на протяжении некоторого времени занималась разработками по применению щелочных ТЭ в автомобилях. В 2002 г. эти разработки приостановлены из-за недостатка в финансировании [10].

Принципиальная разница между водородным и метанольными (DMFC) ТЭ заключается в применяемом катализаторе. Катализатор в метанольном ТЭ позволяет отрывать протоны непосредственно от молекулы спирта. Таким образом, решается вопрос с топливом: метиловый спирт массово производится для химической промышленности, его легко хранить и транспортировать, а для зарядки метанольного ТЭ достаточно просто заменить картридж с топливом. Правда, есть один значительный минус – метанол токсичен. К тому же эффективность метанольного ТЭ значительно ниже, чем у водородного [8].

Наиболее привлекательны с точки зрения неприхотливости используемых топлив и возможности применения когенерации – твердооксидные ТЭ (SOFC),

функционирующие при высокой температуре (от 800 до 1000 °С). Они характеризуются высоким коэффициентом стойкости к примесям в газах и позволяют использовать не только водород, но и природный газ (в составе газовой смеси на долю метана приходится 70 – 98%) и, соответственно, чистый метан и углекислый газ. Но самое важное, что при этом они являются высокоэффективными генераторами электрической и тепловой энергии с суммарным коэффициентом ее использования 80% и более [4, 11]. Недостатки этого типа ТЭ – неустойчивость работы на переменных режимах нагрузки и длительный срок вывода на рабочий режим, стабильные характеристики керамических электродов [12], что требует дальнейших исследовательских разработок.

Для улучшения маневренности ТЭ типа SOFC весьма перспективным представляется использование современных электрохимических аккумуляторов и суперконденсаторов на основе когенерации. В этом случае можно ожидать более широкого применения винторулевых колонок (ВРК) "Azipod" .

Интерес к ТЭ определяется теми потенциальными преимуществами, которые они имеют перед традиционными энергетическими технологиями. Это:

- экологическая чистота и надежность, способность работать как в централизованных, так и в децентрализованных системах энергоснабжения, обеспечивая потребителей электроэнергией и теплом;
- большое разнообразие способов получения основного реагента (водорода) на основе как органических топлив, так и без углеродных технологий (ядерной энергии и возобновляемых источников энергии);
- возможность использования различных типов топлив: метан и другие углеводороды, окись углерода, спирты;
- высокая эффективность процесса преобразования топлива в электроэнергию;
- возможность организации теплоснабжения потребителей на базе утилизированного тепла;
- практическое отсутствие шума;
- низкая рабочая температура и быстрый старт некоторых типов ТЭ (например, PEMFC), что делает их весьма перспективными для использования в качестве чистого источника энергии для транспортных средств, особенно учитывая значительное увеличение КПД двигателя [3].

По экологическим показателям ТЭ оказываются во много раз более привлекательными, чем их конкуренты. Также необходимо отметить, что, на судах-газовозах в случае использования ТЭ требуется минимум затрат на оборудование топливной и бункеровочной систем.

Можно считать, что технологические и конструктивные проблемы использования природного газа



в судовых энергетических установках с двухтопливными дизелями, а также с паровыми и газовыми турбинами, уже имеют надежное решение.

В то же время, по мнению специалистов в области экономики и менеджмента, для того, чтобы ТЭ получили массовое применение на рынке децентрализованных стационарных систем энергоснабжения, их стоимость должна быть снижена в перспективе, по меньшей мере, до 100 долл./кВт. Вместе с тем, учитывая, что по экологическим показателям ТЭ оказывается во много раз более привлекательным, чем его конкуренты, а на судах-газовозах сводятся к минимуму затраты на оборудование топливной и бункеровочной систем, эти экономические оценки должны быть уточнены.

Применение ТЭ на судах, как и внедрение любого другого вида новой техники, требует анализа опасностей, возникающих при этом с учетом особенностей оборудования и условий размещения на судне. При этом должны быть рассмотрены, как минимум, новые опасности, связанные:

- с хранением на судне и использованием первичного топлива;
- с получением и использованием водорода из первичного топлива и хранением его на судне (если такое предусмотрено);
- с утилизацией (при необходимости) остатков первичного топлива после его конвертации;
- с использованием опасных веществ, применяющихся при реализации рабочего процесса.

На первый взгляд может показаться, что некоторые опасности, связанные с хранением и использованием газового топлива, являются такими же, как для обычной дизельной установки, использующей в качестве топлива газ. Но это не так. Например, рабочая температура, при которой проходит реакция в ТЭ, может достигать 1000 °С. Последнее говорит о значительно более тяжелых последствиях утечки газового топлива на судне в машинное отделение, где располагаются ТЭ.

Как было показано при анализе состава и свойств ТЭ различных типов, наиболее приемлемыми ТЭ для судов-газовозов являются ТЭ типа SOFC и PEMFC – как источник быстрого старта и маневрирования. При этом требуется дальнейшая доработка твердоокисных ТЭ (SOFC), необходимая для надежного и эффективного функционирования судов этого класса.

Таким образом, требования к рассмотренным техническим характеристикам твердоокисных ТЭ могли бы сводиться к общему требованию о необходимости их соответствия правилам Регистра, но в его правилах пока таких требований нет. Для их наличия можно, в первом приближении, предложить, чтобы они содержали и обеспечивали следующее:

1. Требования к номинальной мощности ЭУ  $P_{eNOM}$ , обеспечивающей полный ход судна и выпол-

нение требований Регистра для соответствующих ледового класса и уровня ледопроеходимости при эксплуатации в суровых условиях Арктики. Кроме того, должна быть предусмотрена возможность развивать максимальную мощность  $P_{eMAX} = 110\% P_{eNOM}$  в течение не менее часа, как это требуется правилами Регистра для судов с установками другого типа. Исполнение этих требований может быть обеспечено за счет освоения серийного производства ТЭ типа SOFC – установок и модульного масштабируемого монтажа для комплектации необходимого ЭХГ из унифицированных ТЭ.

2. Требования к Маневренным качествам СЭУ (быстрый пуск, быстрый реверс и возможность быстрого изменения режима работы). Выполнение таких требований может быть реализовано в результате применения, параллельно с высокоэкономичными ТЭ типа SOFC с КПД до 80% и выше в когенеративном режиме, ТЭ типа PEMFC, которые устойчиво работают в переменных режимах нагрузки и имеют короткий срок выхода в рабочее состояние (1 – 3 с). Для реализации пусков, реверсов и переменных ходов возможно применение буферных аккумуляторных батарей и суперконденсаторов.

3. Питание судна электроэнергией в соответствии с его проектной документацией и требованиями Регистра при высоких показателях энергоэффективности судна в соответствии с требованиями МК МАРПОЛ 73/78 (может быть обеспечено за счет применения высокоэкономичных ТЭ типа SOFC с КПД до 80% и выше при работе на СПГ совместно с буферными аккумуляторными батареями или ТЭ типа PEMFC).

4. Экологические показатели судна и его оборудования в соответствии с правилами Регистра и требованиями МК МАРПОЛ 73/78 – за счет снижения выбросов SO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> в результате применения экологических видов первичных топлив (СПГ, метанол) и более экономичного их использования в ТЭ.

5. Заданный уровень надежности судна и его технических средств за счет применения модульного монтажа ячеек ТЭ, подразумевающего возможность их многократного резервирования и применение автоматизированных систем диагностики, а также за счет широкого использования электрооборудования в системах управления маневрированием судна с применением ВРК "Azipod" и подруливающих устройств.

## ВЫВОДЫ

С учетом современных тенденций, можно сделать вывод о высокой вероятности применения ТЭ на судах в ближайшие десятилетия, что требует своевременной подготовки.

Для сокращения времени экспериментально-наладочных работ при отработке конструкции и технологии применения ТЭ было бы рационально использовать постепенный переход от лабораторных испытаний к натурным при параллельной работе дизель-генераторов с ЭХГ на различных режимах в судовых условиях.

При этом в первую очередь необходима разработка требований Регистра к судовым энергетическим установкам с ТЭ на основе:

- анализа существующих требований по применению ТЭ на судах;
- идентификации опасностей и оценки риска;
- опыта применения ТЭ в других областях энергетики и транспорта.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. MEPC 59/4/7/ Second IMO GHG Study 2009. – IMO, London, UK, April 2009.

2. ИМО ужесточает экологические требования для новых судов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www.minregion.ru/uploads/attachment/documents/.../200313\\_2.doc](http://www.minregion.ru/uploads/attachment/documents/.../200313_2.doc)

3. Шевченко М. Дешево и экологично: газовое будущее бункеровки // Порты Украины. – 2013. – № 06 (128).

4. Мошников В.А., Шилова О.А. Золь-гель наноконпозиты – перспективные материалы для мембран и каталитических слоев топливных элементов / Основы водородной энергетики; под ред. В.А. Мошникова и Е.И. Терукова. 2-е изд. – СПб.: Изд-во СПб ГЭТУ «ЛЭТИ», 2011, 288 с.

5. Tsvetkova I.N., Shilova O.A., Voronkov M.G., Gomza Yu.P., Sukhoy K.M. Sol-gel synthesis and investigation of proton-conducting hybrid organic-inorganic silicophosphate materials (2008) *Glass Physics and Chemistry*, 34 (1), pp. 68 – 76.

6. Development of the techniligt for preparing and storing hydrogen with the use of nanostructured materials for an autonomous integrated wind power plant. / Ya. B. Danilevich, V.A. Zhabrev, V.D. Goncharov, I.Yu. Kruchinina, B.N. Mironov, I.N. Tsvetkova, T.V. Khamova, O.A. Shilova / *МАИК Наука / Interperiodica distributed exclusively by Springer Science+Business Media LLC*. ISSN 1087 – 6596 (print) 1608 – 313X (Online) DOI 10.1134/S1087659609050071 / – PP. 491 – 503.

7. Синяк Ю. В. Перспективы применения водорода в системах децентрализованного электро- и теплоснабжения // *Проблемы прогнозирования*. – 2007. – № 3. – С. 42 – 61.

8. Бродач М.М., Шилкин Н.В. Использование топливных элементов для энергоснабжения зданий. Часть 1 // *АВОК*. – 2004. – № 2 / *Энергосбережение [Электронный ресурс]*. – Режим доступа: [http://www.abok.ru/for\\_spec/articles.php?nid=2340](http://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=2340).

9. Бродач М.М., Шилкин Н.В. Использование топливных элементов для энергоснабжения зданий. Часть 2 // *АВОК*. – 2004. – № 3 / *Энергосбережение [Электронный ресурс]*. – Режим доступа: [http://www.abok.ru/for\\_spec/articles.php?nid=2404&version=print](http://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=2404&version=print).

10. Что такое топливные элементы? [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://electrik.info/main/news/599-chto-takoe-toplivnyue-elementy.html>.

11. Исследования электрокаталитических композиций для обратимого электрохимического элемента с твердым полимерным электролитом // К.А. Джусь, В.Н. Кулешов, Е.А. Серегина, С.А. Григорьев / *ФГУ «Российский научный центр «Курчатовский институт»*, – М.: Россия.

12. Arsent'ev M.Yu., Tikhonov, P.A., Kalinina M.V. Physicochemical Properties of Nanocrystalline Composites Based on ZrO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, and Rare-Earth Oxides // *GLASS PHYSICS AND CHEMISTRY*, 2011, Vol. 37, Iss. 4, pp. 450 – 458.

13. Московский энергетический институт (технический университет). [Электронный ресурс]. – Режим доступа: e-mail: S. [http://h2forum2008.ru/docs/pdf/abstracts/5\\_6\\_02.pdf](http://h2forum2008.ru/docs/pdf/abstracts/5_6_02.pdf).



**В.К. Шурпяк**

канд. техн. наук,  
ФАУ «Российский морской  
регистр судоходства»



## УЧЕТ ОСОБЕННОСТЕЙ СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ ПРИ ОЦЕНКЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ СУДОВ

В свете жестких требований, принятых Международной морской организацией (ИМО) по повышению энергетической эффективности на судах, существенно повышается актуальность вопросов энергосбережения и повышения коэффициента полезного действия энергетических установок (ЭУ) судов. Среди способов повышения Конструктивного Коэффициента Энергетической Эффективности (ККЭЭ) ИМО предлагает судовладельцам ряд мер по экономии топлива на борту судна, некоторые из которых трудно-выполнимы в силу достижения высокой энергетической эффективности в предыдущие годы (например, за счет повышения КПД главного двигателя), а некоторые представляются довольно экзотическими.

В настоящее время ИМО рассматривает [1] следующие способы повышения ККЭЭ:

1) увеличение транспортной работы путем:

- уменьшения эксплуатационной скорости судна с одновременным уменьшением потребляемой мощности,
- увеличения грузоподъемности за счет снижения веса корпуса и уменьшения балласта;

2) уменьшение выбросов  $\text{CO}_2$  главным двигателем (ГД) за счет:

- уменьшения требуемой мощности ГД путем уменьшения сопротивления корпуса и повышения эффективности гребного винта,
- уменьшения удельного расхода топлива ГД (повышение КПД),
- применения для ГД топлива с меньшим содержанием углерода;

3) уменьшение выбросов  $\text{CO}_2$  вспомогательным двигателем (ВД) на ходу судна посредством:

- уменьшения требуемой мощности,
- уменьшения удельного расхода топлива ВД (повышение КПД),
- применения для ВД топлива с меньшим содержанием углерода;

4) уменьшение выбросов  $\text{CO}_2$  путем выработки электроэнергии за счет инновационных технологий (ветрогенераторы, солнечные батареи, водородная энергетика);

5) уменьшение выбросов  $\text{CO}_2$  путем обеспечения хода судна за счет инновационных технологий с использованием:

- паруса (классический парус, жесткий парус или парус – воздушный змей),
- роторов Флетнера,
- солнечной энергетика, ветрогенераторов, водородной энергетика с гребным электродвигателем.

При всей широте охвата способов экономии топлива, методика ИМО не учитывает одну из современных тенденций развития конструкций судов и систем охлаждения в частности – отказ от принудительной прокачки забортной воды охлаждения ГД в пользу естественной циркуляции или самопротока. Таким образом, одним из способов энергосбережения на ходу судна в настоящее время является уменьшение потребления системой охлаждения ГД и ВД.

Кратко технический смысл этого заключается в следующем. При проектировании и строительстве судов верфи и судовладельцы отказываются от применения двухконтурных систем охлаждения, используя в качестве альтернативы системы забортной воды либо расположенные в кингстонных ящиках охладители пресной воды, либо корпусные конструкции двойного борта и двойного дна, охлаждаемые непосредственно забортной водой. Впервые системы с забортными охладителями появились на судах в 40-х годах прошлого века. С тех пор область их применения непрерывно расширяется, как по типам и назначению таких судов, так и по мощности ГД. В настоящее время такие системы находят все более широкое применение на вновь строящихся судах, хотя некоторые судовладельцы все еще относятся к ним настороженно. Среди проектов судов, представляемых для рассмотрения в Главное управление Регистра, приблизительно в одной трети используется система с забортными или килевыми охладителями. Типовая схема такой системы охлаждения ГД с одним забортным охладителем и двумя навешенными насосами охлаждения представлена на рис. 1, схема расположения охладителя – на рис. 2.

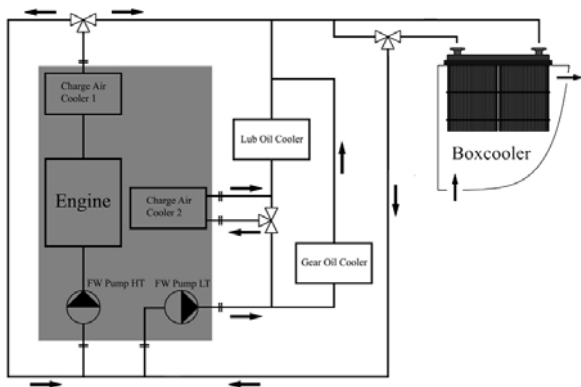


Рис. 1 Типовая схема системы охлаждения ГД с одним забортным охладителем и двумя навешенными насосами охлаждения

Надо сказать, что правила Регистра для судов с одним ГД требуют наличие на судне второго резервного охладителя, который для упрощения на рис. 1 не показан. Также на рисунке не показаны резервные насосы охлаждения, которые имеют электропривод, но на ходу судна не используются и поэтому при расчете энергоэффективности их мощность учитываться не должна. Плюсы и минусы таких систем с точки зрения обеспечения безопасности были ранее проанализированы в [2].

При такой схеме существенно уменьшается потребление электроэнергии в процессе эксплуатации судна, так как исключаются затраты на работу насосов охлаждения забортной водой. Для среднетоннажного судна мощность привода насоса охлаждения забортной водой составляет 15 — 20 кВт. Если учесть, что для

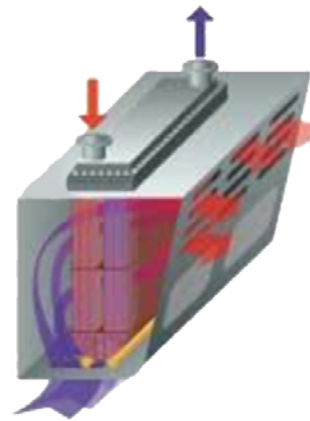


Рис. 2 Схема расположения охладителя в кингстонном ящике (по материалам фирмы BLOKSMA)

привода насоса мощностью 15 кВт требуется приблизительно 3 л топлива в час, то можно подсчитать, что при отказе от работы на ходу судна от насосов охлаждения с электрическим приводом годовая экономия топлива для судна с коэффициентом ходового времени 0,5 составит 13 — 15 т.

Таким образом, одним из способов энергосбережения на ходу судна в настоящее время является уменьшение потребления системой охлаждения ГД и ВД. К сожалению, методика ИМО по расчету ККЭЭ судна не учитывает возможности такой существенной экономии топлива. Согласно Руководству по методу расчета EEDI (Energy Efficiency Design Index) для новых судов, вступившему в силу с 01.01.2013 (резолюция МЕРС.212(63) с поправками в резолюции МЕРС.224(64)) [3], необходимо пользоваться следующей формулой:

$$\left( \prod_{j=1}^n f_j \right) \left( \sum_{i=1}^{nME} P_{ME(i)} C_{FME(i)} SFC_{ME(i)} \right) + (P_{AE} C_{FAE} SFC_{AE}) + \left( \prod_{j=1}^n P_{PT(j)} - \sum_{i=1}^{neff} f_{eff(i)} P_{AEeff(i)} \right) C_{FAE} SFC_{AE} - \left( \sum_{i=1}^{neff} f_{eff(i)} P_{eff(i)} C_{FME} SFC_{ME} \right) \quad (1)$$

$$f_i \cdot f_c \cdot Capacity \cdot f_w \cdot V_{ref}$$

В числителе этой формулы присутствуют четыре составляющих, из которых:

- первая (выделена голубым) отражает расход топлива главной пропульсивной установкой;
- вторая (выделена коричневым) учитывает расход топлива на производство электроэнергии вспомогательными генераторами на ходу судна;
- третья (выделена зеленым) учитывает мощность, потребляемую валогенератором, и мощность, высвобождающуюся в результате применения на судне инновационных технологий для выработки электроэнергии на ходу судна (при наличии);
- четвертая (выделена серым) учитывает мощность инновационной технологии, использующуюся для приведения судна в движение (при наличии).

Таким образом в числителе формулы предусмотрен второй член, учитывающий расход топлива на производство электроэнергии на ходу судна, который представляет из себя произведение трех величин  $P_{AE} C_{FAE} SFC_{AE}$ , где  $SFC_{AE}$  — удельный расход топлива вспомогательным дизельгенератором,  $C_{FAE}$  — коэффициент пересчета топлива в  $CO_2$ , а  $P_{AE}$  представляет из себя коэффициент нагрузки электростанции на ходу судна и принимается равным  $0,05 P_{ME}$  (то есть равным 5% мощности ГД  $P_{ME}$ ).

Такая оценка представляется приблизительно, несколько завышенной и, главное, не учитывающей особенностей ЭУ. В частности, не принимается во внимание возможность снижения потребления электроэнергии на ходу судна за счет забортных

охлаждателей и использования навешенных насосов охлаждения, а значит, и нет стимула для экономии топлива за счет этого. Для определения величины экономии топлива и подготовки предложений по корректировке методики расчета ККЭЭ произведем оценку энергии, необходимой на привод насоса охлаждения заборной водой.

Для оценки количества энергии, необходимой для привода насоса охлаждения на ходу судна, были произведены простейшие теплотехнические расчеты для дизельных ЭУ. При этом для расчета сделаны следующие допущения:

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

2. Тепловыделение в систему охлаждения для судов с дизельной ЭУ равно 60% полезной мощности. Это допущения сделано после анализа теплового баланса некоторых судовых дизелей (результаты приведены в таблице) по данным [4 – 7]. При этом учитывалось, что кроме системы охлаждения теплота от работающего дизельного двигателя отводилась с уходящими газами (35 – 42% затраченной в цикле теплоты). Теплоотдача от нагретых поверхностей в машинном отделении не учитывалась. Данное значение приблизительно совпадает с данными ИМО по распределению тепловых потерь в современных дизельных установках для судов различного назначения. Во втором исследовании ИМО парниковых газов [1] даются следующие данные: для танкеров, балкеров, судов для генгруза и судов типа ро-ро с водой охлаждения отводится 54% тепла, выделяемого при сгорании топлива, для контейнеровозов – 51%. Учитывая, что данные ИМО относятся к более современным судам, примем для дальнейшего расчета цифру 54%.

3. Насосы системы охлаждения обычно имеют КПД в пределах 0,6 – 0,8, создавая требуемый напор в диапазоне 0,2 – 0,3 МПа. В результате расчета можно сделать следующий вывод: мощность привода насоса будет находится в диапазоне 0,01 – 0,02 мощности ГД, то есть 1 – 2%.

Для проверки правильности оценки привлечем данные, которые содержатся в [8]. В этом документе на основе обработки данных по 28 проектам судов, построенных для отечественного флота в период с 1981 по 1987 г., и их ЭУ предлагаются следующие значения расходования мощности электростанции на ходу судна:

- средняя мощность  $P_{AE}$ , потребляемая в ходовом режиме, для судов с малооборотным двигателем (МОД) типа МАН-Бурмейстер и Вайн и судов со среднеоборотным двигателем (СОД) при мощности ГД < 9 МВт составляет

Результаты анализа теплового баланса некоторых судовых дизелей по данным [4, 5]

| Фирма                           | Тип двигателя | Отношение теплоты, отводимой системой охлаждения, к теплоте, преобразованной в полезную работу |
|---------------------------------|---------------|--|
| «Зульцер»<br>(и лицензиаты)     | 8ДКРН 90/155  | 0,59   |
|                                 | 6ДКРН 76/155  | 0,66   |
|                                 | 9ДКРН 76/155  | 0,64   |
|                                 | 6ДКРН 90/190  | 0,58   |
|                                 | 6ДКРН 58/170  | 0,53   |
|                                 | 12ЧН 40/48    | 0,66   |
|                                 | 8SD72         | 0,54   |
|                                 | RD90          | 0,62   |
| MAN – «Б и В»<br>(и лицензиаты) | 8ДКРН 74/160  | 0,57   |
|                                 | 8ДКРН 84/180  | 0,58   |
|                                 | 6ДКРН 67/140  | 0,70   |
|                                 | 6ДКРН 67/170  | 0,66   |
|                                 | 6ДКРН 67/190  | 0,53   |
|                                 | 5ДКРН 74/160  | 0,62   |
|                                 | 14ЧН 52/55    | 0,67   |
|                                 | 3ДКРН 78/140  | 0,53   |
|                                 | G6L28/38      | 0,55   |
|                                 | 6ЧКН 30/45    | 0,49   |
| «Мицубиси»                      | ДКРН 58/108   | 0,69   |
|                                 | ДКРН 60/150   | 0,64   |
|                                 | 90VET52/65    | 0,51   |
| «Пилстик»                       | 12ЧН 40/46    | 0,65   |

0,046 мощности ГД  $P_{ME}$ , при мощности ГД > 9 МВт определяется по формуле

$$P_{AE} = 0,013 P_{ME} + 330, \text{ кВт}; \quad (2)$$

- средняя мощность  $P_{AE}$ , потребляемая в ходовом режиме, для судов с МОД типа Зульцер определяется по формуле

$$P_{AE} = 0,053 (P_{ME})^{0,8}, \text{ кВт}. \quad (3)$$

Относительное электропотребление на ходу судна в зависимости от мощности главного двигателя показано на рис. 3. Из рисунка видно, что предлагаемое ИМО значение энергопотребления на ходу судна приблизительно совпадает с оценкой в [8] для ГД с мощностью до 10 МВт.

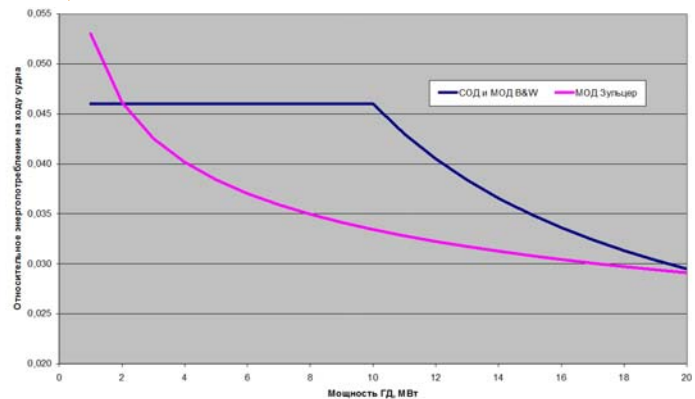


Рис. 3 Относительное электропотребление на ходу судна в зависимости от мощности ГД согласно [8]

Далее [8] предлагает учесть со знаком минус работу навешанных на ГД насосов охлаждения. Предлагается следующие зависимости мощности, потребляемой навешанными насосами охлаждения:

$$\text{заборной водой} - P_{PSW} = 0,0046 P_{ME}, \text{ кВт}; \quad (4)$$

$$\text{пресной водой} - P_{PFW} = 0,0078 (P_{ME})^{0,6}, \text{ кВт}. \quad (5)$$

Уменьшение, %, относительного электропотребления на ходу судна при отказе от применения насосов охлаждения заборной водой с электроприводом в зависимости от мощности ГД показано на рис. 4.

По результатам рассмотрения можно сформулировать предложения по корректировке методики расчета ККЭЭ в резолюции МЕРС.212(63) с использованием формул (4) и (5).

В случае, если на судне отсутствуют насосы охлаждения ГД заборной водой с электроприводом, а используются заборные и килевые охладители или насосы охлаждения заборной водой с приводом от ГД, мощность  $P_{AE}$ , потребляемая в ходовом режиме, может быть уменьшена на величину  $P_{PSW} = n \cdot 0,0046 P_{ME}$ , где  $n$  – число главных двигателей, а  $P_{ME}$  – их мощность.

В случае, если на судне отсутствуют насосы охлаждения ГД пресной водой с электроприводом, а используются насосы охлаждения пресной водой с приводом от ГД, мощность  $P_{AE}$ , потребляемая в ходовом режиме, может быть уменьшена на величину  $P_{PFW} = n \cdot 0,0078 (P_{ME})^{0,6}$ , кВт.

## ВЫВОДЫ

Предлагаемый в существующей методике ИМО для расчета ККЭЭ (резолюция МЕРС.212(63)) способ учета расхода топлива на производство электроэнергии на ходу судна не учитывает особенностей систем охлаждения ГД современных судовых ЭУ. Предлагаемая в резолюции МЕРС.212(63) оценка представ-

ляется приблизительной и несколько завышенной, а главное, не учитывающей особенностей ЭУ. В частности, не принимается во внимание возможность снижения потребления электроэнергии на ходу судна за счет заборных охладителей и использования навешанных насосов охлаждения, что лишает судовладельцев стимула для экономии топлива за счет оптимизации систем охлаждения ЭУ.

Для определения величины экономии топлива и подготовки предложений по корректировке методики расчета ККЭЭ была произведена оценка энергии, необходимой для привода насоса охлаждения заборной водой на основе теплотехнического расчета. Результаты совпали с зависимостями, приведенными в [8] для навешанных насосов охлаждения ГД заборной и пресной водой. Согласно сделанным оценкам, на работу насосов охлаждения приходится до 20% всей вырабатываемой на ходу судна электроэнергии, что составляет примерно 0,4 – 1,0% мощности ГД. Сформулированные зависимости могут быть использованы РФ для предложения ИМО по корректировке методики расчета ККЭЭ, приведенной в резолюции МЕРС.212(63).

Учитывая большое число судов с заборными охладителями и навешанными насосами охлаждения под российским флагом, это облегчит российским судовладельцам выполнение норм МК МАРПОЛ 73/78 по энергоэффективности судов и послужит стимулом для применения прогрессивных технологий в системах охлаждения при строительстве судов различного назначения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Second IMO GHG Study 2009. International Maritime Organization (IMO). – London, UK, April 2009.
2. Орлова Е.Г., Шурпак В.К. Проблема оценки эффективности судовых систем охлаждения с заборными охладителями // Научно-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – 2008. – Вып. 31. – С. 245 – 259.
3. Резолюция МЕРС.212(63). ИМО.
4. Вешкельский С.А. Справочник судового дизелиста. – Л.: Судостроение, 1990.
5. Фомин Ю.Я., Горбань А.И. Добровольский В.В. [и др.]. Судовые двигатели внутреннего сгорания. – Л.: Судостроение, 1989. – 344 с.
6. Троицкий Б.Л., Сударева Е.А. Основы проектирования судовых энергетических установок. – Л.: Судостроение, 1980. – 133 с.

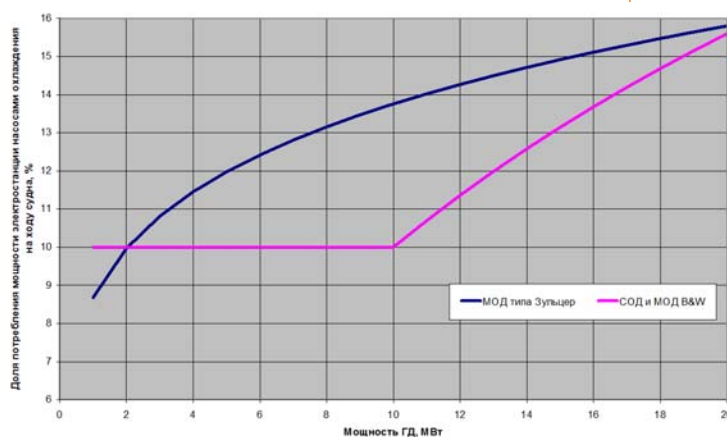


Рис. 4

7. Румб В.К., Яковлев Г.В., Шаров Г.И., Медведев В.В., Минасян М.А. Судовые энергетические установки. Судовые дизельные установки: учебн. СПбГМТУ. – СПб., 2007. – 622 с.

8. РД 31.03.41-90. Техничко-эксплуатационные требования по оптимальной комплектации электро-

станций морских транспортных судов / Министерство морского флота. Центральный ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт морского флота. – Л., 1990.



**П.И. Береза**

БФУ, г. Калининград



**В.В. Ярисов**

канд. техн. наук, доц.,  
БФУ, г. Калининград



## ПРИМЕНЕНИЕ КОЛЕСНОГО ДВИЖИТЕЛЯ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ АМФИБИЙНЫХ ТРАНСПОРТНО-ПАССАЖИРСКИХ КАТЕРОВ

Наводнения сопутствуют человеческому обществу с древнейших времен. Но в последнее столетие их частота, разрушительная сила и размеры причиняемого ими ущерба стремительно росли. Заметна связь повышения температуры атмосферы Земли с частотой и размерами наводнений. Площадь территорий, подверженных наводнениям, превышает в настоящее время 3 млн км<sup>2</sup>, на них проживает 1 млрд человек. По данным Всемирной метеорологической организации, в 2013 г. в результате наводнений погибло свыше 3 тыс. человек, пострадало свыше 17 млн жителей более 80 стран, ущерб, нанесенный стихией, превысил более чем 30 млрд долларов. Девять из произошедших наводнений, в том числе наводнение на Дальнем Востоке России, отнесены к числу экстремальных, случающихся один раз в столетие.

В России площадь паводкоопасных территорий составляет 400 тыс. км<sup>2</sup>. 50 тыс. км<sup>2</sup> подвергаются затоплению ежегодно. А ведь на этих территориях расположены более 300 городов, десятки тысяч населенных пунктов. Жизни тысяч людей постоянно подвержены опасности. Готовы ли спасательные службы к экстренной эвакуации людей из зоны бедствия? К сожалению, как показывает практика, техники для своевременного проведения спасательных операций в зонах, подверженных широкомасштабным наводнениям, не хватает, несмотря на увеличение за последние годы количества единиц спасательных средств. К их

числу относятся амфибийные суда (суда на воздушной подушке) типа «Гепард», «Марс-700» (рис. 1) и др.

Технические характеристики катера на воздушной подушке «Марс-700»:

длина габаритная – 7,84 м;

ширина габаритная – 3,72 м;

водоизмещение полное – 2,4 т;

экипаж – 1 чел.;

пассажировместимость – 7 чел.;

эксплуатационная скорость – 55 км/ч;

дальность хода – 500 км;

высота преодолеваемого вертикального уступа – 0,3 м;



Рис. 1 Катер на воздушной подушке «Марс-700»

кузов – алюминиевый сплав.

Преимуществами данных судов является их универсальность и высокая скорость перемещения по воде, а к недостаткам можно отнести низкую управляемость и дороговизну производства. Также помимо техники МЧС, в спасении людей принимает участие военная техника, понтоны и баржи.

Использование плавсредств с винтом в качестве движителя в условиях наводнения затруднительно из-за высокой загрязненности акватории обломками и мусором в воде. По этой же причине в зонах бедствий не могут использоваться суда с водометными движителями. Поэтому для проведения спасательных работ с успехом могли бы использоваться амфибийные транспортно-пассажирские катера с колесными движителями. Доставлять данные катера до места скопления людей, которых необходимо эвакуировать, было бы возможно грузовыми вертолетами. В штатном составе авиации МЧС сегодня имеются вертолеты Ка-32Т, Ми-8МТ и Ми-26Т. Грузоподъемность последнего – 20 т.

Соответствующее водоизмещение должно быть у транспортно-пассажирского катера с колесными движителями, количество которых в зависимости от модели может быть 4, 6, 8. На данный движитель был получен патент на изобретение.

Движитель (рис. 2: а) – общий вид; б) – вид спереди и продольный разрез) выполнен в виде двух одинаковых дисков 2, соединенных соосно посредством ступицы 1 и плиц 3, отходящих радиально от ступицы и не достигающих краев дисков. На каждом диске установлены ободья 4, на которых установлена шина 5.

В воде движитель работает как гребное колесо, ограниченное с двух сторон дисками 2, что помогает концентрировать струю в пределах колеса. Шины по краям дисков создают эффект шайб, что также повысит КПД движителя и, как следствие, скорость передвижения в воде. При перемещении по суше движитель работает как обычное колесо.

Диски движителя могут иметь произвольную форму, быть выполнены из металла, пластика или другого материала. Плицы, расположенные радиально, могут иметь плоскую или выпуклую форму. Ширина плиц выбирается в зависимости от назначения и условий эксплуатации движителя. Диски, плицы, ободья и втулка могут изготавливаться литьем и представлять собой единое изделие или выполнены соединением любого вида.

Преимуществами данного типа движителей являются:

- простота конструкции;
- малая себестоимость;
- возможность установки практически на любое плавсредство;
- относительно высокая скорость передвижения как по суше, так и в воде;

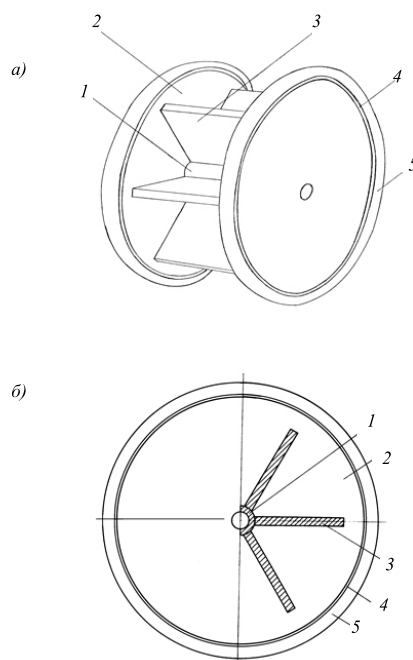


Рис. 2 Схема колесного движителя

- универсальность (амфибийность);
- возможность эффективной работы на любых глубинах;
- высокие тяговые характеристики;
- высокий КПД (30 – 50%).

Все это позволяет сказать о необходимости внедрения таких амфибийных транспортно-пассажирских катеров в штат спасательных средств МЧС.

Модельный ряд данных катеров может включать в себя как крупные катера водоизмещением до 20 т, так и суда меньшие, в зависимости от назначения.

Идея о разработке спасательного средства с колесными движителями была изложена в Крыловском научном центре, а также в Нижегородском государственном техническом университете им. Р.Е. Алексеева, откуда поступила положительная оценка движителя, а также поддержана идея применения данного движителя на амфибийных спасательных судах.

В настоящее время гребные колеса незаслуженно забыты, последние труды отечественных ученых по теории гребных колес датируются серединой прошлого столетия (труды А.М. Басина и М.Я. Алферьева). Вместе с тем, гребные колеса обладают рядом неоспоримых преимуществ перед самыми распространенными на сегодняшний день движителями – винтами. Гидродинамические преимущества гребных колес объясняются тем, что чем больше гидравлическое сечение и чем меньше приращение скорости воды, проходящей через движитель, тем меньше потери и тем выше его эффективность. По данным натурных испытаний, приведенных в [4], удельный упор при снижении



скорости буксировки (при возрастании сопротивления движению) увеличивается примерно в два раза.

Несмотря на такие уникальные свойства, гребные колеса в 50-е годы XX столетия практически вышли из применения. Причиной этому был ряд недостатков, приписываемых колесному движителю, как то: громоздкие размеры гребных колес и обносов; уязвимая конструкция и дорогостоящий ремонт гребных колес с поворотными плицами; недостаточная управляемость колесного судна в качестве толкача; отрицательное влияние изменения осадки и крена судна на работу колесного движителя.

Из перечисленных к действительным можно отнести только первый недостаток (а правильное сказать – особенность, из которой вытекают гидродинамические преимущества). Остальные недостатки связаны с конструкторскими недоработками, конъюнктурными условиями. По поводу радиальных гребных колес, которые могут иметь более прочную конструкцию, М.Я. Алферьев заметил: «Гребные колеса с радиальными, неподвижно закрепленными лопастями, почти вовсе вытесненные в настоящее время колесами с поворотными лопастями, в будущем, возможно, снова найдут применение на судах. Как правило, они для практических величин скольжения имеют более низкий коэффициент полезного действия, чем колеса с поворотными лопастями, но зато они могут создавать более высокое упорное давление».

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сайт МЧС России: [www.mchs.gov.ru](http://www.mchs.gov.ru)
2. Судовые механизмы, устройство, действие и уход за ними: настольная и справочная книга / О.А. Брикс. – С.-Петербург: Типография Морского Министерства в Главном Адмиралтействе, 1893.
3. Соловьев В.И., Чумак Д.А. Корабельные движители. – М.: Военное Издательство Министерства Вооруженных Сил Союза ССР, 1948.
4. Алферьев М.Я. Судовые движители. – М.: Водный транспорт, 1938.
5. Алферьев М.Я. Судовые движители. – М.: Изд-во Министерства Речного Флота СССР, 1947.
6. Басин А.М. Ходкость и управляемость судна. – М.: Транспорт, 1964.
7. Изотов О.А., Кириченко А.В., Латухов С.В., Никитин В.А. Технология и безопасность транспортных операций. Обработка судов в необорудованных пунктах российской Арктики. Монография. – СПб.: Островитянин, 2013. – 308 с.
8. Пат. 2399500 Российская Федерация. Колесный движитель / автор и патентообладатель П.И. Береза. – Заявка № 2009121584.



## ОБОЗРЕНИЕ: КНИЖНАЯ ПОЛКА

Вышла в свет книга «Вопросы мореходности транспортных судов». Ее автор – Михаил Анатольевич Кутейников, начальник отдела конструкции корпуса и судовых устройств Главного управления РС, доктор технических наук, член секции «Мореходные качества судов» НТС РС.

В книге рассмотрены вопросы комплексного нормирования мореходности и прочности морских транспортных судов, проведен анализ и систематизация требований ведущих классификационных обществ к назначению эксплуатационных ограничений судов, приведены методика назначения допустимых значений критериев, результаты

тестовых расчетов, модельных и натурных испытаний, разработана методика построения комплексных диаграмм, совокупность которых представляет собой основу для руководства судоводителю по выбору безопасных режимов движения судна в условиях морского волнения.

Работа над книгой позволила обобщить результаты многолетних исследований в области мореходных качеств грузовых судов, создать своего рода синтез теоретических основ и практических аспектов рассматриваемой темы. Основные элементы опубликованной работы прошли апробацию и соответствующую проверку, включая

натурные испытания, на судах морского флота РФ.

М.А. Кутейников входил в рабочую группу по остойчивости, делению на отсеки и грузовой марке Международной ассоциации классификационных обществ, в составе делегации РФ принимал участие в работе Подкомитета по остойчивости, делению на отсеки, грузовой марке и безопасности рыболовных судов Международной морской организации (ИМО) при ООН, в настоящее время участвует в работе Подкомитета ИМО по проектированию и конструкции судна. Всего на счету автора – более 50 научных публикаций.



## ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ И РАДИОНАВИГАЦИОННОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

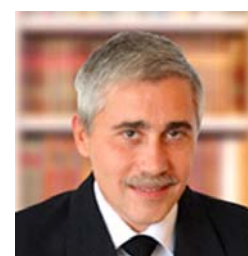
### **В.Ф. Мищенко**

канд. техн. наук,  
доц., ГУМРФ  
им. адм. С.О. Макарова



### **А.А. Устинов**

канд. техн. наук,  
доц., ГУМРФ  
им. адм. С.О. Макарова



## СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ РАЗЛИЧНЫХ ВАРИАНТОВ СУДОВЫХ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Работа по созданию стандарта предприятия [1] в рамках НИР, проводимой на кафедре «Основы судовой электроэнергетики» ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова, потребовала проанализировать надежность большого числа схем систем электроснабжения. Расчет выполнялся по методике [2]. Для автоматизации расчетов в приложении Simulink системы MATLAB была разработана библиотека модулей, позволяющая выполнять расчет надежности путем простого составления однолинейной структурной схемы электроэнергетической системы. Реализованный подход может быть полезен для сравнительной оценки надежности различных вариантов судовой электроэнергетической системы (СЭЭС) при одобрении проектов в Российском морском регистре судоходства. Несмотря на то, что в модели схемы СЭЭС предусмотрена подстановка фактических параметров надежности ее элементов, при сравнительном анализе разных вариантов структуры СЭЭС на надежность можно вполне обойтись без исходных данных. Это особенно актуально на этапе технического проекта, когда поставщик оборудования еще может быть не определен.

При этом значение имеет не количественный, а качественный результат — в каком случае надежность электроснабжения выше. Количественный результат при желании может быть уточнен после подстановки фактических данных о надежности от конкретного поставщика оборудования. В качестве примера предлагается рассмотреть вопрос, ответ на который очевиден: как повлияет секционирование шин главного распределительного щита (ГРЩ) на надежность электроснабжения потребителя? Однолинейная схема СЭЭС без секционирования шин ГРЩ представлена на рис. 1, с секционированием шин ГРЩ — на рис. 2.

Для того, чтобы учесть различие в параметрах надежности всего несекционированного ГРЩ и одной его секции, зададимся параметрами надежности одной секции, а несекционированный ГРЩ представим в виде последовательного соединения двух его секций. Тогда Simulink-модели схем СЭЭС, представленных на рис. 1 и 2, примут вид согласно рис. 3 и 4 соответственно. Автоматизированный расчет показал, как и следовало ожидать, что надежность секционированного ГРЩ выше. Следует обратить внима-

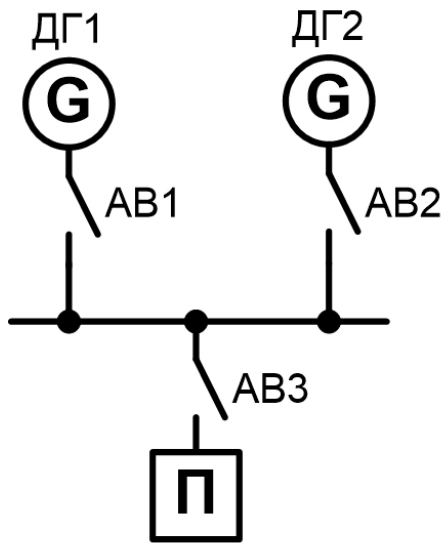


Рис. 1

Однолинейная схема СЭС без секционирования шин ГРЩ

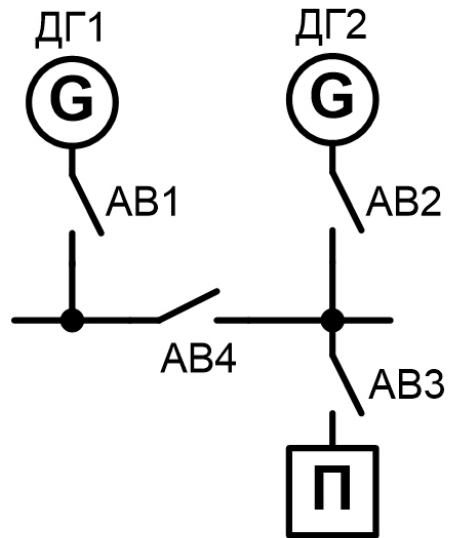


Рис. 2

Однолинейная схема СЭС с секционированием шин ГРЩ

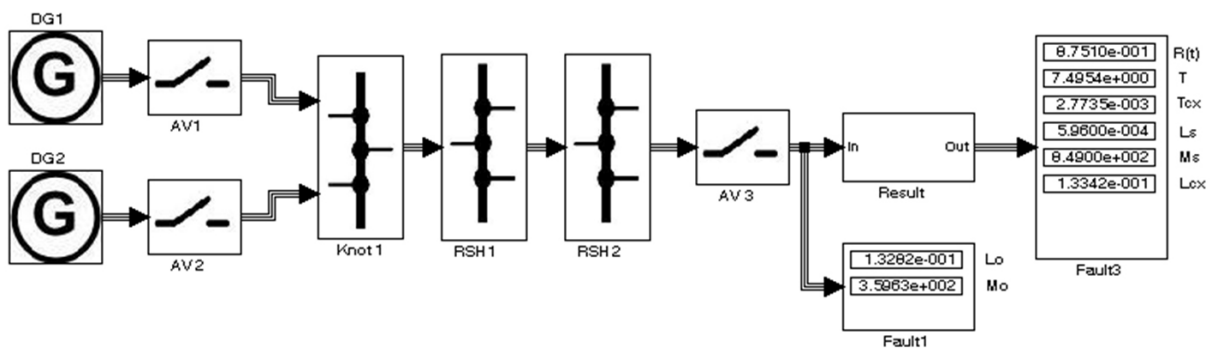


Рис. 3 Simulink-модель расчета надежности схемы СЭС без секционирования шин ГРЩ

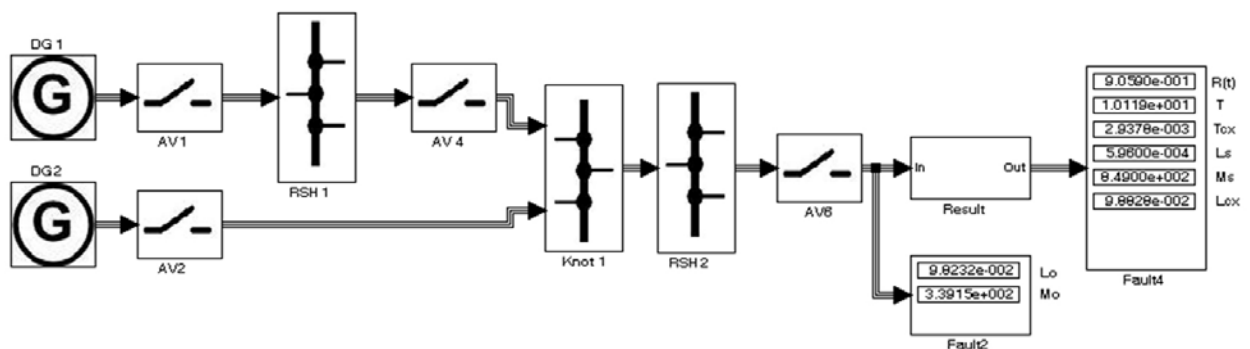


Рис. 4 Simulink-модель расчета надежности схемы СЭС с секционированием шин ГРЩ

ние на то, что сделанный вывод не зависит от параметров надежности элементов СЭЭС.

В качестве другого примера предлагается рассмотреть вопрос, как изменится надежность, если для питания потребителя необходимы не один, а два генератора, работающих в параллель. Simulink-модель схемы СЭЭС, когда на секционированный ГРЩ работают три генератора, а для питания потребителя достаточно одного генератора, представлена на рис. 5; в случае необходимости двух генераторов – на рис. 6.

Необходимость двух генераторов, работающих в параллель, учтена последовательным соединением элементов DG. Автоматизированный расчет показал, как и следовало ожидать, что надежность в первом случае выше. Следует обратить внимание на то, что сделанный вывод не зависит от параметров надежности элементов СЭЭС при условии использования однотипных генераторов, что является наиболее распространенным случаем. Рассмотренный пример может быть использован при анализе надежности электроснабжения групп потребителей в различных режимах работы судна.

Выше были рассмотрены вопросы, ответы на которые очевидны. Рассмотрим более сложный вопрос.

ЗАО «РЭП Холдинг» (РЭПХ) в рамках выполнения технического проекта электроэнергетической установки грузопассажирского парома проекта 00650 рассмотрело три варианта СЭЭС. Предлагается выполнить анализ надежности электроснабжения потребителя 400 В с помощью Simulink-модели для всех вариантов и результаты сравнить с выводами, сделанными ЗАО «РЭПХ». Следует отметить, что анализ, выполненный ЗАО «РЭПХ», является редкостью. В некоторых случаях может быть представлен анализ последствий отказов (FMEA). Наиболее сложные схемы электро-снабжения присущи единым электростанциям, характерным для судов с динамическими принципами удержания. Правила Регистра [3] требуют проведения анализа последствий отказов (FMEA) для систем динамического позиционирования. К сожалению, такой анализ, как правило, носит описательный характер без представления расчетов. Поэтому сравнительный анализ надежности разных вариантов электроснабжения остается актуальным.

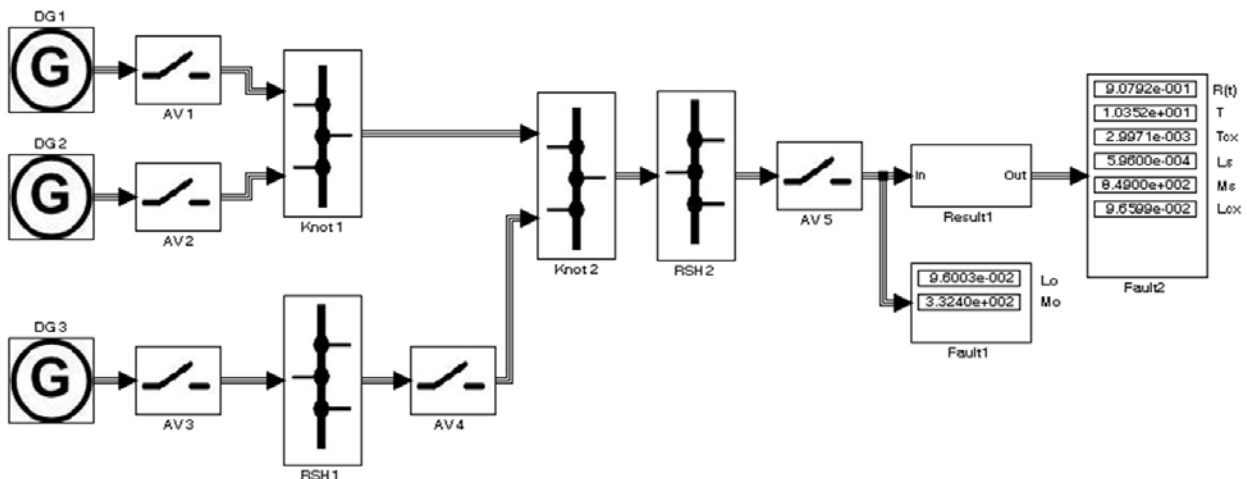


Рис. 5 Simulink-модель расчета надежности схемы СЭЭС, когда на секционированный ГРЩ работают три генератора, а для питания потребителя достаточно одного генератора

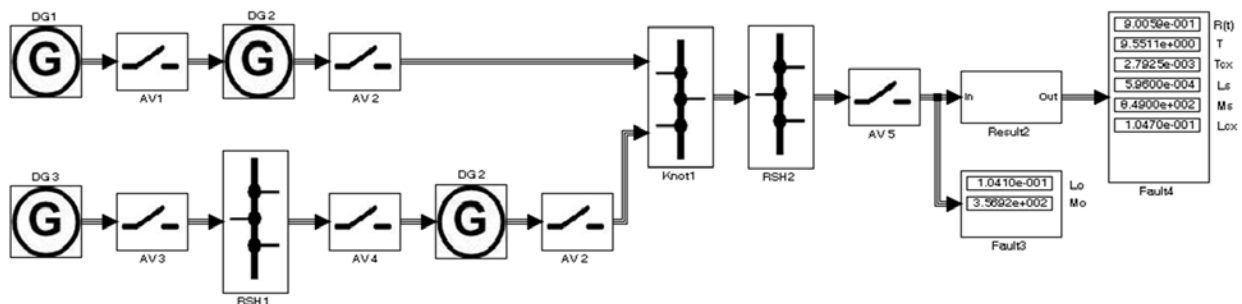


Рис. 6 Simulink-модель расчета надежности схемы СЭЭС, когда на секционированный ГРЩ работают три генератора, а для питания потребителя необходимо два генератора

Три варианта однолинейных структурных схем СЭЭС проекта 00650 представлены на рис. 7 – 9.

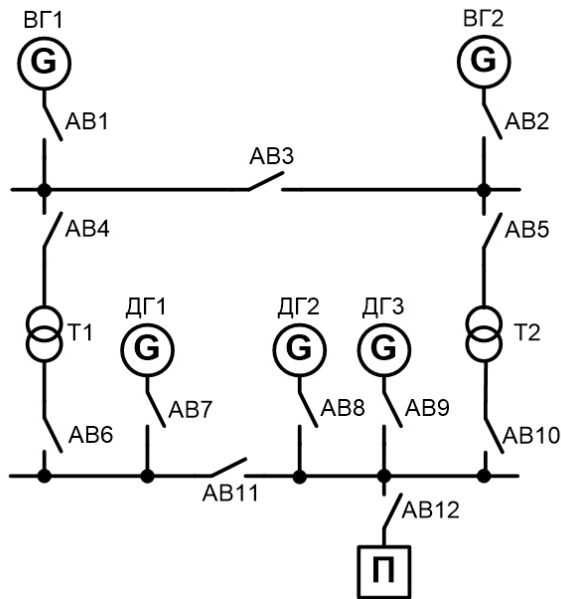


Рис. 7 Вариант № 1

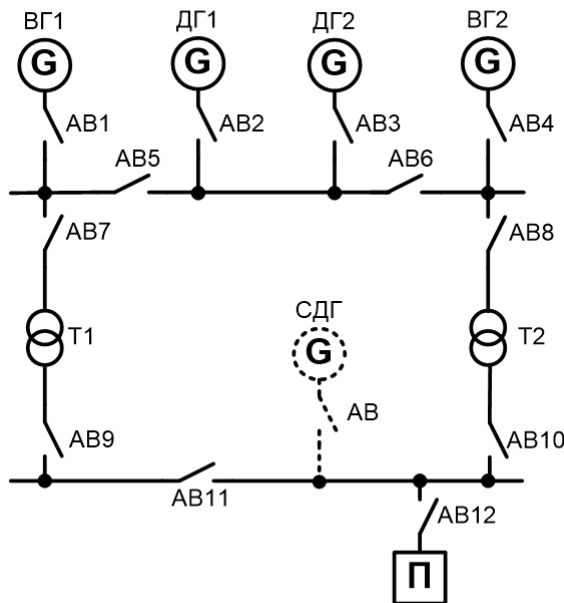


Рис. 8 Вариант № 2

Simulink-модели расчета надежности трех вариантов СЭЭС проекта 00650 представлены на рис. 10 – 12 соответственно.

При расчете надежности СЭЭС варианта № 2 стояночный дизель-генератор не учитывался в связи с тем, что он в ходовых режимах не работает. Рассматривался наиболее сложный расчет, когда

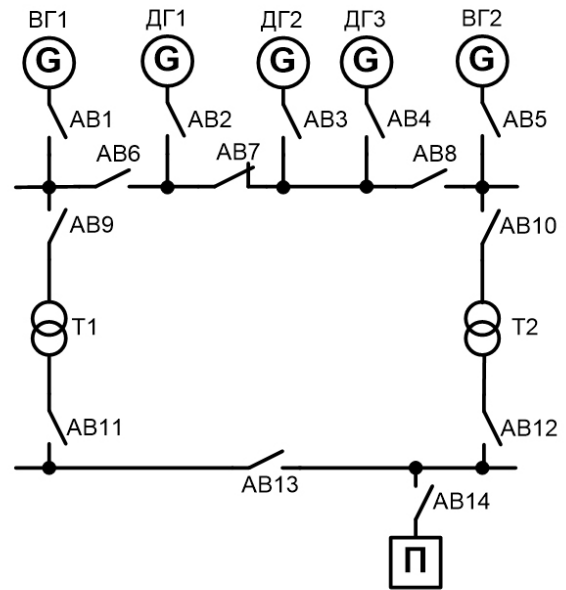


Рис. 9 Вариант № 3

мощности любого генератора достаточно для обеспечения питания потребителя. Параметры надежности генераторов приняты одинаковыми.

Автоматизированный расчет показал, что надежность электроснабжения потребителя 400 В наивысшая при варианте № 1 СЭЭС, далее идет вариант № 3, а у варианта № 2 надежность наименьшая, что полностью соответствует выводам ЗАО «РЭПХ». Следует напомнить, что надежность является не единственным критерием выбора структуры СЭЭС, помимо этого учитываются технико-экономические, массогабаритные и эксплуатационные показатели.

Простота составления Simulink-модели расчета надежности позволяет анализировать структуры любой сложности, включая удаленные потребители, получающие питание, например, от ГРЩ через аварийный распределительный щит и источники бесперебойного питания.

В дополнение к отраслевому стандарту [4] методика [2] учитывает не только интенсивность отказов, но и длительность восстановлений (параметры потока отказов и потока восстановлений).

В методике приняты следующие допущения:

- элемент СЭЭС может находиться только в двух состояниях: работоспособном и отказавшем;
- коммутационная аппаратура может отказать двумя различными способами: отказ типа «обрыв цепи» и отказ в срабатывании;
- случайные интервалы времени между отказами элементов и длительности нахождения их в отказавшем состоянии не противоречат экспоненциальным функциям распределения вероятностей;

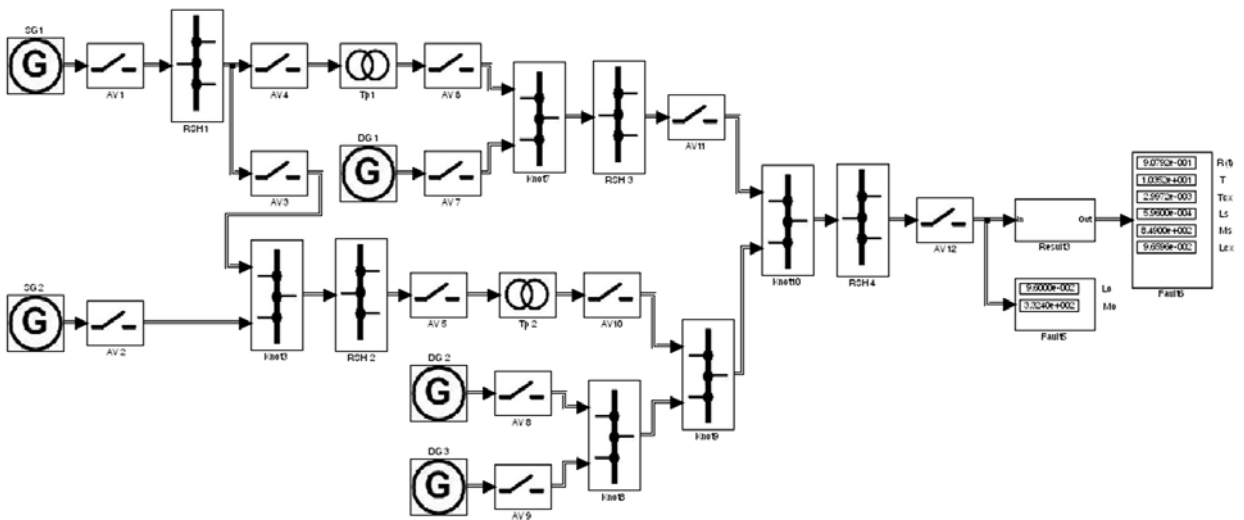


Рис. 10 Simulink-модель расчета надежности варианта № 1 СЭС

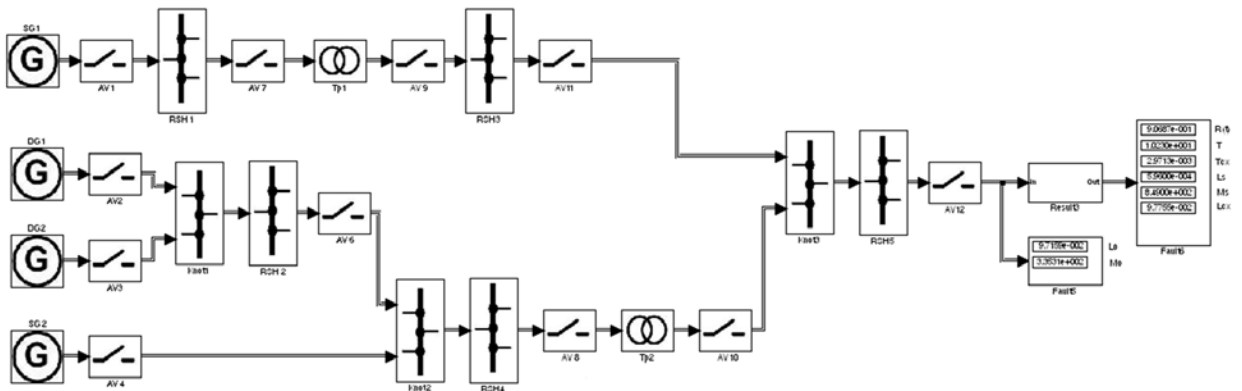


Рис. 11 Simulink-модель расчета надежности варианта № 2 СЭС

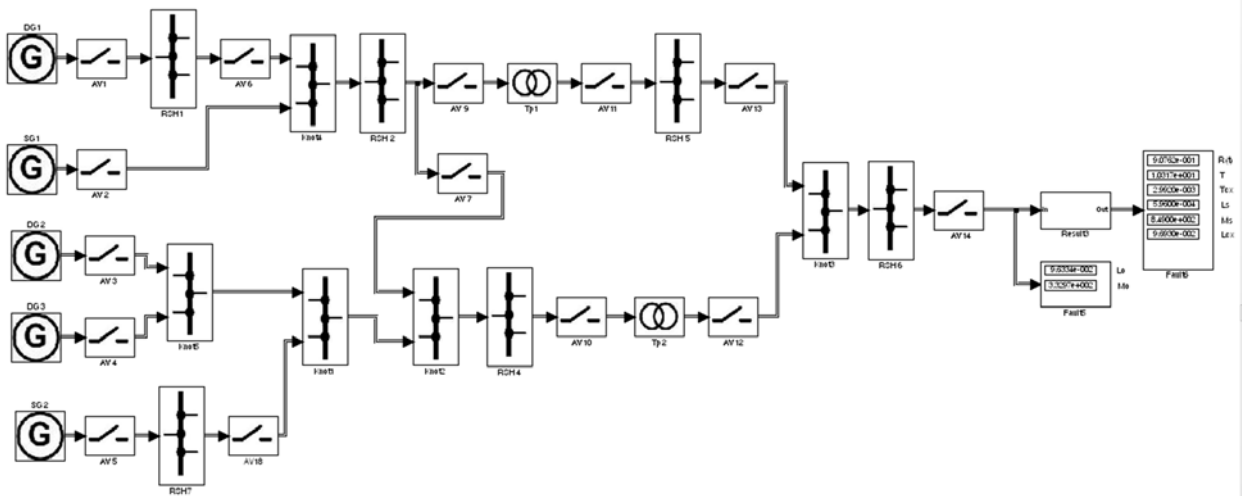


Рис. 12 Simulink-модель расчета надежности варианта № 3 СЭС

- надежность коммутационной аппаратуры является функцией времени, а не числа переключений;
- отказы коммутационной аппаратуры устраняются только в результате профилактических проверок;
- предполагается, что проверки абсолютно надежны, после каждого отказа электрооборудования или средств защиты его работоспособность полностью восстанавливается;
- интервалы времени между отказами электрооборудования и длительность их восстановлений взаимно независимы;
- восстановление электрооборудования неограниченное и полное, все работоспособное электрооборудование находится в работе, все отказавшее – в процессе восстановления;
- для элементов СЭЭС должно выполняться условие: отношение потока отказов к потоку восстановлений не более 0,01.

Принятые допущения позволяют для расчета надежности заменить принципиальную схему СЭЭС на совпадающую по структуре эквивалентную схему. Элементы схемы замещения входят в нее своими параметрами потока отказов и восстановлений.

Входными данными расчета являются параметры потока отказов и восстановлений элементов СЭЭС. В библиотеке модулей Simulink используются данные из справочника [5], но могут быть подставлены данные изготовителя.

Выходными данными расчета являются:

- вероятность бесперебойного электроснабжения потребителей СЭЭС в течение года;
- средний интервал времени между аварийными перерывами электроснабжения потребителей СЭЭС;

- среднее время восстановления электроснабжения потребителей СЭЭС.

Таким образом, результаты расчета позволяют оценить не только предпочтительную структуру СЭЭС в смысле надежности, но и требуемое время работы от резервного или аварийного источника (по запасам топлива или емкости аккумуляторов).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СтП РМП 31.02-2008. Электроснабжение, молниезащита и заземление объектов безопасности мореплавания. Требования. – М.: ФГУП «Росморпорт», 2008.
2. Ковалев А.П. Методика расчета надежности электроснабжения узлов нагрузки с учетом трех видов отказов элементов системы / А.П. Ковалев, В.П. Муха, А.А. Васин, В.В. Якимишина // Сб. науч. тр. Донецкого национального технического университета. Сер. Электротехника и энергетика, вып. 50. – Донецк: ДонНТУ, 2002. – 910 с. (С. 125 – 133).
3. Правила классификации и постройки морских судов. Том 1, часть I «Классификация». – СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2013.
4. ОСТ 5.6125–78. Судовые электроэнергетические системы. Методы расчетов структурной надежности.
5. Козлов Б.А., Ушаков И.А. Справочник по расчету надежности аппаратуры радиоэлектроники и автоматики. – М.: Сов. радио, 1975. – 472 с.



#### ОБОЗРЕНИЕ: 93-я СЕССИЯ КБМ

Специалисты РС приняли участие в работе 93-й сессии Комитета по безопасности на море (КБМ-93) Международной морской организации (ИМО), проходившей в мае текущего года в штаб-квартире ИМО (Лондон).

В ходе работы был одобрен текст новой главы XIV Международной конвенции по охране человеческой жизни на море (МК СОЛАС), предписывающей обязательное соблюдение положений части I Полярного кодекса для всех судов, сертифицированных согласно требованиям главы I МК СОЛАС.

КБМ-93 принял новую редакцию Международного кодекса постройки

и оборудования судов, перевозящих сжиженные газы наливом (IGC Code), который вступит в силу с 1 января 2016 г.

Важным итогом работы КБМ-93 является принятие поправок к МК СОЛАС в отношении периодических проверок со стороны ИМО морских администраций. Новые требования вступят в силу с 1 января 2016 г., после чего добровольная схема проверок станет обязательной.

На сессии Комитета приняты вступающие в силу с 1 января 2016 г. поправки к Международному кодексу по системам противопожарной безопасности (FSS Code), Междуна-

родному кодексу по спасательным средствам (LSA Code), Международному кодексу постройки и оборудования судов, перевозящих опасные химические грузы наливом (IBC Code) и другим обязательным инструментам ИМО. Кроме того, одобрен ряд циркуляров, в том числе MSC.1/Circ.1481 «Руководство по вступлению в силу поправок к СОЛАС и связанным обязательным инструментам» и MSC.1/Circ.1483 «Временное руководство по подготовке проектов поправок к СОЛАС и связанным обязательным инструментам».

**А.Н. Маринич**  
канд. техн. наук, доц.

**А.В. Припотнюк**

**Ю.М. Устинов**  
д-р техн. наук, проф.



ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова

## РАДИОЛОКАЦИОННОЕ ОБНАРУЖЕНИЕ НЕФТЯНЫХ ПЯТЕН НА ВЗВОЛНОВАННОЙ МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ

### 1. НОВЫЙ КЛАСС ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ РАДАРОВ

Задача радиолокационного обнаружения нефтяных пятен на поверхности моря в последнее время широко обсуждается в печати. Экспериментально ее решение проверено на серийных образцах отечественных и зарубежных судовых и береговых РЛС (радаров), в России – после аппаратно-програмной доработки береговой РЛС миллиметрового диапазона «Нева» (ЗАО «МКиС») [2]. За рубежом эта функция возложена на судовые радары с помощью приставки "Sigma S6" (FURUNO) и на специализированные судовые и береговые радары SHN X9, SHN X12 SHN-4000, SHN-3300 (SEA-HAWK) [5]. Новый класс радаров обеспечивает решение не только традиционных задач повышения безопасности в сложных условиях плавания, но и экологической задачи – дистанционного обнаружения нефтяных пятен. Такие радары принято называть интеллектуальными радарными.

### 2. МОРСКАЯ ПОВЕРХНОСТЬ КАК ПРОТЯЖЕННАЯ ДИСПЕРСНАЯ ЦЕЛЬ

Зондирующие сигналы РЛС, отраженные от протяженных целей, отличаются от сигналов, отраженных от точечных целей.

Сигналы, отраженные от точечных целей, имеют длительность и форму зондирующих сигналов, поступающих на цели – прямоугольную форму и длительность в пределах 0,04 – 1,2 мкс.

Сигналы, отраженные от протяженных целей, представляют собой случайный процесс с нормальным распределением вероят-

ности мгновенных значений. На выходе детектора приемного устройства РЛС вероятность амплитуд сигналов имеет рэлеевское распределение. Поэтому протяженные цели являются дисперсными целями, а отраженные сигналы – стохастическими сигналами.

### 3. МОЩНОСТИ СИГНАЛОВ НА ВХОДЕ ПРИЕМНИКА РЛС, ОТРАЖЕННЫХ ОТ ВЗВОЛНОВАННОЙ МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ И ОТ НЕФТЯНЫХ ПЯТЕН

Мощности зондирующих сигналов РЛС, отраженных от взволнованной морской поверхности, делятся на две части. На малых дистанциях от судна большая часть мощности поступает на вход приемника РЛС, а меньшая рассеивается в окружающем пространстве. На больших дистанциях, наоборот, меньшая часть отраженной мощности поступает на вход приемника РЛС, а большая – рассеивается (рис. 1).

На расстоянии большем критического вся отраженная мощность рассеивается и не поступает на вход приемника РЛС.

Качественная картина, приведенная на рис. 1, ниже заменена количественными соотношениями.

Известно, что мощность отраженных зондирующих сигналов  $P_c$  на входе приемника РЛС от любой цели определяется выражением

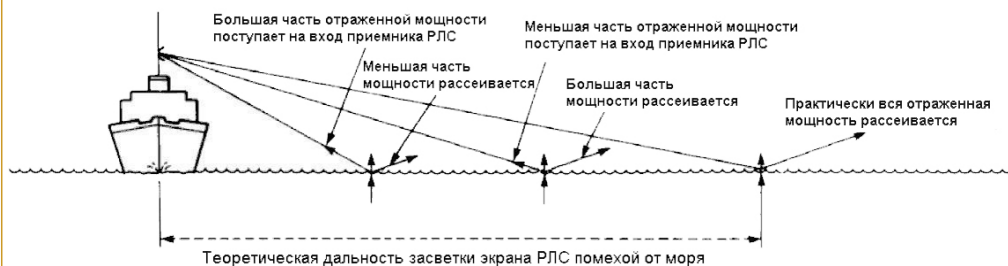


Рис. 1

Отраженная и рассеянная мощности от взволнованной морской поверхности в зависимости от дальности



$$P_c = \frac{P_u G_a S_{эф} S_a}{(4\pi)^2 D^4}, \quad (1)$$

где  $P_u$  – выходная импульсная мощность передатчика РЛС;  
 $G_a$  – коэффициент усиления антенны;  
 $S_{эф}$  – эффективная поверхность рассеяния (ЭПР) цели;  
 $S_a$  – апертура антенны РЛС;  
 $D$  – дальность (дистанция) до цели.

Для определения мощности сигналов, отраженных от взволнованной морской поверхности, необходимо определить ЭПР морской поверхности  $S_{эф.м}$ :

$$S_{эф.м} = S_{уд.м} S_p, \quad (2)$$

где  $S_{уд.м}$  – безразмерная величина удельной ЭПР морской поверхности;  
 $S_p$  (м<sup>2</sup>) – разрешающая площадь.

Расчетная формула для определения  $S_p$  на дальности  $D$ , если угол скольжения радиолокационного луча  $\beta \leq 10^\circ$ , имеет вид

$$S_p = 2,6 D a \tau_u, \quad (3)$$

где  $a$  – ширина диаграммы направленности антенны в горизонтальной плоскости, град;  
 $\tau_u$  – длительность зондирующих импульсов, мкс.

По результатам экспериментальных исследований для чистой взволнованной морской поверхности на рис. 2 приведены значения  $\frac{S_{уд.м}}{\sin \beta_0}$ , дБ, в зависимости от высоты волн, м, для  $\lambda = 1,25$  и  $3,2$  см.

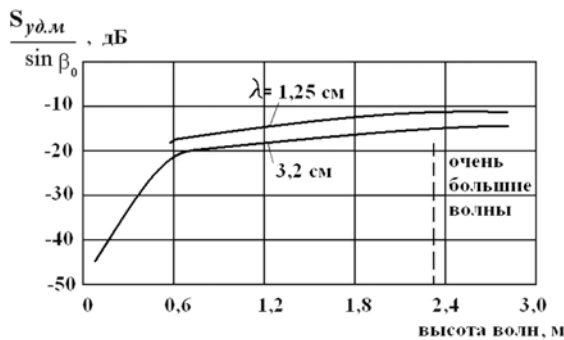


Рис. 2

Зависимость значений  $\frac{S_{уд.м}}{\sin \beta_0}$  от высоты волн для разных  $\lambda$

Величина  $S_{уд.м}$  зависит также от скорости и направления ветра. Если антенна РЛС размещена на типовой высоте  $h = 15$  м, то справедливо

$$b_0 = \arctan \frac{15}{D}. \quad (4)$$

С помощью выражений (2), (3), (4) и графиков рис. 2 получено:

если высота волн  $0,8$  м, то  $S_{эф.м} = 0,195$  м<sup>2</sup> для  $\lambda = 3,2$  см и  $S_{эф.м} = 0,36$  м<sup>2</sup> для  $\lambda = 1,25$  см;

если высота волн  $2,4$  м, то  $S_{эф.м} = 0,85$  м<sup>2</sup> для  $\lambda = 3,2$  см и  $S_{эф.м} = 1,545$  м<sup>2</sup> для  $\lambda = 1,25$  см;

$S_{эф.м}$  по определению не зависит от  $D$ .

Для сравнения отметим, что рыболовный бот длиной  $5$  м имеет  $S_{эф} = 2 - 10$  м<sup>2</sup>, т.е. более, чем на порядок превышает  $S_{эф.м}$  для взволнованной морской поверхности.

Если морская поверхность покрыта нефтяной пленкой, то мощность отраженных сигналов меньше, т.к. основной вклад в величину отраженной мощности вносят капиллярные волны, которые гасятся под пленкой.

Для определения  $S_{уд.м}$  для морской поверхности с нефтяной пленкой необходимо провести измерения по методике, которая использована для измерения  $S_{уд.м}$  без нефтяной пленки.

Для нефтяного пятна ЭПР меньше, чем для чистой поверхности. Степень уменьшения ЭПР зависит от толщины пленки нефтяного пятна. Согласно международному стандарту судовые РЛС должны обеспечивать четкую индикацию целей, аналогичных навигационному бую, имеющему ЭПР  $\approx 10$  м<sup>2</sup> на расстоянии  $2$  миль ( $3,7$  км).

Для обнаружения нефтяных пятен, особенно на больших дальностях, необходимы большие выходные мощности передатчиков РЛС и большие коэффициенты усиления антенн. Эти требования выполнимы для береговых РЛС. Для судовых РЛС дальности обнаружения нефтяных пятен ограничены из-за малых апертуры антенн и выходной мощности передатчиков по сравнению с береговыми РЛС.

#### 4. ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ ПРИЕМНИКОВ РЛС, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫХ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ФУНКЦИИ ОБНАРУЖЕНИЯ НЕФТЯНЫХ ПЯТЕН

Особенность обнаружения нефтяных пятен на взволнованной морской поверхности заключается в том, что на выходе приемника РЛС существуют три стохастических сигнала с разными дисперсиями:

- для сигнала от чистой морской поверхности –  $\sigma_{чп}^2$ ;

- для сигнала от нефтяного пятна –  $\sigma_{нп}^2$ ;

- для собственного шума приемника –  $\sigma_{ш}^2$ .

Суммарная мощность стохастического отраженного сигнала от чистой поверхности и собственного шума приемника  $\sigma_s^2 = \sigma_{чп}^2 + \sigma_{ш}^2$ , от нефтяного пятна и собственного шума приемника –  $\sigma^2 = \sigma_{нп}^2 + \sigma_{ш}^2$ . С учетом приведенных обозначений в энергетическом приемнике решается задача альтернативного обнаружения стохастического сигнала с дисперсией или случайного шума с дисперсией  $\sigma_s^2$ . При этом  $\sigma_s^2 > \sigma^2$ ;  $\sigma_{ш}^2 \ll \sigma_{чп}^2$ ;  $\sigma_{ш}^2 \ll \sigma_{нп}^2$ .

На рис. 3 приведены дисперсии сигналов, отраженных от чистой морской поверхности, от нефтяного пятна и собственного шума приемника. Ставится задача обнаружения сигнала от чистой поверхности с дисперсией  $\sigma_s^2$  на фоне случайного шума с дисперсией  $\sigma^2$ .

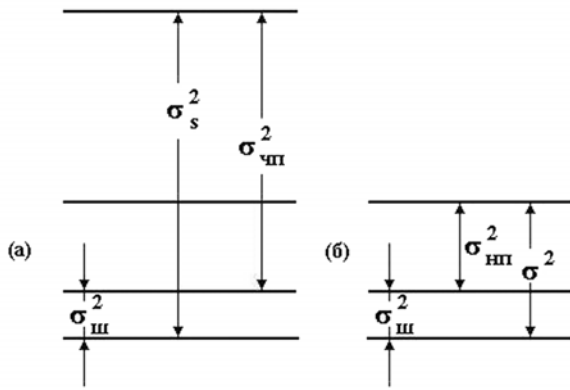


Рис. 3

Параметры шума для чистой морской поверхности (а) и для нефтяного пятна (б)

Оптимальный приемник для обнаружения сигнала, являющегося стационарным случайным процессом с дисперсией  $\sigma_s^2$  на фоне стационарного случайного шума с дисперсией  $\sigma^2$ , представляет собой *энергетический приемник*, который сравнивает нормированную энергию принятого процесса на выходе детектора приемника РЛС с порогом  $\gamma_2$ .

Теоретически доказано, что энергетический приемник одинаков, когда энергия замеряется на выходе или на входе детектора. Поэтому в дальнейшем рассматривается шум с нормальным, а не с рэлеевским распределением вероятности мгновенных значений.

Нормированная энергия принятого сигнала

$\frac{1}{\sigma^2} \sum_{i=1}^n x_i^2$  представляет собой нормированную сумму

мощностей  $x_i^2$ , взятых за  $n$  некоррелированных отсчетов выборки на каждом дискрете дальности РЛС. Временной разнос между отсчетами выборки выбирается равным периоду следования зондирующих импульсов РЛС. Для нормирования должна быть известна величина  $\sigma^2$ .

Ниже приводятся основные выражения, полученные для энергетического приемника [1].

Величина нормированного порога  $\gamma^2$  выбирается для сигнала с большей мощностью  $\sigma_s^2$ :

$$\gamma^2 = \frac{2(\sigma_s^2 + \sigma^2)}{\sigma_s^2} \ln \left[ C \left( \frac{\sigma_s^2 + \sigma^2}{\sigma_s^2} \right)^{n/2} \right], \quad (5)$$

где  $C$  – критерий правдоподобия.

Порог  $\gamma^2$  зависит от параметров  $C, \sigma^2, \sigma_s^2, n$ .

Наличие случайного сигнала от чистой поверхности с мощностью  $\sigma_s^2$  во взятой выборке во время одного оборота антенны РЛС определяется из условия

$$\frac{1}{\sigma^2} \sum_{i=1}^n x_i^2 \geq \gamma^2. \quad (6)$$

Наличие нефтяного пятна с мощностью  $\sigma^2$  определяется условием  $\frac{1}{\sigma^2} \sum_{i=1}^n x_i^2 < \gamma^2$ .

Из условия (6), если объем выборки большой ( $n \gg 1$ ), то вероятность ложной тревоги  $\alpha$  зависит от параметров  $\gamma^2, n$  и определяется выражением

$$\alpha = 1 - F(\sqrt{2\gamma^2} - \sqrt{2n}). \quad (7)$$

Вероятность пропуска сигнала  $\beta$  при  $n \gg 1$  зависит от величин  $\gamma^2, \sigma^2, \sigma_s^2, n$ :

$$\beta = F\left(\sqrt{\frac{2\sigma_s^2\gamma^2}{\sigma_s^2 + \sigma^2}} - \sqrt{2n}\right). \quad (8)$$

В равенствах (7) и (8)

$$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{t^2/2} dt. \quad (9)$$

На рис. 4 приведены значения порога  $\gamma^2$  при  $C = 1, \sigma_s^2/\sigma^2 = 2 - 20, n = 5 - 100$ .

На рис. 5 показана вероятность ложной тревоги  $\alpha$  при  $C = 1$  для  $\sigma_s^2/\sigma^2 = 2 - 20$  при  $n = 10, 15, 50$ .

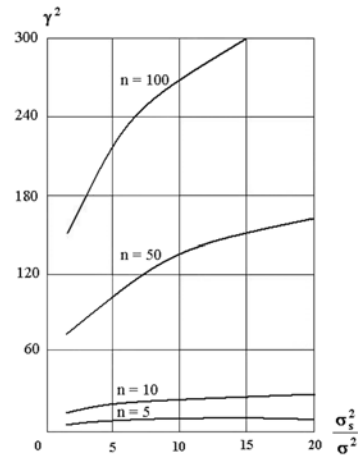


Рис. 4

Оптимальный порог  $\gamma^2$  в зависимости от  $\sigma_s^2/\sigma^2$  при различных  $n, C = 1$

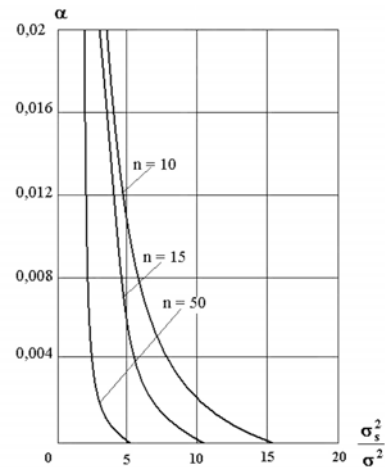


Рис. 5

Вероятность ложной тревоги  $\alpha$  в зависимости от  $\sigma_s^2/\sigma^2$  при различных  $n, C = 1$

На рис. 6 приведена вероятность пропуска сигнала  $\beta$  при  $C = 1$  для  $\sigma_s^2/\sigma^2 = 2 - 20$  при  $n = 10, 15, 50$ . При  $n > 50$  вероятность пропуска  $\beta \rightarrow 0\beta$ .

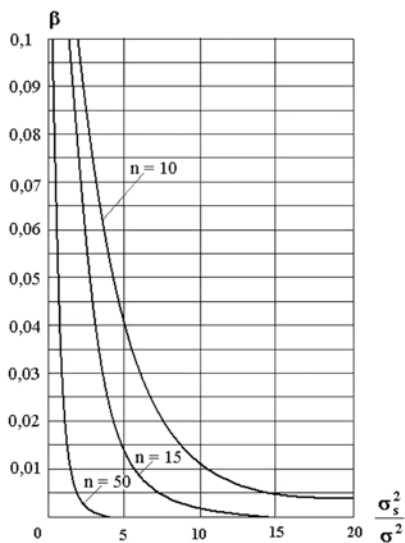


Рис. 6

Вероятность пропуска  $\beta$  в зависимости от  $\sigma_s^2/\sigma^2$  при различных  $n$ ,  $C = 1$

**5. ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА ПОРОГА  $\gamma^2$  И ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ДИСПЕРСИЙ ПРИНИМАЕМЫХ СИГНАЛОВ**

Зависимости  $\gamma^2$ ,  $\alpha$  и  $\beta$  на рис. 4 – 6 построены при отношении правдоподобия  $C = 1$ .

При изменении величины  $C$  при заданном отношении будут меняться вероятности  $\alpha$  и  $\beta$ . При  $C > 1$  – порог  $\gamma^2$  увеличивается.

При уменьшении  $\gamma^2$  уменьшается вероятность пропуска сигнала  $\beta$ , но возрастает вероятность ложной тревоги  $\alpha$ .

Увеличение порога  $\gamma^2$  приведет к увеличению вероятности пропуска сигнала  $\beta$  и к уменьшению вероятности ложной тревоги  $\alpha$ .

Априори неизвестно, какую морскую поверхность (чистую или нефтяное пятно) представляет собой стохастический шум, из которого берутся выборки.

Вероятность пропуска сигнала  $\beta$  – это вероятность ложного обнаружения нефтяного пятна на чистой поверхности.

Вероятность ложной тревоги  $\alpha$  – это вероятность ложного обнаружения чистой поверхности вместо нефтяной пленки. Так как альтернативой чистой поверхности является нефтяная пленка, то  $(1 - \alpha)$  – вероятность правильного обнаружения нефтяного пятна.

При правильном выборе порога обеспечивается условие  $(1 - \alpha) \gg \beta$ . Критерий обнаружения нефтяного пятна по результатам не одной, а  $k$  выборок представляется следующим: если из  $k$  последовательно взятых выборок при межобзорном накоплении за

несколько оборотов антенны регистрируется не менее  $v$  случаев регистрации нефтяного пятна, то должен формироваться признак обнаружения нефтяного пятна.

С помощью биномиального распределения вероятности получим, что если  $k$  выборок берутся из чистой поверхности, то вероятность ложного обнаружения нефтяного пятна определится выражением

$$Q = \sum_{i=0}^{k-v} \frac{k!}{(v+i)! [k-(v+i)]!} \beta^{(v+i)} (1-\beta)^{k-(v+i)}, \quad (10)$$

если  $k$  выборок берутся из нефтяного пятна, то вероятность правильного обнаружения нефтяного пятна определится в виде:

$$P = \sum_{i=0}^{k-v} \frac{k!}{(v+i)! [k-(v+i)]!} (1-\alpha)^{(v+i)} \alpha^{k-(v+i)}. \quad (11)$$

Особенность обнаружения разливов нефти радиолокационным методом заключается в малых ЭПР взволнованной морской поверхности как при отсутствии нефтяных пятен, так и при наличии их.

Отличие ЭПР чистой поверхности от загрязненной зависит от толщины слоя нефтяного пятна. При малой толщине слоя это отличие незначительно. С учетом этого дисперсия отраженных стохастических сигналов должна измеряться с высокой точностью.

На выходе детекторов радиоприемных устройств радаров SHN X9 и SHN X12 (SEA-HAWK, Норвегия) установлены 12–16-ти битовые преобразователи аналог-код. В этих радарах дискретности дальности формируются с помощью тактового генератора с частотой 120 МГц. Стробирование через интервалы времени меньше интервала корреляции шума обеспечивает более высокую точность измерения дисперсии шума. Высокоточное измерение дисперсий принимаемых сигналов позволяет эффективно решать задачу обнаружения нефтяных пятен на малых и больших удалениях.

**6. ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА ПАРАМЕТРОВ ПРИЕМНИКА РЛС**

Интервал времени между отсчетами выборки должен превышать интервал корреляции стохастического шума.

Интервал корреляции шума  $\tau_{кор}$  на выходе приемника РЛС определяется шириной полосы пропускания усилителя промежуточной частоты (УПЧ) –  $\Delta f_{упч}$ :

$$\tau_{кор} = 2/\Delta f. \quad (12)$$

Полоса  $\Delta f_{упч}$  зависит от длительности зондирующих импульсов и лежит в пределах  $\Delta f_{упч} = 5 - 15$  МГц.

Если  $\Delta f_{упч} = 5$  МГц, то  $\tau_{кор} = 0,4$  мкс; если  $\Delta f_{упч} = 15$  МГц, то  $\tau_{кор} = 0,13$  мкс.

Частота тактового генератора  $f_{тв}$  формирующего дискретности дальности, на которых стохастический шум не коррелирован, выбирается из условия

$$f_{\text{ГГ}} = 1/t_{\text{кор}}, \quad (13)$$

где  $f_{\text{ГГ}} = 2,5$  МГц при  $\tau_{\text{кор}} = 0,4$  мкс;  
 $f_{\text{ГГ}} = 7,5$  МГц при  $\tau_{\text{кор}} = 0,13$  мкс.

Формируемый дискрет по дальности  $\Delta D$

$$\Delta D = 150/f_{\text{ГГ}}. \quad (14)$$

Если  $f_{\text{ГГ}} = 2,5$  МГц, то  $\Delta D = 60$  м; если  $f_{\text{ГГ}} = 15$  МГц, то  $\Delta D = 20$  м.

Величина  $\Delta D$  характеризует максимальную погрешность определения положения нефтяного пятна по дальности.

На каждом дискрете дальности за один оборот антенны число независимых отсчетов  $n$  при угловой скорости вращения антенны  $\nu$ , об/мин, определяется как

$$n = \alpha \frac{F}{6\nu}, \quad (15)$$

где  $F$  – частота следования зондирующих импульсов.

Частота  $f_{\text{ГГ}}$  кратна частоте  $F$ . Если  $F = 1000$  Гц,  $\alpha = 2^\circ$ ,  $\nu = 24$  об/мин, то  $n = 14$ .

Для увеличения числа отсчетов выборки следует уменьшать скорость вращения антенны. Если  $\nu = 5$  об/мин, то  $n = 66$ .

Так как интервал времени между отсчетами выборки равен  $1/F$ , то время, затрачиваемое на выборку из  $n$  отсчетов, будет

$$T_{\alpha\nu\alpha} = n/F = \alpha/6\nu. \quad (16)$$

Если  $\alpha = 2^\circ$ ,  $\nu = 24$  об/мин, то  $T_{\text{выб}} = 0,01$  с; если  $\nu = 5$  об/мин, то  $T_{\text{выб}} = 0,06$  с.

За время  $T_{\text{выб}}$  угловое положение антенны смещается на угол  $\alpha$ .

Величина  $\alpha$  характеризует максимальную погрешность определения положения нефтяного пятна по азимуту.

Результат наличия или отсутствия нефтяного пятна в пределах разрешающей площади на каждом дискрете дальности будет отображаться на экране монитора РЛС при межобзорном накоплении после окончания  $k$  выборок из стохастического шума.

Экран монитора с помощью специальной программы должен ярко светиться в пределах разрешающей площади, если обнаружена чистая поверхность, и не светиться, если обнаружено нефтяное пятно.

Мощность стохастического сигнала, отраженного от взволнованной морской поверхности, как показано выше, на один-два порядка меньше мощности, отраженной от рыболовного бота и навигационного буйа. На рис. 7 приведена структурная схема УПЧ приемника РЛС [3] для формирования характеристики усиления, которая имеет линейно-логарифмический вид.

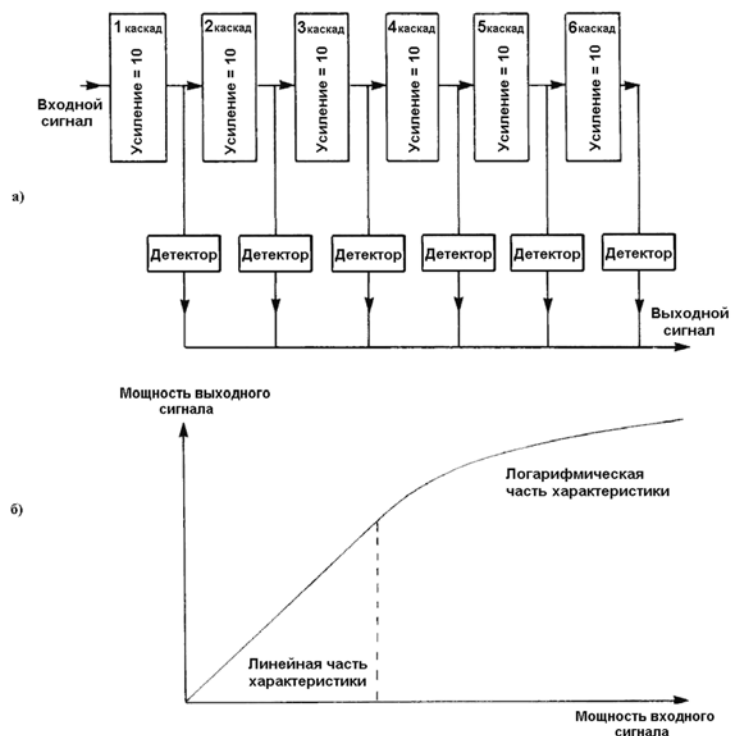


Рис. 7

Структурная схема УПЧ (а) и линейно-логарифмическая характеристика коэффициента усиления приемника РЛС (б)

Линейная часть характеристики (рис. 7) используется для усиления стохастического сигнала. Если в пределах нефтяного пятна будут находиться цели с большой ЭПР, то эти цели будут отрицательно влиять на характеристику обнаружения пятна. Логарифмическая характеристика способна частично убрать это отрицательное влияние.

#### 7. МАКСИМАЛЬНАЯ ДАЛЬНОСТЬ ОБНАРУЖЕНИЯ НЕФТЯНЫХ ПЯТЕН НА ВЗВОЛНОВАННОЙ МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ НА ОСНОВЕ КРИТЕРИЯ РЭЛЕЯ

Состояние взволнованной морской поверхности оценивается пятью баллами (таблица).

| Волнение. Состояние моря             | Высота волн $h_w$ , м |
|--------------------------------------|-----------------------|
| 1 балл. Гладкое                      | 0 — 0,3               |
| 2 балла. Слабое                      | 0,3 — 1,0             |
| 3 балла. Умеренное (белые «барашки») | 1,0 — 1,7             |
| 4 балла. Бурное                      | 1,7 — 2,7             |
| 5 баллов. Очень бурное               | 2,7 — 4,0             |

В соответствии с критерием Рэля, отраженная от взволнованной морской поверхности [4] мощность сигнала на входе приемника РЛС отсутствует, если выполняется условие

$$h_a \leq \frac{\lambda}{8 \sin \beta_0} \quad (17)$$

Если  $\beta_0 \ll 1$ , то справедливо

$$\beta_0 \approx \frac{\lambda}{8h_a} \quad (18)$$

с учетом (4), если  $h = 15$  м, получим  $\operatorname{tg} \beta_0 = 15/D$ .

Если  $\beta_0 \ll 1$ , то справедливо

$$\beta_0 \approx 15/D \quad (19)$$

С учетом (18) и (19) получим

$$D = \frac{15 \cdot 8 h_a}{\lambda} = \frac{120 h_a}{\lambda} \quad (20)$$

На рис. 8 приведены максимальные дальности обнаружения нефтяных пятен  $D$  для различных волнений моря  $h_b = 0 - 4$  м и длин волн РЛС  $\lambda = 0,9; 3,2; 9,8$  см.

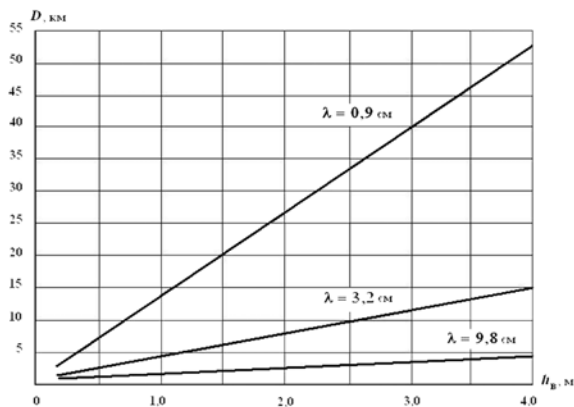


Рис. 8

Максимальные дальности обнаружения нефтяных пятен на морской поверхности при различной высоте волн  $h_b$  и длине волны  $\lambda$

Из рис. 8 следует, что потенциальная дальность обнаружения нефтяных пятен при максимальном волнении ( $h_b = 4$  м) при  $\lambda = 9,8$  см не может превышать 5 км, при  $\lambda = 3,2$  см – 15 км, при  $\lambda = 0,9$  см – 53 км. При  $h_b = 0,3$  м максимальные дальности, соответственно, не могут превышать 1,0; 2,5 и 5 км. При расчете реальных дальностей необходимо учитывать

затухания сигналов в атмосфере Земли при разных метеоусловиях. При этом следует учитывать, что ЭПР чистой поверхности и нефтяного пятна менее  $1 \text{ м}^2$ .

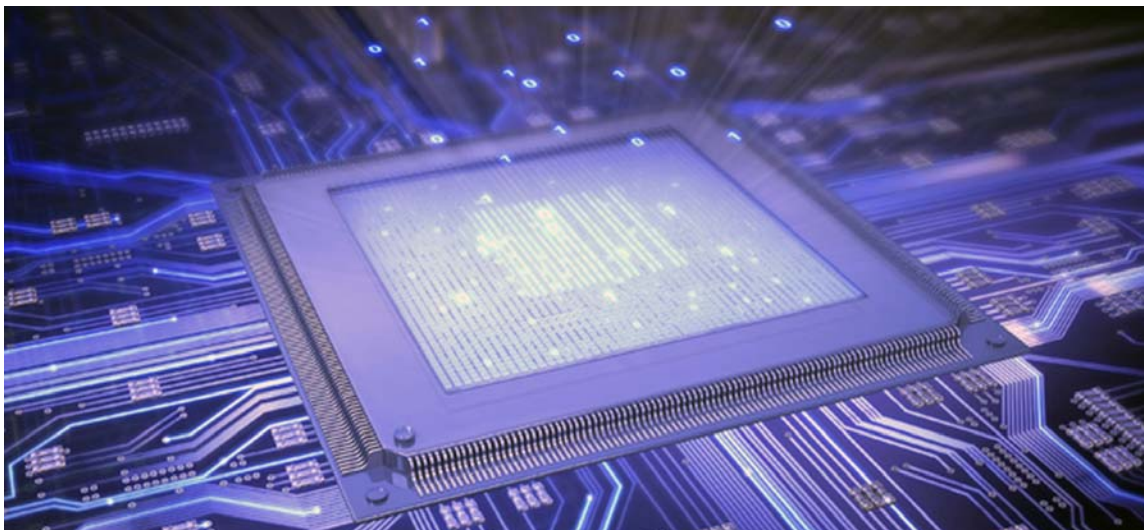
## ВЫВОДЫ

Потенциальная дальность радиолокационного обнаружения нефтяных пятен возрастает при увеличении волнения моря. Реальная дальность может быть оценена по дальности обнаружения навигационных вех и спасательных шлюпок. Использование 10-см РЛС неэффективно из-за малых дальностей обнаружения нефтяных пятен. Для успешного решения задачи обнаружения целесообразно провести замеры удельной ЭПР пятен.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Левин Б.Р. Теория случайных процессов и ее применение в радиотехнике. – М.: Советское радио, 1960.
2. Трофимов Б.С. Использование импульсных береговых и судовых РЛС миллиметрового диапазона волн для обнаружения разливов нефти: дис. канд. техн. наук. – СПб, ГМА им. адм. С.О.Макарова, 2012.
3. Судовые радиолокационные системы: учебник / В.В. Афанасьев, А.Н. Маринич, А.В. Припотнюк [и др.]; под ред. Ю.М.Устинова. – СПб: Веленара, 2009.
4. Радиолокационные устройства (теория и принципы построения) / В.В. Васин, О.В. Власов, В.В. Григорин-Рябов [и др.]. – М., Советское радио, 1970.
5. Современные судовые и береговые радиолокационные станции (радары) отечественных и зарубежных фирм: монография / А.Н. Маринич, А.В. Припотнюк, Ю.М. Устинов [и др.] – Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ, 2002. – 106 с.





## ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

**С.Н. Рюмин**

канд. техн. наук,  
доц., СПбГМТУ



### СОСТАВ И СРЕДСТВА СОЗДАНИЯ БАЗОВОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ КРУПНОТОННАЖНЫХ СУДОВ

#### ВВЕДЕНИЕ

Опыт проектирования судов показывает, что обеспечение конкурентоспособности в этой области требует широкого вариационного обоснования решения поставленной задачи с выполнением работы в максимально короткие сроки.

Зарубежные инженерно-конструкторские бюро, используя профильные базы знаний и системы автоматизированного проектирования (САПР), на разработку предконтрастного предложения затрачивают всего 1 – 3 дня, а в решении этой задачи заняты не более 5 – 7 специалистов. Тем не менее, современные САПР судов даже при самом высоком уровне внедрения искусственного интеллекта предполагают значительную степень участия инженера-конструктора в процессе проектирования судна. Последний должен обладать обширными знаниями и в области общего проектирования (методологии), и в части особенностей проектирования конкретных типов судов (танкер, контейнеровоз, ро-ро, газовоз и т.д.). Таким образом, в современных условиях жесткой конкуренции требуется применение в конструкторском бюро специализированной системы,

которая способствует сокращению времени разработки проекта в рамках предконтрастного предложения до 2 – 3 суток.

Разработки в области создания подобной системы ведутся практически постоянно уже с середины XX века. Из современных отечественных исследовательских систем можно отметить системы «Чертеж-4» [1] и МТС-Модель [2].

#### 1. СОСТАВ БАЗОВОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ МОДЕЛИ

Анализ действующих требований к традиционным судам (наливным и сухогрузным) показывает, что проектант постоянно находится в жестких рамках нормативных установок и регламентируемых диапазонов изменения исследуемых характеристик. Это, однако, не препятствует автоматизации большей части процесса формирования базового варианта судна, оставляя за проектантом оценку результата работы программы и внесение необходимых коррективов.

Рассматривая процесс проектирования, первый вариант судна, который проектант берет затем за

основу для дальнейшего уточнения его характеристик и проведения необходимых обоснований, назовем базовой информационной моделью судна (БИМ).

При генерации БИМ в качестве исходных данных предлагается принять традиционно включаемые в ТЗ грузоподъемность судна, скорость его хода, ограничения по главным размерениям, ледовый класс, плотность или кубатуру перевозимого груза, а для специализированных судов, например, среднюю массу контейнера или грузовой единицы (возможно гибкое изменение списка таких исходных величин).

Таким образом, БИМ – система данных о судне, включающая в себя информацию о всех составляющих его элементах, достаточная для оценки общей работоспособности проектируемого судна и его характеристик на стадии эскизной (предконтрактной) проработки и служащая основой для разработки проекта на последующих стадиях.

Для создания БИМ необходимо использование специального программного обеспечения («комплекс формирования БИМ»). Цифровые данные модели судна рационально хранить в наиболее интенсивно развивающемся формате XML. К примеру, для корпуса и его внутренних конструкций предлагается готовый адаптированный формат XML-НСМ [3], позволяющий передавать информацию в широкий ряд САПР и инженерного программного обеспечения.

В обязательную часть БИМ входят следующие информационные модули:

- главные размерения, коэффициенты полноты, водоизмещение и дедвейт судна;
- трехмерная геометрическая модель корпуса, отсеков, цистерн и помещений;
- таблицы нагрузки масс порожнем и по вариантам загрузки судна;
- результаты расчета ходкости, характеристик пропульсивного комплекса;
- отчет по удифферентовке и расчету посадки судна, как минимум – для требуемых Регистром вариантов его загрузки;
- расчеты остойчивости и непотопляемости в объеме, необходимом для оценки соответствия судна требованиям классификационного общества;
- комплекс схем для подготовки конструктивных чертежей – набор типовых поперечных сечений со следами внутренних конструкций, профили второго дна, второго борта, палуб и платформ; результаты расчетов изгибающих моментов и перерезывающих сил в объеме, необходимом для набора корпуса по правилам классификационного общества;
- номенклатура минимального состава оборудования судна с результатами расчетов их характеристик (лебедки, краны, дизель-генераторы, опреснители, котлы, инсинераторы и т.д.);
- результаты расчета экономической эффективности судна.

Таким образом, БИМ – это необходимый набор данных, создаваемый на стадии концептуального проектирования, который является основой для дальнейшего проектирования судна и гарантирует проектанту от возникновения ошибок, проявляющихся на поздних стадиях проектирования.

## 2. ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ФОРМИРОВАНИЯ БИМ

Для решения поставленной задачи формирования БИМ был разработан программный комплекс "Optiship", являющийся развитием учебно-исследовательской (УИ) САПР «Флот» [4].

Комплекс предназначен для формирования БИМ танкеров, контейнеровозов, навалочных судов и универсальных сухогрузных судов. Для других типов судов (газовозы, пассажирские, ро-ро) возможно ограниченное его применение для отдельных расчетов.

Генерация модели проводится за один «проход», с необходимой коррекцией переменных, в том числе входных. Расчеты построены на модульном принципе, каждый из модулей является замкнутой программной единицей и имеет ограниченное число входных и выходных переменных. В случае необходимости вывода информации о ходе расчета, внутри модуля используется сигнальная переменная, которая может означать, к примеру, «выход исходных данных из допустимого диапазона», «недостаточное количество переборок», информацию о необходимом векторе изменения данных в процессе расчета, необходимости возврата к предыдущим приближениям для пересчетов.

Основой комплекса является расчетное ядро – математическая модель судна, использующее входные данные по судну и выдающее, как результат расчетов, БИМ. Ядро используется и при массовых оптимизационных расчетах, и для единичных расчетов при уточнении характеристик проектируемого судна.

Продолжительность одного расчета в программе, формирующей полную БИМ, не более 2 – 3 с. Заметим, что при традиционном проектировании формирование такого набора информации занимает не менее недели.

Схема расчетного ядра программного комплекса формирования БИМ приведена на рис. 1. Рассмотрим элементы схемы ядра системы.

### *Построение теоретического чертежа*

Генерация формы корпуса может проводиться одним из методов:

- аффинного перестроения;
- интерполяции;
- подбора длины цилиндрической вставки.

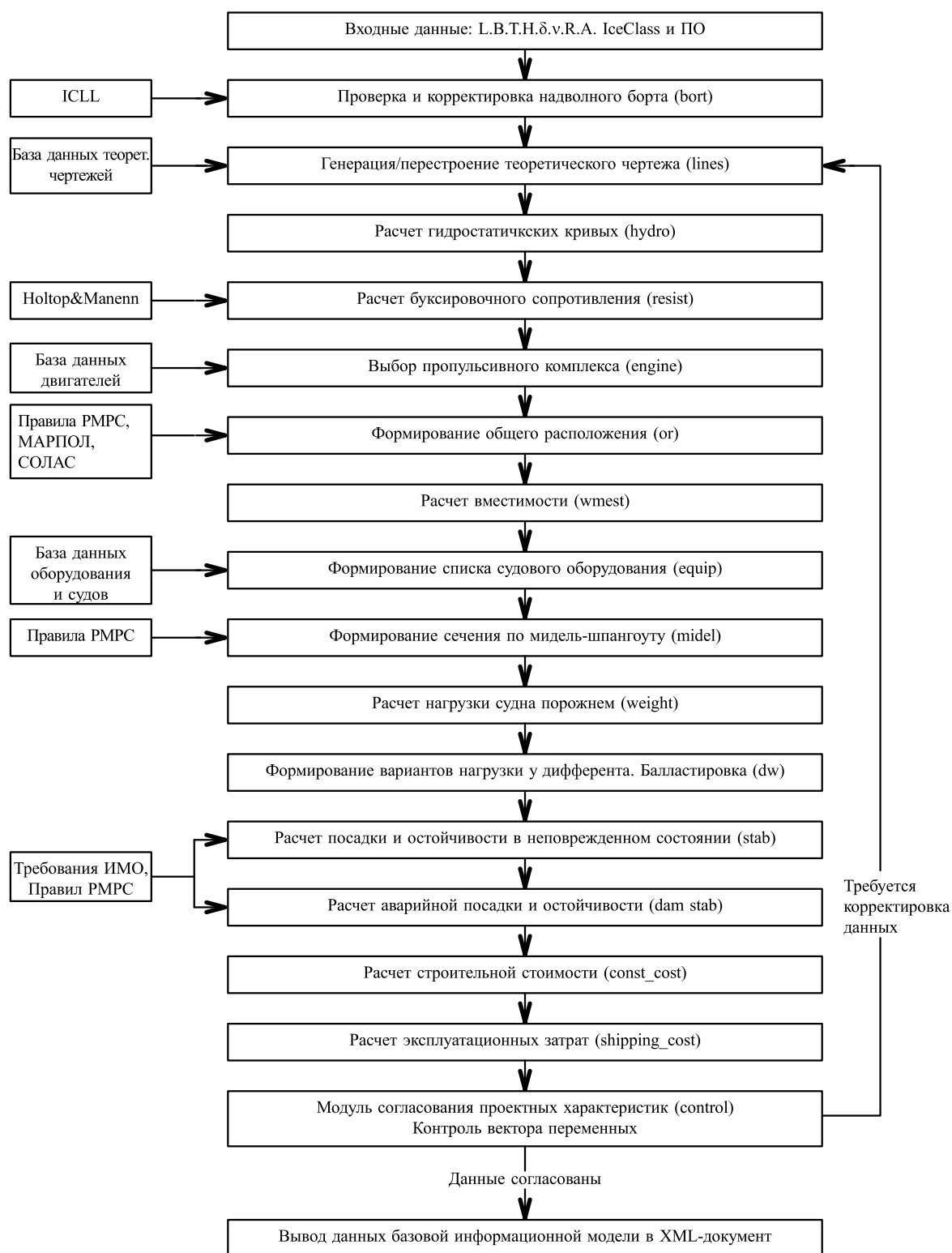


Рис. 1 Схема ядра математической модели комплекса формирования БИМ



Аффинное перестроение применяется, если в базе данных имеется «прототип» теоретического чертежа с близким к требуемому коэффициентом полноты и выполняющий требования к заданному ледовому классу. Подводная и надводная часть судна перестраивается с разными коэффициентами для обеспечения согласования обводов при отличающихся от прототипа соотношениях высоты борта к осадке.

В случае, если для проектируемого судна прототип по теоретическому чертежу не найден, проводится генерация формы корпуса методом интерполяции по базовым чертежам.

Предусмотрен вариант, когда форма корпуса задается заранее, без возможности изменения ее параметров (к примеру, когда проектант принимает решение выполнить новое судно в отработанном ранее корпусе).

Полученный любым из перечисленных методов чертеж сохраняется как специальный файл, содержащий трехмерную каркасную модель обводов.

#### Генерация общего расположения судна

В этом модуле производится расстановка практических шпангоутов, форпиковой, ахтерпиковой переборки, переборок машинного отделения и грузовой части. Учитываются требования Российского морского регистра судоходства, международных конвенций (МК МАРПОЛ 73/78, СОЛАС, при необходимости – правил МОПОГ, интерпретаций МАКО и т.п. На основе требований и конструктивных ограничений устанавливаются вторые борта и второе дно, внутренние палубы, продольные и поперечные переборки.

Рассмотрим генерацию общего расположения судна на примере нефтеналивного судна. Общее расположение формируется в несколько приближений. На первом этапе, с учетом требований Регистра, устанавливается форпиковая переборка и создается таблица практических шпангоутов. Далее устанавливаются переборка насосного отделения и переборка слоп-танков. Оставшееся пространство разбивается на грузовые отсеки согласно требованиям МК МАРПОЛ 73/78 к объемам и длинам грузовых танков. Длина машинного отделения привязана к типу двигателя и длине судна между перпендикулярами.

Далее, по статистическим данным и прямым ограничениям согласно требованиям нормативных

документов (к примеру, МК МАРПОЛ 73/78), выбирается ширина двойных бортов и высота второго дна. После расчетов вместимости, остойчивости или непотопляемости может быть проведена корректировка этих размеров. При установке переборки машинного отделения проводится проверка площади и объема машинного отделения для принятого двигателя. В случае необходимости в модуле делается корректировка общего расположения, при которой изменяется положение носовой переборки. Результаты расчета характеристик варианта загрузки танкера и визуальная оценка адекватности результатов работы модуля формирования общего расположения приведены на рис. 2.

При генерации общего расположения контейнеровоза учитываются размеры контейнеров, необходимые зазоры и минимальное значение ширины второго борта. Контейнеры расставляются по трюмам с учетом формы корпуса в месте их расположения. Количество палубных контейнеров в каждом штабеле на первом этапе их расстановки выбирается максимально возможным, далее проводится последовательное снятие контейнеров с верхних ярусов для обеспечения выполнения требований к метацентрической высоте и диаграммам остойчивости, критерию погоды, видимости из ходового мостика. На рис. 3 приведена визуализация контейнероплана в системе "Autocad" (экспорт из базовой информационной модели через dxf-файл).

#### Расчет вместимости

На основе 3D-модели корпуса судна и данных из модуля общего расположения производится генерация трехмерных сечений (3D-модели) грузовых, балластных и топливных танков. На основе моделей помещений проводится расчет их объемов и центров, а также готовится информация для расчетов прочности конструкций:

- расчет площадей, центров и объемов всех трюмов (танков) и цистерн;
- расчет вместимости наливных и навалочных грузов;
- контейнероплан или план расстановки накатных грузов;
- расчет вместимости балластных цистерн;
- расчет вместимости цистерн судовых запасов.

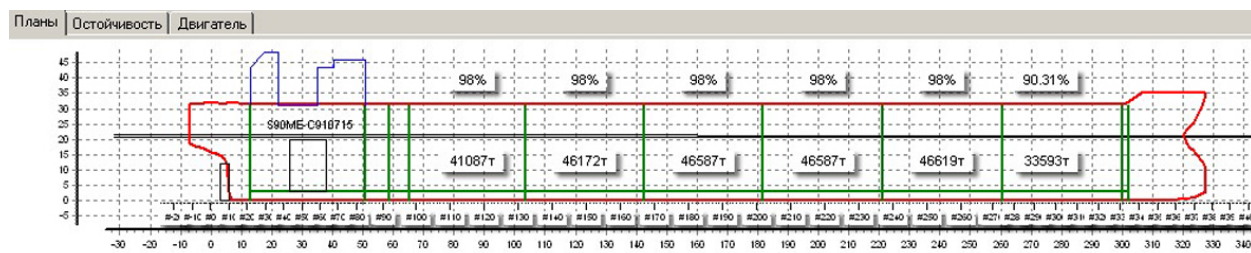


Рис. 2

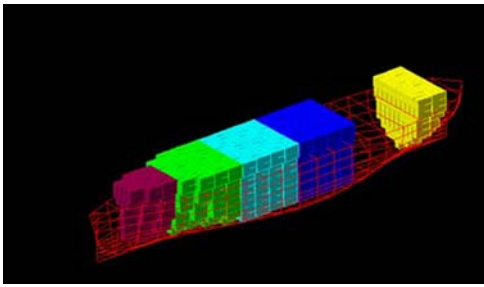


Рис. 3

### Подготовка данных для набора корпуса по правилам классификационного общества

В соответствии с 3D-моделью корпуса судна производится построение сечения корпуса на миделе, планы внутренних конструкций, контуры растяжки наружной обшивки и схемы настилов палуб. Фиксируется положение двойных бортов, второго дна, продольных переборок, палуб. Производится подготовка модели для дальнейших расчетов набора по правилам, к примеру, в комплексе ATLAS. Из модуля посадки и остойчивости выводится информация по распределению изгибающих моментов и перерезывающих сил по длине судна, необходимая для расчета прочности и набора. Из модуля вместимости в БИМ передаются необходимые данные об отсеках судна (по которым проводятся расчеты нормативного износа и нагрузок на элементы корпуса). В программы расчетов ледовых нагрузок передаются контуры ватерлиний в районах ледовых усилений.

### Расчет нагрузки порожнем

Расчет ведется по данным, накопленным на предыдущих этапах разработки проекта. Главным результатом работы модуля является масса судна порожнем и положение центра тяжести. Производится расчет следующих составляющих:

- корпуса (верхняя палуба, днище, второе дно, борта, переборки, палубы, надстройки и рубки, окраска, оборудование помещений и т.д.);
- энергетической установки и оборудования машинного отделения (главный двигатель, топливо, дизель-генераторы, валогенераторы, подруливающее устройство, котловая установка, парогенераторы, теплообменники, установки обработки сточных вод и отходов, опреснители, гребные винты и валы, редукторы, кабели и т.д.);
- судовых систем и устройств (балластная, осушительная, пожаротушения; якорное, швартовное, спасательное, крановое устройства и т.д.);
- грузового оборудования (в зависимости от типа судна – насосы, краны, рампы, лифты, системы обогрева, инертного газа и т.д.).

Оценка величины массы корпуса проводится комбинированным способом – с использованием

статистических данных, информации из каталогов поставщиков и прямых расчетов масс конструкций. Учитывается фактическое положение центров тяжести элементов судна, соответствующее сформированной схеме общего расположения. В расчете нагрузки по корпусу учитывается ледовый класс судна. На рис. 4 показано формирование базы данных (БД) нагрузки судна порожнем (модуль weight).

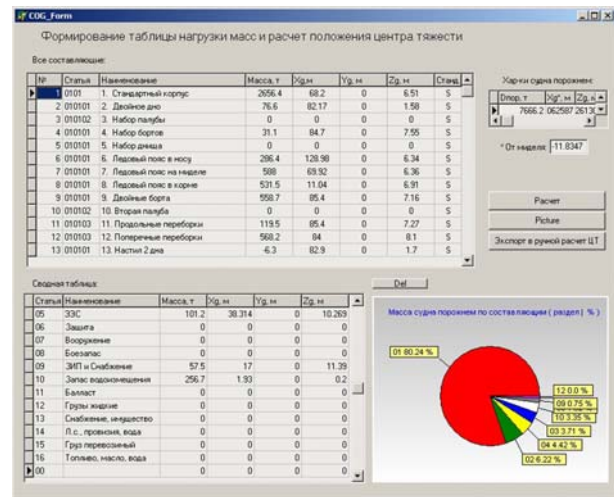


Рис. 4

На основе данных из расчета массы порожнем, а также данных о вместимости и центрах объемов отсеков производится формирование вариантов загрузки судна (рис. 5) (модуль dw.pas).

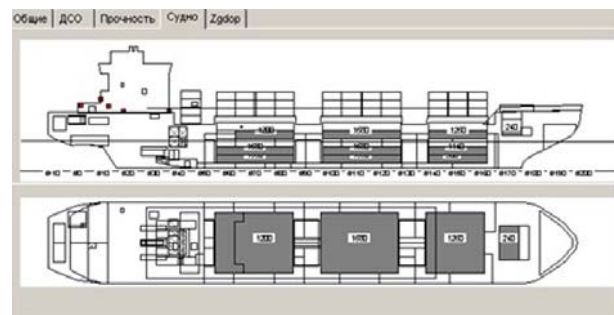


Рис. 5

### Модуль расчетов остойчивости и непотопляемости

Долгое время расчеты посадки и остойчивости в неповрежденном и аварийном состоянии были камнем преткновения для разработчиков исследовательских судостроительных САПР. Расчет остойчивости с построением диаграмм остойчивости часто заменялся опосредованной оценкой ее характеристик через начальную поперечную метацентрическую высоту. В настоящее время, что реализовано в рассматриваемой

системе, стал возможным прямой расчет остойчивости, с контролем, кроме метацентрической высоты, критерия погоды и параметров диаграммы с учетом поправок на свободные поверхности жидких грузов. Контролируются фактическая посадка и остойчивость при повреждении заданных отсеков, отстояние точек заливания от поверхности воды. Адекватность расчетов подтверждается тем, что при них используются те же программные модули, которые многократно апробированы при подготовке материалов для информации об остойчивости для капитана.

#### Внутренняя система принятия решений

Так как проектирование судна – многомерная задача, становится практически невозможной реализация корректировки проектных характеристик судна через последовательную работу программных модулей. К примеру, корректировка положения переборок приводит не только к изменению характеристик непотопляемости, но и вместимости, нагрузки масс, конструкции корпуса и т.д.

С целью согласования изменения проектных характеристик внутри расчетного ядра проектным процессом управляет специальный модуль принятия решений. На основе данных, собираемых по результатам работы других модулей, формируется вектор оперативного изменения проектных характеристик.

Как пример работы модуля рассмотрим принятие системой решения о назначении величины ширины второго борта ( $Bds$ ). На каждом расчетном «проходе» модуль общего расположения получает информацию о способе назначения величины  $Bds$ . На первом этапе в управляющем векторе соответствующая величина имеет значение «0» (принятие начальной величины). В этом случае модуль назначает статистическое значение ширины второго борта, с контролем минимального значения по требованиям МК МАРПОЛ 73/78. Далее запускается модуль расчета вместимости (см. рис. 1), который сигнализирует системе о недостаточной вместимости балластных цистерн и избыточной вместимости грузовых танков, формируя на выходе сигнал «1». После повторного расчетного прохода модуль общего расположения на основе положительного сигнала увеличивает ширину двойных бортов до следующего предпочтительного значения (например, с 2,4 до 2,5), при этом сигнальная переменная снова приравнивается к нулю. Далее, согласно алгоритму, снова проводится проверка вместимости. Если значение ширины второго борта достигло минимальной или максимальной возможной величины, предусмотрены соответствующие значения (например, «-99» и «+99»), сообщающие системе об исчерпании вариантов корректировки.

Система принятия решений действует на основе заранее заданных разработчиком схем корректировки проектных характеристик. К примеру, при недостаточной вместимости грузовых танков может

корректироваться высота второго дна, ширина второго борта, положение таранной переборки.

#### Модуль оптимизации

С помощью расчетного ядра системы возможно решение задачи выбора главных размерений и других проектных характеристик судов с помощью поисково-оптимизационного алгоритма, когда управляющая программа назначает исходные данные, по которым проводится генерация БИМ, после чего производится расчет целевой функции и выбор предпочтительного варианта. Такой метод применим для проведения массовых расчетов – сеточных или оптимизационных.

На рис. 6 показана схема использования расчетного ядра в оптимизирующей исследовательской САПР, где модуль оптимизации формирует вектор переменных, а затем производится формирование БИМ в ядре системы, после чего модуль оптимизации производит сравнение критериев с предыдущими результатами и в соответствии с алгоритмом оптимизации формирует последующий вектор переменных.

В программе применен модифицированный метод случайного поиска, варьирующий непрерывные и дискретные переменные (проектные характеристики), с сужением области поиска после заданного количества шагов оптимизации. В [5] показаны преимущества применения этого метода при оптимизации судов. Общие принципы оптимизационного проектирования, примененные в рассматриваемой системе, приведены в [6].



Рис. 6 Алгоритм проектирования в оптимизирующей САПР [4]

Быстродействие современных персональных компьютеров позволяет за небольшое время (до 10 мин) провести выбор характеристик и проектные расчеты более чем тысячи вариантов судов. Из всех вариантов выбираются те, характеристики которых не выходят за рамки ограничений (показаны точками на диаграмме на рис. 7). Для каждого варианта производится расчет критерия оптимизации, при этом модуль поиска учитывает полученные значения (на рис. 7 показаны сплошной линией) в процессе изменения проектных характеристик, сужая область варьируемых переменных.

Проверка адекватности результатов формирования БИМ в оптимизирующей системе проведена на основе БД широкого ряда построенных судов. В

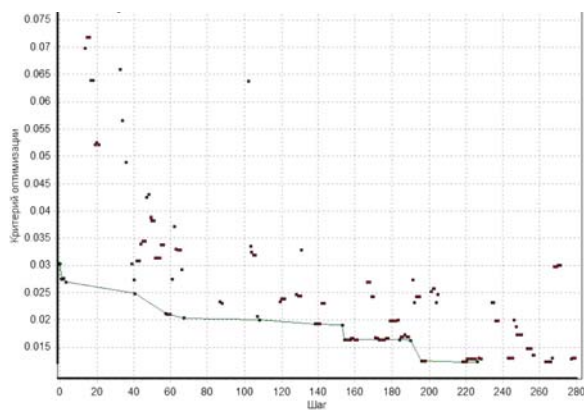


Рис. 7 Движение процедуры поиска к точке оптимума

таблице приведено сравнение фактических и расчетных характеристик судов, принятых согласно [7].

#### Результаты верификации принятых системой проектных решений

| Характеристика               | Значения характеристик по годам для судов |       |             |        |                |      |                  |       |
|------------------------------|---|-------|-------------|--------|----------------|------|------------------|-------|
|                              | факт.                                     |       | расчетн.    |        | факт.          |      | расчетн.         |       |
|                              | 2010                                      |       | 2010        |        | 2006           |      | 20109            |       |
|                              | "Aramon"                                  |       | "DAR Salva" |        | "Clipper Sira" |      | "Nordic Agnetha" |       |
| $L_{PP}$ , м                 | 219,0                                     | 320   | 84,90       | 176    |                |      |                  |       |
| $B$ , м                      | 32,24                                     | 60    | 13,32       | 27,4   |                |      |                  |       |
| $d$ , м                      | 14,25                                     | 22,5  | 5,65        | 11,5   |                |      |                  |       |
| $D$ , м                      | 20,65                                     | 30,5  | 7,7         | 17,2   |                |      |                  |       |
| $\Delta$                     | 0,856                                     | 0,82  | 0,84        | —      | 0,84           |      |                  |       |
| $DW$ , т                     | 74059                                     | 73786 | 319760      | 319893 | 3990           | 3978 | 37790            | 37471 |
| $Light Weight$ , т           | 14377                                     | 14650 | 44083       | 43950  | 1487           | 1499 | —                | 9277  |
| $V_{cargo}$ , м <sup>3</sup> | 85877                                     | 85722 | 358484      | 360111 | 4687           | 4600 | 42670            | 44080 |
| $Bds$ , м                    | 2   | 2     | н.д.        | 3,5    | 0,9            | 0,9  | 2                | 2     |
| $Hdb$ , м                    | 2,15                                      | 2,1   | н.д.        | 3,5    | 0,9            | 1,2  | 1,83             | 1,85  |
| $NEU$ , кВт                  | 13500                                     | 13400 | 29260       | 29050  | 1980           | 2000 | 7860             | 7620  |
| $RPM$ , об/мин               | 105                                       | 98    | 78          | 76     | —              | 170  | 129              | 1156  |
| $D_{prop}$ , м               | 7,0                                       | 7,8   | 9,9         | 11,0   | 2,8            | 3,1  | 5,6              | 5,75  |
| $V$ , уз                     | 16  | 16    | 16,2        | 15,99  | 12             | 12,2 | 15               | 14,99 |

#### ВЫВОДЫ

1. Системы формирования базовой информационной модели в настоящее время востребованы. Применение таких систем позволяет снизить сроки концептуального проектирования судна с недель и месяцев до нескольких дней. Кроме проектировочных, возможно проведение проектных расчетов

для восстановления утраченных данных, используемых для оценки технического состояния эксплуатируемых судов.

2. Благодаря высокой производительности ЭВМ сегодня стало возможным проведение сеточных и оптимизационных расчетов на основе 3D-модели судна без потери точности и без массового применения приближенных зависимостей.

3. Автоматизированная система формирования БИМ позволяет в короткие сроки обосновать реализуемость проекта, выдать необходимую информацию контрагентам конструкторского бюро для оперативных проектных проработок (конструкции корпуса, экономических расчетов и т.д.)

4. Использование расчетного ядра возможно в двух вариантах – для автоматизированных расчетов при жестком задании характеристик проектируемого судна и для оптимизирующих массовых расчетов для поиска приемлемых главных размерений и других проектных характеристик.

5. Использование управляющего модуля, формирующего вектор сигнальных переменных, позволяет в несколько этапов проводить корректировку проектных переменных судна и выдать как результат согласованную совокупность его характеристик.

6. Рассматриваемая система формирования БИМ была апробирована при разработке концептуальных проектов судов разных типов – газозовов, танкеров, балкеров и при восстановлении отсутствующих проектных данных в рамках решения задачи оценки технического состояния судов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Никитин Н.В., Родионов В.В. Опыт использования системы автоматизированного исследовательского проектирования «Чертеж-4»: Материалы конф. «Моринтех-2003», СПб. – С. 60 – 66.
2. Таровик О.В., Косьмин М.С. Имитационное моделирование морских транспортных систем, работающих в ледовых условиях с соблюдением графика поставок // Судостроение. – 2014. – № 1.
3. Efficient Data Management for Hull Condition Assessment. David Jaramillo, Christian Cabos, Philippe Renard. 2006, Vol 6, No 1. International Journal of CAD/CAM.
4. Гайкович А.И., Рюмин С.Н. Курсовое и дипломное проектирование с использованием УИ САПР «Флот». – СПб.: изд. СПбГМТУ, 2005.
5. Гайкович А.И. Применение современных математических методов в проектировании судов. – Л.: Изд. ЛКИ, 1982.
6. Пашин В.М. Оптимизация судов. – Л.: Судостроение, 1983.
7. Significant Ships. RINA. 2006 – 2010.



## ПРОМЫШЛЕННОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

**В.В. Елистратов**  
д-р техн. наук

**А.С. Большев**  
д-р техн. наук

Санкт-Петербургский  
государственный  
политехнический университет



**К.В. Мегрецкий**

ЦКБ МТ «Рубин»



## ПРОЕКТИРОВАНИЕ И НАУЧНОЕ ОБОСНОВАНИЕ МОРСКИХ ВЕТРОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ

### ВВЕДЕНИЕ

Отличительной чертой развития энергетического потенциала ведущих мировых держав в последние десятилетия является ввод большого числа новых ветроэнергетических установок. К 2014 г. мощность сетевых ветроэлектростанций (ВЭС) в мире превысила 318 ГВт [1], а ежегодный прирост их мощностей за последнее десятилетие составляет 25 – 35%. Одновременно активно развивается сектор строительства ВЭС морского базирования (оффшорные ВЭС). К концу 2012 г. общая установленная мощность оффшорных ВЭС составила 5416 МВт, из которых 1903 МВт – в 2012 г., т.е. прирост мощности составил 35% [2]. Объем рынка ветроэнергетики составляет свыше 70 млрд евро.

В настоящее время расширяется интерес к созданию ветроэлектрических установок (ВЭУ) морского базирования на подвижном плавучем основании: проектируются и вводятся в эксплуатацию пилотные морские плавучие ВЭУ. Лидером по их созданию является Великобритания (одна из таких ВЭУ изображена на рис. 1, а). В Японии, особенно после аварии на АЭС «Фукусима» и отказа от развития атомной энергетики, принята программа развития возобновляемых источников

энергии, в том числе ветроэнергетики морского базирования. Уже создана фирмой «Хитачи» ВЭУ на плавучей платформе (рис. 1, б) мощностью 2 МВт. Диаметр ротора агрегата составляет 80 м, высота башни 65 м, высота плавучего основания 32 м. Однако следует отметить, что данная ВЭУ установлена в регионе, где нет сурового климата, плавучего и дрейфующего льда.

Интерес к морским плавучим ветроэлектрическим станциям (МПВЭС) проявляется практически во всех промышленно развитых странах, уже накоплен мировой опыт по реализации проектов МПВЭС. За последние пять лет реализованы ряд пилотных проектов в США (FindFloat, PelaStar), Японии (Sasebo, Shimizu, MitsuiShipbuilding, Fukusima), Великобритании (XathusEnergyOceanBreeze), Норвегии (Hywind, Sway, WindSea), Нидерландах (BlueH, GustoMSC-Trifloater, PlagicPower), Швеции (Hexicon, SeaTwirl), Германии (Gicon), Франции (Winflo, Diwet), Дании (Poseidon) и др. Однако эти проекты были реализованы для незамерзающих морей, что означает практически полное отсутствие опыта реализации МПВЭС в ледовых условиях.

Одним из главных преимуществ реализации проектов ВЭС морского базирования в России

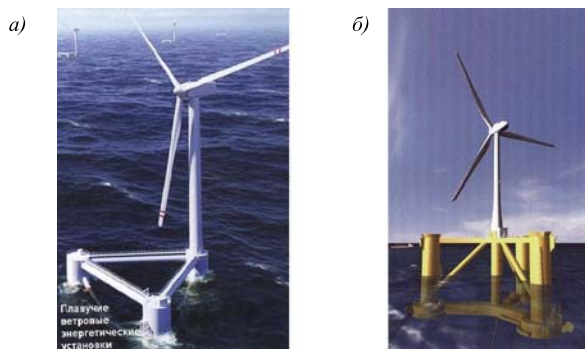


Рис. 1 Примеры плавучих ВЭУ

является возможность использования высокого ветрового потенциала морей, примыкающих к ее территории. Морские границы России составляют 38 807 км – более половины всей протяженности ее границ. Причем суммарная протяженность побережья Северного Ледовитого и Тихого океанов и их морей составляет около 37 тыс. км. Необходимо отметить, что большая часть этого побережья находится в суровых климатических условиях, лишена централизованного энергоснабжения, которое зависит от поставок дизельного топлива (Северный завоз) [3]. МПВЭС могут обеспечивать здесь децентрализованное энергоснабжение существующих потребителей, а также развитие производственно-транспортной инфраструктуры, необходимой в том числе для функционирования и развития Северного морского пути.

Таким образом, создание в России проекта первой МПВЭС является пилотным проектом, позволяющим российской ветроэнергетике приобрести уникальный опыт проектирования и эксплуатации ее в сложных природно-климатических условиях северных и восточных морей.

### 1. ВЭУ МОРСКОГО БАЗИРОВАНИЯ

ВЭУ морского базирования (оффшорные) различаются в зависимости от способа установки и строения фундамента и основания. На рис. 2 приведены схемы конструкций опорных фундаментов оффшорных ВЭУ, располагаемых на дне мелководного шельфа. В отличие от таких конструкций ВЭУ, МПВЭС располагаются на плавающем основании (фундаменте), соединяемом с дном системой закоренения.

При создании ВЭС морского базирования со стационарными, опирающимися на дно основаниями, как правило, используются несущие основания, апробированные ранее при проектировании разнообразных морских объектов. При малых глубинах моря (от 5 до 20 м) наиболее простой конструкцией опоры для ВЭУ является опора типа Monopile, представляющая собой вертикально забитую стальную сваю, к верхней части которой крепится башня установки. Рост мощности ветрогенераторов и связанное с этим увеличение весовых и ветровых нагрузок приводит к необходимости усложнения конструкции стационарных оснований ВЭС. В этой связи фирмы, реализующие проекты оффшорных парков ветрогенераторов при малых глубинах моря, предлагают в основном три типа конструкций стационарных опор [4]: Tripile – состоит из трех вертикальных свайколонн, возвышающихся над уровнем моря, и устанавливаемой на них переходной части, соединяющей сваи-колонны с башней ВЭУ; Tripod – состоит из центральной колонны, соединенной со свайными стаканами наклонными радиальными связями; Jacket – представляет из себя ферменную конструкцию, фиксируемая на грунте сваями.

При глубинах моря свыше 30 – 40 м создание стационарных оснований приводит к существенному возрастанию их стоимости и сопряжено с рядом технических проблем. По этой причине на глубинах моря свыше 50 м, как правило, предлагается использовать плавучие основания ВЭУ, техническая идеология которых опирается на многолетний опыт проектирования морских платформ [5]. В этой связи обычно в качестве плавучих оснований ВЭУ предлагаются полупогружные основания типов SPAR и TLP.

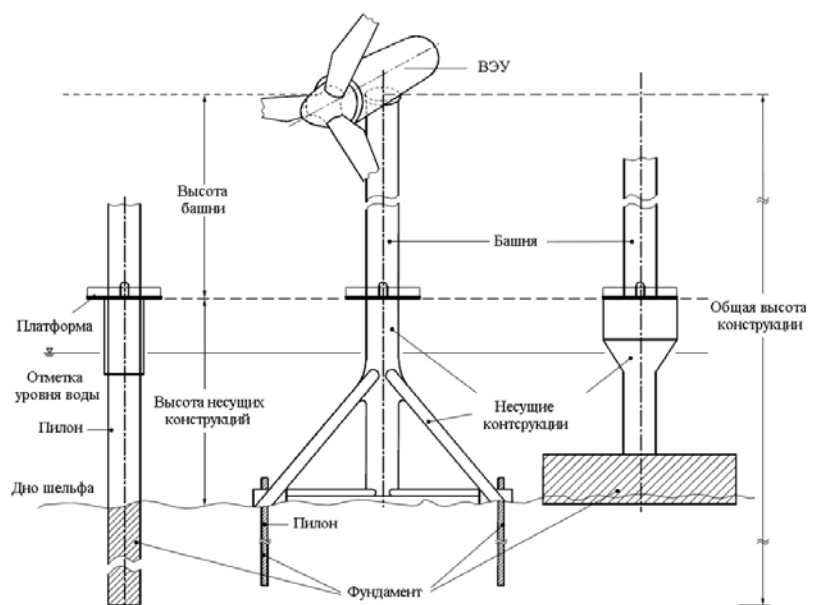


Рис. 2 Схемы конструкций опорных фундаментов оффшорных ВЭУ

Основания типа SPAR устанавливаются обычно на глубинах более 100 – 200 м. Они представляют собой длинный цилиндр с якорной системой закрепления. Корпус сохраняет устойчивость даже в случае обрыва связей системы удержания. Такая форма позволяет уменьшить размеры сооружения в районе ватерлинии и тем самым снизить волновые и ледовые нагрузки. Примером подобного основания может служить проект Nuwind (рис. 3), который был реализован норвежской компанией StatOil в сентябре 2009 г. Плавающая часть имеет вид стометрового цилиндра диаметром около 6 м. Эта конструкция была заякорена на дне на расстоянии 12 км от норвежского берега с использованием трех тросов на глубине 200 м. В этом месте море имеет глубину около 200 м. В составе ВЭС использовалась стандартная ветротурбина типа SWT-2.3-82 (Siemens) с мощностью 2,3 МВт.



Рис. 3 МПВЭС проекта Nuwind

Основания типа TLP предназначены для установки на глубинах более 100 м и состоят из водоизмещающего корпуса, удерживаемого системой вертикальных предварительно натянутых якорных связей. Водоизмещающий объем, обеспечивающий плавучесть сооружения, представлен обычно вертикальными цилиндрами большого диаметра, соединенными между собой горизонтальными водоизмещающими элементами. Натяжение якорных связей осуществляется путем дебалластировки водоизмещающих объемов. Основным недостатком таких оснований является потеря их устойчивости при обрыве связей. Наличие ледовых нагрузок на подобные основания приводит к необходимости добавления наклонных предварительно натянутых связей, что становится причиной удорожания конструкции. Примером основания типа TLP является конструкция Blue H, прототип которой был установлен у берегов Италии на глубине 113 м (рис. 4) в 2007 г.

Основным элементом МПВЭС, располагаемым на плавучем основании, является ВЭУ, как правило, горизонтально-осевого типа в составе: ветроколесо (ротор) с тремя лопастями аэродинамического



Рис. 4 Конструкция Blue H плавучего основания МПВЭС

профиля; поворотная гондола, в которой размещены генератор; редуктор; автоматические системы контроля параметров и ориентации на ветер (рис. 5). Все это устанавливается на металлической башне, состоящей из нескольких секций.

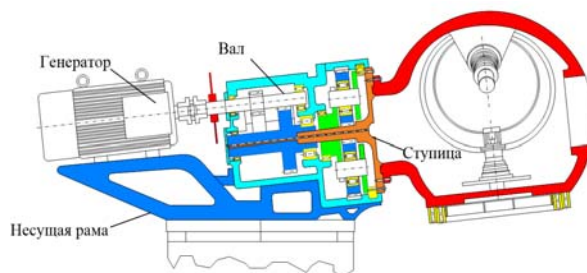


Рис. 5 Компоновка гондолы ВЭУ

Компоновочные решения определяются расположением оборудования в гондоле, типом генератора. Различают два основных типа современных ВЭУ: редукторные (соединение ротора с генератором через редуктор) и безредукторные (с прямым соединением ветроколеса и генератора).

На рынке ветрогенераторов широко представлены модели ВЭУ различных мощностей и конфигураций от разных производителей, которые в случае адаптации к северным условиям могут быть использованы для МПВЭС.

## 2. ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ РЕСУРСЫ В ОФФШОРНОЙ ЗОНЕ РОССИИ

Для эффективного использования ветровой энергии в конкретном регионе с целью систематизации ветровых характеристик в приземном и пограничном слоях

необходимо создание ветроэнергетических кадастров и атласов.

В 1997 г. были изданы «Атласы ветрового и солнечного климатов России» [6]. В этом издании по данным наблюдений более 1100 станций метеорологической сети России приведены карты всего комплекса характеристик ветрового режима и расчетных показателей. В «Атласе ветров России» [7], изданном в 2000 г. приводятся региональные значения ветроэнергетического потенциала для 5 высотных уровней (10, 30, 50, 100, 200 м) и карты средней скорости ветра и средней удельной мощности ветрового потока для высоты 50 м, наиболее важной на тот момент для энергетики. Разработанный в 2008 г. «Национальный кадастр ветроэнергетических ресурсов России...» [8] дополняет и уточняет данные метеорологических наблюдений базой данных аэрологических измерений.

На рис. 6 представлена карта районирования России по значениям удельной мощности, Вт/м, ветрового потока на уровне 100 м, выполненная М.М. Борисенко [9].

Общепризнанный справочник по оценкам ресурсов возобновляемых источников энергии в России [10] дает следующие оценки ветровых ресурсов: валовый потенциал –  $80 \times 10^{15}$  кВт·ч в год, технический –  $6,2 \times 10^{15}$  кВт·ч в год, экономический –  $31 - 10^{12}$  кВт·ч в год. Региональный анализ ресурсов показывает, что около 38% их сосредоточено в Европейской части, около 30% сконцентрировано на Дальнем Востоке, около 16% – в Западной Сибири и столько же в Восточной Сибири.

Как видно из представленной карты, наибольшим ветроэнергетическим потенциалом обладают районы вдоль берегов Карского, Берингова и Охотского морей, где наиболее эффективно создавать системы автоном-

ного энергоснабжения на основе ветродизельных энергокомплексов. Оценки оффшорных ветроэнергетических ресурсов России составляют около  $23 \times 10^{12}$  кВт·ч в год.

Для проверки значений ветроэнергетических ресурсов оффшорных территорий России в СПбПУ был выполнен (Дюльдин М.В., Столяров Н.В.) анализ карт ветроэнергетического потенциала данных территорий с использованием интернет-сервиса Vortex. Сервис предоставляет возможность получения данных мезомасштабного метеорологического моделирования с разрешением  $3 \times 3$  км на высоте 80 м, основанных на данных реанализа погодной модели NCEP CFSR (Climate Forecast System Reanalysis). Анализ карт сервиса Vortex (рис. 7) подтверждает наличие наибольших ветроэнергетических ресурсов в центральной части Охотского моря, восточного побережья Камчатки, Курил и Сахалина, а также южной части Баренцева моря.

Для построения карт ветропотенциала оффшорных районов, перспективных с точки зрения ветроэнергетики морей, был использован программный комплекс WindPRO, а также данные скорости ветра на высоте 50 м реанализа модели NCEP CFSR. На рис. 8 в качестве примера приведена карта ветроэнергетического потенциала прибрежной части Баренцева и Белого морей. В каждом море были выбраны точки с наибольшим значением удельных ветроэнергетических ресурсов, на основании которых построены изолинии ветроэнергетических ресурсов на высоте 50 м.

### 3. ВОПРОСЫ СОЗДАНИЯ МПВЭС И ОСОБЕННОСТИ ИХ КОНСТРУИРОВАНИЯ

Создание МПВЭС сопряжено с рядом технических сложностей, которые необходимо преодолеть

на пути от их проектирования до эксплуатации. Одна из главных, возникающая при создании подобных объектов – это минимизация металлоемкости конструкции при сохранении ее прочности и остойчивости.

Сложной технической проблемой для МПВЭС является также поиск варианта конструкции, обеспечивающей оптимальное сочетание экстремальных нагрузок от воздействия внешних факторов. Поиск оптимальной конструкции обычно сводится к выбору топологических форм корпуса, назначению основных размеров и созданию системы удержания для обеспечения примерно рав-

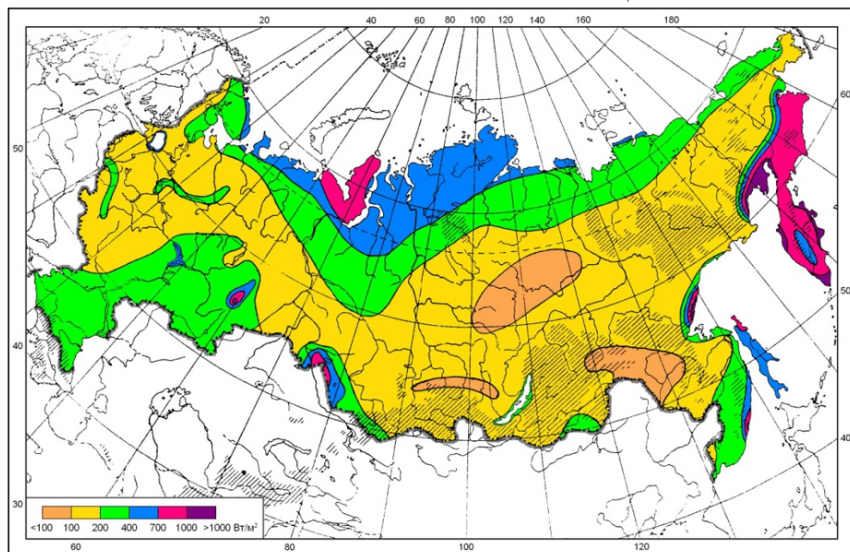


Рис. 6 Районирование России по значениям удельной мощности ветрового потока на высоте 100 м, Вт/м<sup>2</sup>



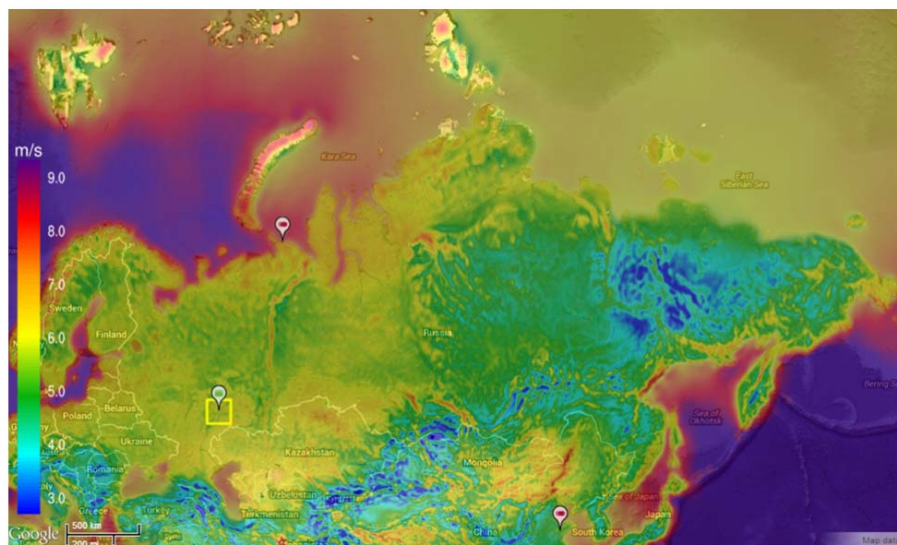


Рис. 7 Распределение скоростей ветра над территорией России на высоте 10 м над поверхностью земли по данным сервиса Vortex

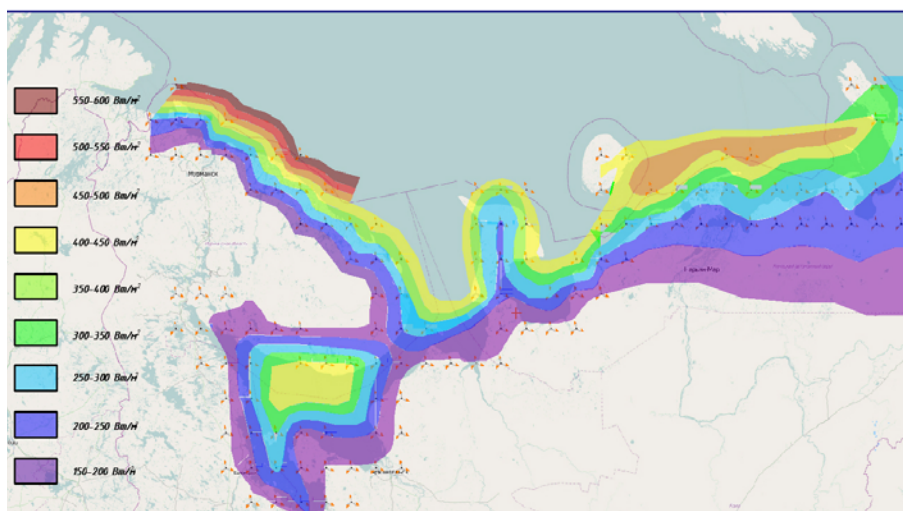


Рис. 8 Ветроэнергетические ресурсы в прибрежной зоне Белого и Баренцева морей на высоте 50 м

ного отклика конструкции на внешние воздействия разного происхождения или на различные сочетания воздействий.

Еще одной сложностью, связанной с проектированием и эксплуатацией МПВЭС, является минимизация ущерба, связанного с качкой и вибрацией объекта. В случае МПВЭС должны приниматься во внимание следующие опасные частотные области: диапазон частот морского волнения, ветра, ледового воздействия и область частот, связанных с вращением лопастей и самого ветроколеса.

Отдельная сложность, характерная в большей степени для реализации МПВЭС в условиях российских морей – это проблема транспортировки энергии от МПВЭС на берег. Существующие проекты МПВЭС создавались для условий незамерзающих

морских акваторий. В этом случае энергетический кабель может быть проложен по морскому дну и доведен до потребителей на суше. В условиях России подавляющая часть морей в зимний период замерзает.

Еще одна сложность, связанная с установкой МПВЭС, обеспечение безопасности при буксировке МПЭС к месту эксплуатации. В транспортном положении МПВЭС особенно уязвима ввиду значительной вертикальной отметки размещения ВЭУ, высокого положения центра тяжести, отсутствия системы удержания и т.п.

*Вопросы выбора оборудования и конструкций ВЭУ для МПВЭС*

При проектировании и выборе ВЭУ в составе МПВЭС необходимо рассмотреть все наиболее характерные расчетные случаи и сочетания нагрузок, которые могут возникнуть в ходе жизненного цикла эксплуатации ВЭУ. При проектировании ВЭУ рассмотрены следующие расчетные случаи:

- штатная работа ВЭУ, в ходе которой возникают нормальные или экстремальные параметры ветрового потока;
- аварийная работа ВЭУ;
- транспортировка, монтаж и техническое обслуживание.

При этом к конструкции ВЭУ во всех расчетных случаях предъявляются требования:

- по статической прочности и остойчивости плавучего основания при воздействии на элементы ВЭУ предельных нагрузок;
- по выносливости элементов (нагрузки задаются как функции от времени);
- по жесткости конструкции (обеспечение таких перемещений ее элементов, при которых собственные частоты колебаний ВЭУ и ее элементов находились бы вне зоны резонанса конструкции).

Для анализа и обобщения внешних условий, влияющих на установку и эксплуатацию МПВЭС, были выбраны прибрежные районы Карского,

Баренцева и Охотского морей, где развитие энергетической инфраструктуры особенно актуально в связи с обеспечением реализации крупных проектов освоения минерально-сырьевых ресурсов российского континентального шельфа.

#### *Конструирование и компоновочные решения МПВЭС*

При конструировании МПВЭС необходимо рассматривать множество аспектов: внешние условия в точке установки (волна, лед, течение, температура воздуха и т.д.); ветровой потенциал; глубина места; дальность от берега; грунты на дне; тип ВЭУ; единичная мощность ВЭУ; одноагрегатная или многоагрегатная МПВЭС.

Внешние условия определяют, в основном, облик опорного основания. Вес самой ВЭУ сравнительно невелик, но опорное основание должно выдерживать не только вес ВЭУ, но и внешние воздействия. Одни из самых существенных нагрузок, отличающие МПВЭС для северных условий от обычных – ледовые. Опорное основание должно не только выдерживать ледовые нагрузки, но и передавать их на якорную систему удержания (ЯСУ), обеспечивая при этом собственную жесткость и прочность. Для противодействия опрокидывающему моменту от ледовых нагрузок необходимо иметь соответствующие плечи, которые определяются габаритами опорного основания.

Ветровой потенциал в точке установки напрямую влияет на выработку электроэнергии. На морском шельфе он, как правило, выше, чем на суше.

Глубина места в точке установки также влияет на облик МПВЭС. При больших глубинах можно использовать опорные основания типа SPAR и TLP.

Для глубин менее 40 м рассматривать плавучие основания МПВЭС нецелесообразно, так как они имеют большую металлоемкость по сравнению со стационарными оффшорными ВЭС и значительно более худшие показатели стойкости к волновым и ледовым воздействиям.

Дальность от берега влияет на стоимость МПВЭС, включающую в себя стоимость подводного кабеля и его укладки. Кроме того, чем ближе МПВЭС к берегу, тем дешевле обходится ее обслуживание.

Грунты на дне в месте установки определяют тип и стоимость якорей МПВЭС. Для скальных грунтов могут применяться гравитационные якоря. Они достаточно просты в изготовлении, но материалоемки и требуют мощного транспортного и грузоподъемного оборудования на точке установки. Для других видов грунтов могут применяться пенетрационные, свайные, комбинированные якоря.

На МПВЭС могут применяться горизонтально осевые ВЭУ (ГОВЭУ) и вертикально осевые ВЭУ (ВОВЭУ). ГОВЭУ в настоящее время наиболее распространены. Подавляющее большинство (98%) ВЭС, в том числе оффшорного и плавучего испол-

нения, используют ГОВЭУ. Они лучше отработаны технически и технологически, выпускаются серийно и имеют широкую линейку установленных мощностей. Но направление ветра постоянно изменяется и, в силу большой инерции, ВЭУ постоянно запаздывает, при этом общее количество выработанной электроэнергии уменьшается.

ВОВЭУ лишена этого недостатка, однако коэффициент использования энергии ветра у нее значительно ниже, чем у ГОВЭУ, поэтому общее количество выработанной электроэнергии за год будет все равно ниже, чем у ГОВЭУ. По конструкции ВОВЭУ проще. Лопастей их не имеют системы установки оптимального угла атаки и установлены жестко. Вместе с отсутствием системы ориентации на ветер это упрощает управляющую систему гидравлики. Основные и наиболее тяжелые агрегаты, такие как электрогенератор и повышающий редуктор, расположены в опорном основании и всегда доступны для обслуживания. Однако несмотря на эти преимущества, серийно выпускаемых ВОВЭУ практически нет.

Мощность МПВЭС является очень важным показателем. МПВЭС можно проектировать на полную установленную мощность с использованием одного агрегата, может быть рассмотрен вариант МПВЭС и с несколькими агрегатами меньшей мощности. Однако расположение на одном опорном основании нескольких ВЭУ может привести к увеличению его размеров и массы, так как расстояние между осями ВЭУ рекомендуется выбирать в диапазоне от 5 до 10 диаметров ротора, в целях исключения взаимного влияния ГОВЭУ друг на друга при их работе. Для ВЭУ установленной мощности 1,5 – 2 МВт это расстояние может составлять до 400 м.

#### *Установка плавучего основания*

Плавучее основание МПВЭС в высокой степени заводской готовности устанавливается на акватории в расчетной точке, при этом устанавливаются ЯСУ и прокладывается по дну статическая (постоянно лежащая на дне) часть подводного кабеля от МПВЭС к потребителю.

Для МПВЭС, в зависимости от внешних нагрузок, применяются либо предварительно натянутые вертикальные якорные связи, либо провисающие. Связи представляют собой цепи или стальные тросы или сочетание «цепь – трос».

Установка МПВЭС с полупогружным типом опорного основания осуществляется методом, хорошо отработанным на установке аналогичных нефтегазовых сооружений. МПВЭС принимает водяной балласт и погружается по необходимую ватерлинию. Заранее установленную ЯСУ с помощью вспомогательных судов присоединяют к корпусу МПВЭС. После этого откачивают водяной балласт, обеспечивая МПВЭС рабочую ватерлинию и необходимое натяжение якорных связей.

#### 4. РАСЧЕТНЫЕ ОБОСНОВАНИЯ

##### *Внешние нагрузки на морскую плавучую ветроэлектрическую станцию*

Анализ внешних нагрузок на МПВЭС предусматривает учет воздействия ветра, волнения, течения и льда. Оценка работоспособности МПВЭС связана с изучением ее поведения при различных сочетаниях внешних воздействий. Обычно подобное исследование оказывается достаточно трудоемким и включает в себя реализацию несколько сотен расчетных случаев. В этих условиях для обеспечения процесса проектирования целесообразно опираться только на использование апробированных программных средств, позволяющих быстро выполнять необходимые расчеты внешних нагрузок. В качестве расчетного инструмента может использоваться программный комплекс (ПК) "Anchored Structures" (Сертификат Российского морского регистра судоходства № 12.00874.314 от 20.03.12), разработанный в инженерно-строительном институте СПбПУ [12].

При определении волновых нагрузок на опорное основание ВЭС используются модели волн малой или конечной высоты, реализуемые в ПК "Anchored Structures" [13]. Для ферменных опорных оснований или для оснований, состоящих из конструктивных элементов, имеющих линейные размеры значительно меньше длины набегающих волн, нагрузки от волнения и течения в данном программном комплексе вычисляются с помощью формулы Мориссона [4].

При расчете волновых нагрузок на опорные основания ВЭС, сравнимые с длиной набегающих волн, в ПК "Anchored Structures" используется численная реализация широко известного метода гидродинамических особенностей – метод пространственных источников излучения. Данный метод основан на получении набегающего и отраженного потенциалов волнения, интегрировании результирующих давлений жидкости по смоченной поверхности сооружения и вычисления, таким образом, сил и моментов от волнения.

Расчет сил и моментов от течения на большие опорные основания ВЭС предполагает наличие априорных сведений о площади подводной парусности объекта, сопротивлении при обтекании сооружения под различными углами и реализуется в ПК по известным методологиям [13].

Нагрузки от ветра на ВЭУ вычисляются по методике [14] и затем адаптируются к использованию в ПК "Anchored Structures" путем определения эквивалентных значений площади парусности надводной части МПВЭС и эквивалентного аэродинамического коэффициента сопротивления в различных режимах функционирования МПВЭС.

Ледовые нагрузки на опорное основание ВЭС вычисляются в ПК "Anchored Structures". При этом

моделируется воздействие ровных или торосистых льдов на прямостенные, цилиндрические, наклонные или конусные преграды с использованием квазистатических методик, представленных в [15, 16, 17]. Реализация динамического расчета ледовых нагрузок с помощью численного подхода также выполняется в ПК "Anchored Structures" с использованием авторской методологии [18].

Таким образом, все внешние нагрузки, действующие на МПВЭС, вычисляются с помощью возможностей единого ПК, в котором в дальнейшем выполняется моделирование поведения МПВЭС под действием этих нагрузок.

##### *Моделирование поведения МПВЭС под действием внешних нагрузок*

Моделирование поведения МПВЭС под действием внешних нагрузок реализуется в ПК "Anchored Structures". При этом моделирование выполняется во временной области путем решения системы нелинейных дифференциальных уравнений движения объекта в шести степенях свободы с помощью стандартных методов численного интегрирования:

$$(M + \lambda)\ddot{X}_c + B\dot{X}_c + C_d \dot{X}_c |\dot{X}_c| + C_v(X_c) + F_R(X_c) = \\ = F_{wave} + F_{df} + F_{wind} + F_{cur} + F_{ice},$$

где  $M$  – расширенная матрица масс и моментов инерции МПВЭС;  
 $B$  – расширенная матрица волновых коэффициентов сопротивления МПВЭС;  
 $X_c$  – вектор положения корпуса МПВЭС;  
 $C_d$  – диагональная матрица приведенных вязкостных коэффициентов сопротивления МПВЭС;  
 $\lambda$  – матрица присоединенных масс и моментов инерции МПВЭС, вычисляемая в ПК "Anchored Structures";  
 $C_v(X_c)$  – вектор восстанавливающих сил;  
 $F_R$  – векторреакции системы удержания МПВЭС;  
 $F_{waves}$ ,  $F_{df}$ ,  $F_{winds}$ ,  $F_{cur}$ ,  $F_{ice}$  – расширенные вектора сил волнения, волнового дрейфа, ветра, течения и ледовой нагрузки соответственно, вычисляемые в ПК "Anchored Structures".

Практическая реализация процедуры исследования поведения МПВЭС, основанного на численном расчете внешних нагрузок на нее и математическом моделировании, приводит к созданию конструкций, для которых воздействия волнения и льдов примерно равновелики. Такой эффект достигается путем уменьшения водоизмещения опорного основания для минимизации волновых воздействий и ограничения характерных размеров или формы сооружения на уровне ватерлинии для снижения ледовых сил. Пример подобной конструкции с конусным ледостойким воротником на уровне ватерлинии представлен на рис. 9.

##### *Прочность элементов конструкции*

Типы опорных оснований МПВЭС для ледовых условий мало отличаются от опорных оснований морских плавучих нефтегазовых сооружений. Как для них, так и для МПВЭС существуют опорные основания типа SPAR, TLP, полупогружные опорные основания.

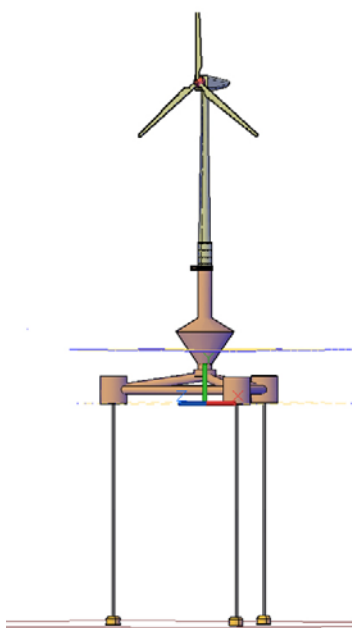


Рис. 9 Модель ледостойкого основания МПВЭС

С учетом этого, и в связи с отсутствием в настоящее время специализированных российских нормативных документов для МПВЭС, на корпус и корпусные конструкции сооружения могут распространяться требования по безопасности и прочности, изложенные в Правилах классификации, постройки и оборудования плавучих буровых установок и морских стационарных платформ Регистра.

Поскольку эксплуатация МПВЭС не требует постоян-

ного присутствия обслуживающего персонала, то эти требования по безопасности и прочности можно считать достаточно консервативными. При расчетных оценках рассматриваются наихудшие сочетания внешних нагрузок, при которых возможны возникновение наибольших напряжений в конструкции.

Наряду с этими требованиями, проектирование, анализ, уточнения и дополнения должны включать определение:

- сочетаний возможных природных воздействий на объект;
- глобальных волновых, ветровых и ледовых нагрузок, необходимых для проверки общей прочности корпуса объекта;
- экстремальных локальных волновых и ледовых нагрузок для проверки местной прочности элементов корпуса объекта;
- циклических глобальных, волновых, ветровых и ледовых нагрузок для проверки усталостной прочности опорных связей и элементов конструкции корпуса объекта в районе их установки;
- циклических локальных волновых и ледовых нагрузок для проверки местной усталостной прочности элементов корпуса объекта;
- допустимых параметров (и их оценку) вибрации конструктивных элементов корпуса объекта при взаимодействии сооружения со льдом.

Также должны использоваться природные параметры (волнение, течение, ветер), указанные в техническом задании.

Определение напряженно-деформированного состояния опорного основания МПВЭС при различных случаях нагружения производится методом

конечных элементов при помощи специализированного программного обеспечения.

## ВЫВОДЫ

Анализ вопросов, связанных с созданием и научным обоснованием ВЭС морского базирования показывает:

1. Парк ВЭУ наземного и морского базирования во всех ведущих промышленных странах мира стремительно развивается.

2. Гигантский ветроэнергетический потенциал, которым обладает Россия, до сих пор практически не используется.

3. Наибольшую актуальность для российских условий имеют мобильные (плавучие) ВЭС, позволяющие обеспечить децентрализованное снабжение оффшорной зоны Арктики и береговой линии Северного морского пути.

4. Основные схемы конструктивного исполнения ВЭУ, а также реалистичные варианты подготовки основания и фундаментов таких ВЭС могут быть почерпнуты из мирового опыта проектирования оффшорных, в том числе плавучих ВЭС.

5. Для практического строительства ВЭС морского базирования необходимо развитие отечественной нормативной базы, в том числе в рамках системы правил Регистра.

6. Разработанная авторами методология расчета поведения МПВЭС в различных условиях эксплуатации при разнообразных сочетаниях внешних воздействий, в том числе ледовых, может являться основой для обеспечения проектирования надежных и безопасных конструкций.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Half-year report The World Wind Energy Association. WWEA 2014. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www.wwindea.org](http://www.wwindea.org).
2. Report 2012 The World Wind Energy Association. WWEA 2013. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www.wwindea.org](http://www.wwindea.org).
3. Елистратов В.В. Возобновляемая энергетика. – 2-е изд., доп. – СПб., Наука, 2013. – 308 с.
4. Большев А.С., Фролов С.А., Чернецов В.А., Купреев В.В. Вопросы проектирования опорных конструкций для морских ветрогенераторов // Гидротехническое строительство. – 2007, – № 5. – С. 31 – 36.
5. Большев А.С., Шхинек К.Н., Филиповская Т.В. Гидротехнические сооружения на континентальном

шельфе России // Гидротехника. XXI. – 2013. – № 4 (16). – С. 48 – 56.

6. Борисенко М.М., Стадник В.В. Атласы ветрового и солнечного климатов России. – СПб.: Изд-во ГГО им. А.И. Воейкова, 1997.

7. Безруких П.П., Ландберг Л., Старков А.Н., Борисенко М.М. Атлас ветров России. Russian Wind Atlas. – М.: Можайск – Терра, 2000. – 560 с.

8. Николаев В.Г., Ганага С.В., Кудряшов Ю.И. Национальный кадастр ветроэнергетических ресурсов России и методические основы их определения. – М., 2008. – 584 с.

9. Елистратов В.В., Борисенко М.М., Сидоренко Г.И. [и др.]. Климатические факторы возобновляемых источников энергии. – СПб.: Наука, 2010. – 235 с.

10. Справочник по ресурсам возобновляемых источников энергии России и местным видам топлива / показатели по территориям / П.П. Безруких, В.В. Елистратов, Г.И. Сидоренко. [и др.] – М.: ИАЦ «Энергия», 2007 – 272 с.

11. XiLua, Michael B. McElroya, Juha Kiviluomac. Global potential for wind-generated electricity. Communicated by James G. Anderson, Harvard University, Cambridge, MA, April 29, 2009.

12. А.С. Большев, С. А. Фролов, М.А. Кутейников Математическое моделирование поведения морских плавучих объектов в программном комплексе "Anchored Structures" // Научно-техн. сб.

Российского морского регистра судоходства. – 2013. – Вып. 36. – С. 68 – 90.

13. Большев А.С., Фролов С.А., Михаленко Е.Б. Математическое моделирование поведения морских плавучих сооружений // Труды СПбПУ. – Изд-во СПбПУ, 2007. – № 502. С. 252 – 274.

14. Елистратов В.В., Панфилов А.А. Проектирование и эксплуатация установок нетрадиционной и возобновляемой энергетики. Ветроэлектрические установки: учебное пособие. – СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2011. – 115 с.

15. СНиП 2.06.04-82\*. Строительные нормы и правила. Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов). – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1986. – 40 с.

16. СП 38.13330.2012. Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов). Актуализированная редакция СНиП 2.06.04-82\*. – М.: Аналитик, 2012. – 111 с.

17. ISO 19906. Petroleum and natural gas industry. Arctic offshore structures. – 2009. – 428 p.

18. Шхинек К.Н., Балагура С.В., Большев А.С., Фролов С.А. Математическое моделирование воздействия ровного льда и торосов с заякоренными плавучими сооружениями типа FPU и платформами типа SPAR // Научно-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – 2009. – Вып. 32. – С. 93 – 108.



## ОБОЗРЕНИЕ: ИМО – НОВЫЕ ПОДХОДЫ

2014 год в ИМО начался с коренной перестройки внутренней структуры подкомитетов. Вместо 9 существовавших прежде (BLG, COMSAR, DE, DSC, FP, SLF, FSI, STW, NAV) в новой структуре их 7 (CCC, III, HTW, NCSR, PPR, SDC, SSE). Сфера деятельности каждого подкомитета сориентирована под круг запросов родительских комитетов.

Начало 2014 года принесло перемены и в подходы ИМО к продвижению результатов своей деятельности: Генеральный секретарь ИМО Койджи Секимизу (Koji Sekimizu) объявил новый курс на глобальное и эффективное осуществление всех конвенций ИМО.

Общеизвестно, что множество одобренных конвенций, разрабо-

танных в ИМО и одобренных участниками различных конференций, по тем или иным причинам еще не вступило в силу. Причем сроки ожидания порой складываются в десятилетия, а документы, на которые были затрачены усилия и потрачены средства, до сих пор так и не начали приносить пользу. Генеральный секретарь призвал всеми возможными способами привлечь внимание к одобренным, но не действующим документам и объявил тему Всемирного дня моря 2014 года – «Конвенции ИМО: эффективное осуществление».

На сегодня основными проблемными документами являются:

- Международная конвенция о контроле судовых балластных вод и

осадков и управлении ими 2004 года (BWM Convention 2004);

- Гонконгская международная конвенция по безопасной и экологически рациональной утилизации судов 2009 года (2009 HONG KONG Convention);

- Протокол 1993 года к Торремолиносской международной конвенции о безопасности рыболовных судов (SFV Protocol 1993);

- Кейптаунское соглашение 2012 года об осуществлении положений Протокола 1993 года к Торремолиносской международной конвенции по безопасности рыболовных судов 1977 года (2012 Cape Town Agreement 2012);

- ряд других конвенций и некоторых поправок, требующих дополнительного присоединения.



## АТОМНЫЕ СУДА

### **В.И. Королёв**

канд. техн. наук., проф.,  
ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова



### **А.Ю. Ластовцев**

канд. техн. наук., проф.,  
ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова



## ПЛАНОМЕРНОЕ ПОВЫШЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ АТОМНЫХ ЛЕДОКОЛОВ – АКТУАЛЬНОЕ ТРЕБОВАНИЕ ВРЕМЕНИ

**З**начительную роль в обеспечении стратегических, экономических и политических интересов России в Арктике играют атомные ледоколы. Россия и сегодня обладает техническим преимуществом в области постройки и эксплуатации этих судов, уже более 55 лет бороздящих ледовые просторы Арктики.

Создание экологически чистой и безопасной ядерной энергетической установки (ЯЭУ) для атомных ледоколов с начала их появления и по сегодняшний день – приоритетная цель при проектировании, изготовлении и эксплуатации этих судов. Накопленный опыт показал, что даже высокие требования к качеству изготовления и эксплуатации ЯЭУ не способны исключить аварийные ситуации, что необходимо формирование особого подхода к ядерному объекту как к объекту повышенной опасности, требующему применения специальных мер и систем обеспечения безопасности, а также формирование особого мировоззрения эксплуатационного персонала.

Начиная с атомного ледокола «Ленин» и на последующих проектах ставилась задача повысить безопасность ЯЭУ и ледокола в целом. При этом совершенствовалась нормативная документация,

системы обеспечения безопасности, основное оборудование и управление ЯЭУ.

Одним из основных элементов обеспечения безопасности является разработка норм безопасности и государственный надзор за их соблюдением. Важнейшую роль в этом процессе принадлежит Российскому морскому регистру судоходства, разработавшему Правила классификации и постройки атомных судов и плавучих сооружений [1]. Данный документ является обязательным при постройке атомных ледоколов.

Большое значение для повышения безопасности ЯЭУ имеет предупреждение негативных последствий от возможных аварий. В этой связи на уровне проекта предусматривается возможность возникновения аварий – проектная авария, для которой проектом определены исходные события, конечные состояния, системы безопасности, организационные мероприятия, а также разрабатывается комплекс мер, минимизирующих возможные последствия от такой аварии. Однако в процессе эксплуатации может возникнуть и маловероятная авария, не предусмотренная проектом. Такая авария классифицируется как запроектная авария. В этом случае принимаются

превентивные меры по ее недопущению в дальнейшем на действующих и вновь проектируемых судах и, если необходимо, разрабатываются и вводятся новые системы безопасности.

Запроектная авария может также возникнуть из-за частичной или полной не отработки проектных систем безопасности. И в этом случае принимаются меры по предотвращению нарушений нормальной эксплуатации и сведению к минимуму возможности перерастания аварийных ситуаций в аварию, а проектных аварий в запроектные. Защита при запроектных авариях обеспечивается за счет управления авариями для предупреждения их опасного развития и ограничения последствий. В действие вводится весь арсенал имеющихся средств по специально отработанным сценариям. На рис. 1 показана блок-схема предупреждения негативных последствий от аварий на ЯЭУ.

Повышение безопасности атомных судов в большей мере связана с развитием защитных и локализирующих систем безопасности. На рис. 2 показаны основные защитные и локализирующие системы безопасности, которые были изначально предусмотрены проектом

(сплошные линии) и появились (пунктирные линии) в процессе постройки новых атомных ледоколов.

Начиная с атомного ледокола «Россия», на строящиеся атомные ледоколы устанавливается штатная система аварийной проливки активной зоны по двум независимым каналам, совершенствуются конструктивные решения, увеличивающие время нахождения активной зоны «под заливом».

После возникновения аварийной ситуации на атомном ледоколе «Сибирь», начиная с атомного ледокола «Ямал», устанавливается штатная система аварийного охлаждения активной зоны при полном обесточивании ледокола – система «Цистерна аварийного расхолаживания» (ЦАР).

На всех действующих и проектируемых ледоколах внедряется система ввода жидкого поглотителя. Это дополнительное средство введения отрицательной реактивности в случае запроектного заклинивания механических средств введения отрицательной реактивности.

Аварии на АЭС «Три Майл Айленд» и «Фукусима» показали, что у ядерного реактора должны быть

различные по принципу действия средства охлаждения активной зоны с высокой вероятностью их ввода в аварийной ситуации. На проекте ледокола нового поколения предусмотрена дополнительная система заполнения кессона реактора водой в случаях прекращения принудительной циркуляции теплоносителя.

При выполнении систем безопасности целесообразно максимально использовать пассивные принципы функционирования. Так на атомном ледоколе нового поколения аварийный теплоотвод от реакторной установки (РУ) обеспечивается с помощью пассивной системы аварийного расхолаживания с использованием воздушного теплообменника-конденсатора.

При проектировании новых РУ атомных ледоколов необходимо максимально повышать их безопасность. Для этого используются физические закономерности объекта управления, улучшаются теплофизические характеристики реактора, вводятся дополнительные конструктивные усовершенствования, создаются предпосылки для использования альтернативных программ управления ЯЭУ (рис. 3).

В проектах РУ широко используются свойства внутренней самозащитности, когда применяются практически обратные физические связи

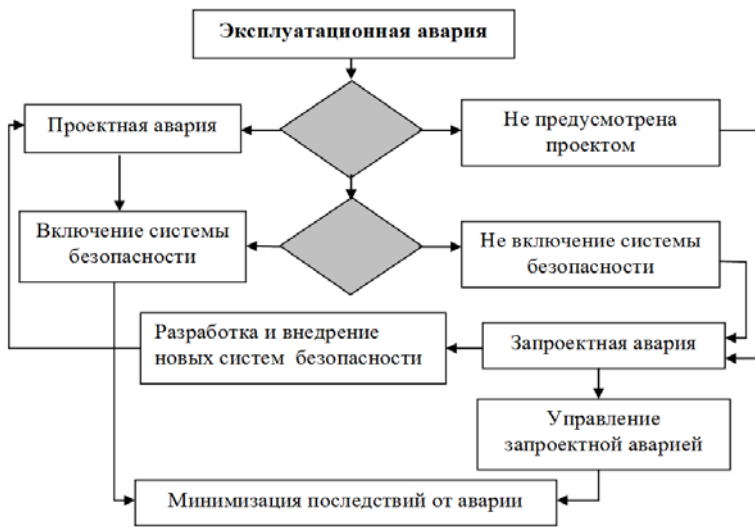


Рис. 1 Блок-схема предупреждения последствий от аварии на ЯЭУ



Рис. 2 Состав основных защитных и локализирующих систем безопасности



Рис. 3 Проектные решения, повышающие безопасность РУ атомных ледоколов

объекта управления. Одна из важнейших физических закономерностей – отрицательный температурный (паровой, мощностной) эффект реактивности реактора. Это свойство реактора не допускает возможности его неконтролируемого разгона в период работы реактора на мощности.

Для повышения надежности охлаждения активных зон в аварийных ситуациях необходимо использовать системы охлаждения, работающие по принципу естественной циркуляции, которая возникает за счет разницы в весе опускающего и поднимающего столбов жидкости [2].

Разработка новых активных зон, которые сохраняли бы герметичность в течение назначенного ресурса, была основной задачей первого этапа их совершенствования. В основном эта задача была достигнута и в дальнейшем была выдвинута новая – планомерное увеличение энергоресурса и энергозапаса активной зоны атомных судов. Одной из сторон этой проблемы является улучшение теплофизических характеристик реактора.

Повышение надежности новых активных зон для атомных судов связывают, прежде всего, со снижением плотности теплового потока в ней и исключением поверхностного кипения на наиболее нагруженных тепловыделяющих элементах (ТВЭЛ). Также ставится задача постепенного увеличения длительности эффективной кампании при снижении обогащения топлива [3 – 8].

В аварийных ситуациях с нарушением принудительного охлаждения активной зоны – обесточивание или поломка циркуляционных насосов первого контура (ЦНПК) – большую роль в обеспечении безопасности играет теплоаккумулирующая способность активной зоны и склонность РУ к естественной циркуляции.

Опыт эксплуатации ядерных установок атомных ледоколов выявил значительное количество ошибочных проектных решений. Обобщение этого опыта позволило

на новых проектах РУ выполнить ряд конструктивных доработок (см. рис. 3).

Одной из недоработок в проектах атомных ледоколов с двумя РУ была общая защитная оболочка, что не позволяло обеспечивать автономность реакторов при течи теплоносителя из одной установки [9]. В новых проектах каждая РУ имеет индивидуальные защитные оболочки.

Важным решением в проекте атомного ледокола нового поколения является отказ от двух статорных обмоток ЦНПК и увеличение допустимой температуры гидродинамических подшипников [2]. Это повысило надежность ЦНПК – важнейшего элемента безопасности РУ в целом.

На атомных ледоколах совершенствуются пассивные системы и устройства безопасности. Например, при обесточивании приводов рабочие органы системы управления и защиты опускаются в активную зону под действием пружин (аварийная защита) и собственного веса (компенсирующие группы). Арматура системы аварийного расхолаживания, аварийного охлаждения и снижения давления в защитной оболочке выполняется нормально-открытого действия при обесточивании пневмораспределителей.

Особое значение при проектировании и эксплуатации РУ придается недопущению выхода радиоактивного теплоносителя за пределы циркуляционного контура. Для этого обеспечивается минимально возможная протяженность трубопроводов, минимизируется количество арматуры, стыковых сварных и фланцевых соединений. При этом реализуется концепция «течь перед разрушением», т.е. исключается возможность хрупкого разрушения трубопроводов. При существующей системе диагностики на атомных судах с использованием средств радиационно-технологического контроля можно выявить газовую течь, когда теплоноситель еще не выходит за пределы контура.

Увеличение объема теплоносителя в циркуляционных петлях, одновременно с совершенствованием средств, ограничивающих истечение теплоносителя из малых патрубков, позволяет увеличить время нахождения активной зоны «под заливом». В проекте атомного ледокола нового поколения время осушения активной зоны в пассивном сценарии аварии с течью теплоносителя доводится до 10 ч.

С введением частотного регулирования ЦНПК (ГЦН – главного ЦН) возникает новый подход к эксплуатации при наличии штатной и альтернативной программ управления ЯЭУ атомного судна [10 – 13]. Для рационального использования появив-



шейся возможности необходимо учитывать определяющие факторы по всем критериям сопоставления для применяемых программ [14]. Основные преимущества и недостатки сопоставляемых программ проявляются в первую очередь при работе на энергетических уровнях мощности и в режиме дежурства (стоянка в ожидании караванов). При этом необходимо получить наилучшие показатели для наиболее длительных по времени режимов эксплуатации. Именно в этом случае можно ожидать наибольший выигрыш, как по повышению надежности оборудования, так и по экономии топлива.

Каждая программа может иметь преимущество в определенном поддиапазоне мощностей, при разных вариантах технического использования ЯЭУ и дифференцированных условий плавания. Необходимо производить оптимальный выбор решения (стратегии) в многофакторной системе.

На рис. 4 показана блок-схема выбора стратегии управления с учетом основных критериев сопоставления.

Программы рассматриваются по основным группам критериев сопоставления: ядерная безопасность (надежность оборудования), маневренные и экономические показатели.

Выделяются несколько блоков факторов: тепло-техническая надежность активной зоны; долговечность оболочек ТВЭЛ; термоциклическая прочность корпусных элементов; надежность работы систем РУ в условиях маневрирования РУ; эффективность использования энергозапаса активной зоны. В каждом блоке факторов содержатся расчетные коды, которые

количественно или качественно характеризуют данный блок программ управления. Вычисленные значения по группам факторов с учетом условий эксплуатации передаются в блок выбора стратегии управления. Здесь осуществляется выбор стратегии, заключающийся в формировании рекомендации оператору по применению данной программы управления и выбору необходимого запаса на маневрирование

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Правила классификации и постройки атомных судов и плавучих сооружений. – Российский морской регистр судоходства, 2008.

2. Королев В.И., Ластовцев А.Ю., Малышев В.А. Организация циркуляции сред для нормального и аварийного охлаждения активных зон атомных плавучих объектов: учеб. пособие. – ГМА им. адм. С.О. Макарова, 2012. – 140 с.

3. Королев В.И., Лошаков И.И. Исследование режима поверхностного кипения в активных зонах транспортных реакторов // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2004. – № 3. – С. 100 – 107.

4. Королев В.И. Преодоление режима пристенного кипения на поверхности ТВЭЛ в водо-водяных реакторах малой мощности за счет выбора конструктивных и теплофизических характеристик активной зоны // Эксплуатация морского транспорта: Тр. ГМА им. адм. С.О. Макарова. – 2008. – № 2. – Изд-во ГМА. – С. 53 – 59.

5. Королев В.И., Ластовцев А.Ю. Прогнозирование конструктивных характеристик активных зон ядерных реакторов малой мощности для надводных плавучих объектов // Эксплуатация морского транспорта: Тр. ГМА им. адм. С.О. Макарова. – 2008. – № 2. – Изд-во ГМА. – С. 47 – 53.

6. Королёв В.И., Ластовцев А.Ю. Проектирование активных зон реакторов малой мощности с условием недопущения поверхностного кипения на оболочках ТВЭЛ // Эксплуатация морского транспорта: Тр. ГМА им. адм. С.О. Макарова. – 2010. – № 4 (62). – С. 67 – 71.

7. Королёв В.И. Обобщающий эксплуатационно-конструктивный параметр для водо-водяных реакторов// Изв. вузов: сер.: Ядерная энергетика. – 2009. – № 3. – С. 106 – 111.

8. Королев В.И., Ластовцев А.Ю. Оценка эксплуатационно-конструк-

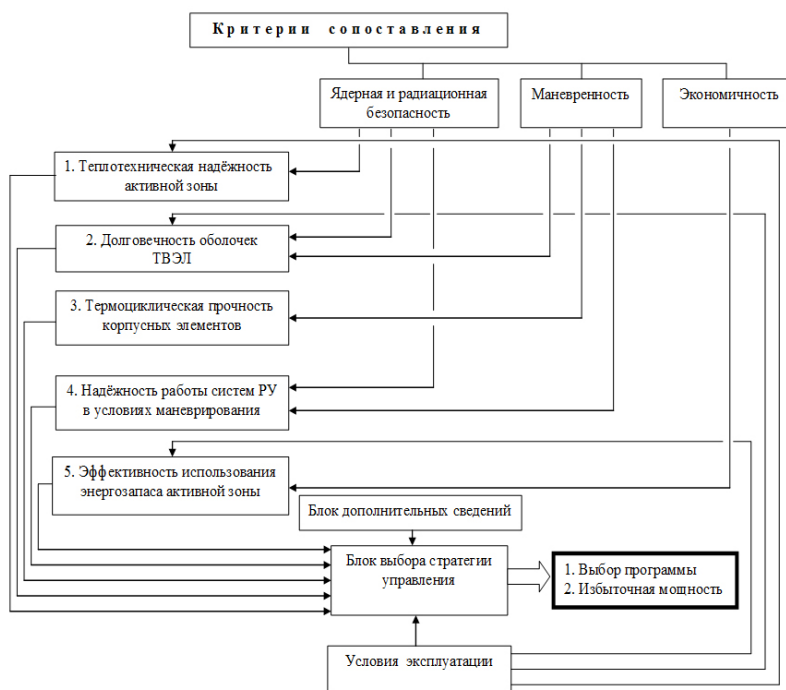


Рис. 4 Блок-схема выбора стратегии управления

тивных показателей при проектировании активных зон водо-водяных реакторов малой мощности для плавучих объектов с ЯЭУ // Эксплуатация морского транспорта: Тр. ГМА им. адм. С.О. Макарова. – 2010. – № 1(59). – Изд-во ГМА. – С. 56 – 62.

9. Королёв В.И., Ластовцев А.Ю., Малышев В.А. Особенности проектирования атомных ледоколов нового поколения и кадровое обеспечение флота с ядерными энергетическими установками // Морской Вестник. – 2005. – № 1(3). – С. 21 – 24.

10. Королёв В.И. Основы управления судовыми реакторными установками при работе на мощности. – СПб.: ГМА им. адм. С.О. Макарова. – 2003. – 106 с.

11. Королёв В.И., Ластовцев А.Ю., Князевский К.Ю. Особенности регулирования судовой реакторной установки при изменении производительности ЦНПК //

Тр. ГМА им. адм. С.О. Макарова. – 2005. – Вып. 44. – СПб.: Наука, 2005. – С. 235 – 242.

12. Королёв В.И., Ластовцев А.Ю. Программы и алгоритмы управления реакторной установкой атомных судов // Тр. ГМА им. адм. С.О. Макарова – 2006. – Вып. 45. – СПб.: Наука, 2006. – С. 208 – 216.

13. Королёв В.И., Ластовцев А.Ю., Перовицков С.Г. Повышение безопасности судов с ЯЭУ за счет выбора рациональной программы изменения мощности реакторной установки // Тр. Межд. науч.-практ. конф. Т 4. – СПб. – СПГУВК, 2003.

14. Королёв В.И., Ластовцев А.Ю., Якунин В.И. Повышение эффективности использования ядерного топлива на атомных ледоколах // Тр. ГМА им. адм. С.О. Макарова. – 2011. – № 4(66). – Изд-во ГМА. – С. 47 – 52.



## ОБОЗРЕНИЕ: КНИЖНАЯ ПОЛКА

С.В. Латуховым в соавторстве с О.А. Изотовым, А.В. Кириченко и В.А. Никитиным подготовлена монография «Технология и безопасность транспортных операций. Обработка судов в необорудованных пунктах российской Арктики», в которой учтены требования и положения всех соответствующих стандартов и действующих нормативных документов. Книга адресована курсантам, студентам, преподавателям высших и средних профессиональных учебных заведений водного транспорта, экипажам судов при плавании в арктических морях, специалистам ООО «Газфлот», ОАО «Росшельф», ОАО «Лукойл». В первой части монографии рассмотрена общая технология перегрузочных работ на разрушенный причал, в рейдовых условиях, на необорудованный берег и т.д. Вторая часть посвящена обработке судов во льдах.

Авторским коллективом, в состав которого входят А.В. Кириченко, С.В. Латухов, В.А. Никитин и др., издана

книга «Организационно-технические основы безопасности судов и портовых средств», адресованная курсантам и студентам учебных заведений высшего и среднего профессионального образования морского транспорта, сотрудникам органов управления судоходных компаний, морских портов, экипажам морских судов, стационарных морских платформ, сотрудникам служб безопасности мореплавания, должностным лицам компаний, командного состава судов и портовых средств.

В монографии рассматриваются вопросы, связанные с обеспечением безопасности морского судоходства в связи с различными деструктивными факторами, в том числе социальными – пиратством, морским разбоем, терроризмом на море и другими противоправными действиями, направленными против судов, их экипажей, портов, их персонала и грузов.

В первой главе монографии произведен терминологический анализ понятия «безопасность на транспорте». Вторая глава посвя-

щена Международному кодексу по охране судов и портовых средств и ориентирована на исполнителей руководящих документов. В третьей главе уделяется внимание техническим организационным моментам, связанным с охраной судов, находящихся в портах, на рейдах, и самих портов. В ней показано, как из отдельных элементов создавать взаимосвязанные, интегрированные в систему управления транспортным предприятием системы безопасности (глава ориентирована на руководителей портового звена).

Для справки: Латухов Сергей Васильевич – капитан дальнего плавания, доктор географических наук, профессор МАНЭБ, почетный работник морского флота, почетный работник высшего образования, начальник кафедры «Безопасность жизнедеятельности» Государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова, эксперт ИМО и МОТ, председатель секции «Безопасность мореплавания» НТС РС.



## ПРОБЛЕМЫ ЧЕЛОВЕЧЕСКОГО ФАКТОРА

**И.М. Белов**

**Л.М. Мацевич**

д-р мед. наук, проф.

**А.Б. Разлетова**

канд. техн. наук

ФГУП «Крыловский

государственный научный центр»



### ОЦЕНКА ВРЕДНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ВИБРАЦИИ НА ОРГАНИЗМ ЛЮДЕЙ НА СУДНЕ В ЛЕДОВЫХ УСЛОВИЯХ

Освоение нефтегазовых месторождений на арктическом шельфе России требует расширения районов эксплуатации российского арктического флота и обеспечения регулярного судоходства не только на трассах Северного морского пути, но и в северной части арктических морей. Опыт показывает [1, 2], что корпуса судов в арктических условиях подвержены интенсивной вибрации, которая может снижать трудоспособность членов экипажа и при длительном воздействии создавать реальную угрозу их здоровью. В связи с этим актуальными задачами являются применение дополнительных, по сравнению с традиционными, средств снижения вибрации и разработка прогрессивных подходов к нормированию вибрационного воздействия на экипаж в ледовых условиях.

Вибрация, наряду с другими физическими факторами, в число которых входят шум, электромагнитные поля, температура, освещенность, определяет качество среды обитания на судах. Пребывание на судах в специфических производственных, бытовых и нестабильных природных условиях способствует возникновению у экипажа стрессовых состояний и значительному нервно - эмоциональному напряжению, что приводит не только к нарушению здоровья у моряков, но и увеличивает риск возникновения аварийных ситуаций. Медико-биологические исследования показывают, что при воздействии

вибрации у человека наблюдаются изменения, сопровождающиеся нарушением восприятия и оценки времени, снижением скорости и точности переработки информации. Установлено, что низкочастотная вибрация способна вызывать нарушение координации движений, наиболее выраженные при частотах 4 – 11 Гц [3, 4]. Характер воздействия вибрации, направленность физиологических сдвигов различных систем организма человека определяются комплексом показателей, в число которых входят интенсивность и спектральный состав вибрации, расположение тела человека, а также физиологические свойства его организма.

На судах интенсивность и частотный диапазон вибрации, воздействующей на плавсостав, в значительной степени определяется как работой судового оборудования и конструктивными особенностями корпуса судна, так и условиями плавания судна, характером взаимодействия его с окружающей средой.

Оценка качества (вредности) судовой среды в настоящее время выполняется, в соответствии с принятой в гигиене труда методикой [5], по величине превышения фактических уровней вибрации при эксплуатации судна над предельно-допустимыми уровнями (ПДУ). Уровни вибрации, соответствующие ПДУ, считаются допустимыми, хотя они и не безразличны для человека. В случае превышения ПДУ вибрация рассматривается как

неблагоприятный фактор, степень вредности которого определяется ее уровнем. Она может вызывать как незначительные изменения в организме, так и приводить к развитию профессиональных заболеваний вплоть до утраты трудоспособности.

Трудовым кодексом Российской Федерации и иными нормативными правовыми актами, содержащими нормы трудового права, за работу во вредных условиях предусматривается ряд льгот и компенсаций, в число которых входит сокращенная рабочая неделя, дополнительный оплачиваемый отпуск, повышенный размер оплаты труда, ранний выход на пенсию. Одновременно увеличивается также величина страховых взносов работодателя.

Действующая в настоящее время система гигиенического нормирования вибрации допускает следующие принципы оценки вибрационного воздействия на человека:

- нормирование ПДУ вибрации в типовых условиях эксплуатации объекта в конкретный момент времени;
- нормирование суточной дозы вибрации, определяемой величиной вибрации и временем ее воздействия.

Существующие технологии проектирования судов обеспечивают выполнение требований по ПДУ [6, 7] вибрации при плавании их на чистой воде, однако в тяжелых ледовых условиях в ряде случаев, особенно для судов ледового плавания категорий **Arc7–Arc9** и ледоколов, наблюдается превышения ПДУ в жилых помещениях, находящихся в надстройке. Величина такого превышения носит вероятностный характер и в значительной степени зависит от толщины и сплоченности ледового покрова. Вследствие ярко выраженной случайности процессов в течение одних и, тем более, многих суток существующая оценка вибрационного воздействия на соответствие ПДУ на вышеуказанных судах является некорректной.

В таких условиях более эффективным подходом представляется оценка вибрации по величине недельных экспозиций, определяемых по данным эксплуатационного мониторинга с помощью стационарно установленной аппаратуры отдельно за каждую неделю в течение рабочего (межотпускного) периода экипажа.

Для эксплуатационного мониторинга следует выбирать ограниченное число контрольных точек, расположенных в жилых и рабочих зонах в местах, доступных для прокладки кабельных трасс и установки акселерометров (например, в шахте трапов на ярусах надстройки и переборках машинного отделения).

Эксплуатационный мониторинг должен осуществляться в режиме автоматического непрерывного накопления данных об уровнях и времени действия вибрации.

Входными данными для расчета недельной экспозиции являются:

- скорректированные по частоте среднеквадратические уровни виброускорений  $a_w$ , определяемые в контрольных точках за время 120 с по формуле

$$a_w = \left( \frac{1}{120} \int_0^{120} a_w^2(t) dt \right)^{1/2}, \text{ м/с}^2, \quad (1)$$

где  $a_w(t)$  – текущее значение скорректированного ускорения как функция времени  $t$ ;

- определенные во время приемо-сдаточных испытаний передаточные коэффициенты  $k_{ij}$  между контрольными точками и точками в центре нормируемых помещений, образующих локальные группы (например, между точкой в шахте трапа на 1-м ярусе надстройки и точками в центре помещений этого яруса, в которых контролировалась вибрация):

$$k_{ij} = a_{wi} / a_{wj}, \quad (2)$$

где  $a_{wi}$ ,  $a_{wj}$  – скорректированные по частоте среднеквадратические уровни виброускорений, измеренные соответственно в  $i$ -м помещении и  $j$ -й контрольной точке.

Суточная экспозиция ускорения для члена экипажа, находящегося в локальной  $s$ -й группе помещений, определяется по формулам:

$$a_{\text{экрв(сут)}}^s = \sqrt{\left( \sum_{i=1}^{720} (a_{\text{ср}}^s)^2 \right) / 720}; \quad (3)$$

$$a_{\text{ср}}^s = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_{wi}^s, \quad (4)$$

где  $n$  – количество помещений, отнесенных к  $s$ -й локальной группе помещений.

Число 720 в формуле (3) означает количество замеров длительностью по 120 с в сутки.

Накопленная недельная экспозиция равна

$$a_{\text{экрв(нед)}}^s = \sum_{i=1}^7 a_{\text{экрв(сут)}}^s. \quad (5)$$

Накопленная недельная экспозиция сравнивается с допустимой величиной. В случае превышения допустимой недельной экспозиции принимаются компенсационные меры. Разработка системы таких мер, осуществляемых в межрейсовый период для снижения негативного влияния вибрации на организм членов экипажа, включая реабилитационные, является неотъемлемой задачей комплекса действий по обеспечению нормальных условий труда и отдыха моряков.

Допустимая суточная экспозиция для члена экипажа складывается из трех парциальных 8-часовых экспозиций, соответствующих времени пребывания члена экипажа на рабочем месте в соответствии с должностными обязанностями (в группе помещений  $s$ ), активного отдыха и сна в жилом помещении, принадлежащем, допустим, к  $p$ -й локальной группе.

Пребывание в общественных помещениях, в силу кратковременности, отдельно не выделяется. Допустимая суточная экспозиция определяется исходя из постоянного 8-часового воздействия скорректированного виброускорения, допускаемого ГОСТ Р ИСО 6954 для помещений класса В (отдых, сон) и класса С (работа). Допустимая недельная экспозиция определяется как сумма допустимых суточных экспозиций по формуле (5).

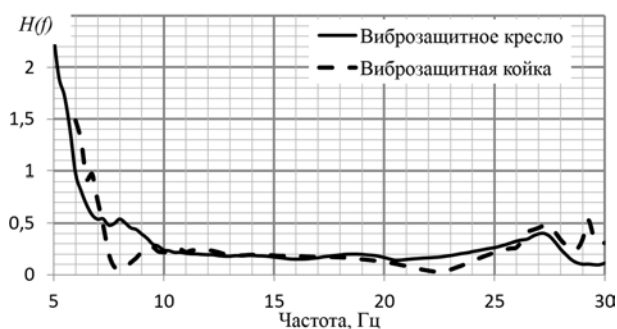
Расчет недельной экспозиции выполняется с помощью встроенного программного обеспечения. Съём информации о накопленной экспозиции производится в конце межотпускного периода экипажа (для морских судов – обычно не более четырех месяцев).

Важной составляющей в комплексе мероприятий по обеспечению нормальных вибрационных условий обитания в судовых помещениях является применение средств локальной (индивидуальной) виброзащиты экипажа. Одной из разновидностей указанных средств является виброзащитная мебель, в частности, кресла и койки. В результате выполнения комплекса экспериментальных и расчетных исследований совместно с ООО «ЦСМ «РАПС», были разработаны и изготовлены опытные образцы указанных средств, снижающие коэффициент передачи вибрационного воздействия на тело человека в октавах 8 и 16 Гц не менее, чем в два раза. Передаточные характеристики опытных образцов (рисунок) вычислены по формуле

$$H_i(f) = \frac{G_{xy}(f)_i}{G_{xx}(f)_i}, \quad (6)$$

где  $G_{xy}(f)_i$  – взаимный спектр ускорений на контактной поверхности тела человека и ускорений  $i$ -й точки опорного контура;

$G_{xx}(f)_i$  – автоспектр ускорений  $i$ -й точки на опорном контуре.



Передаточные характеристики опытных образцов виброзащитной мебели

## ВЫВОДЫ

Снижение уровня вибрационного воздействия на экипаж, в дополнение к традиционным средствам снижения вибрации, может быть достигнуто за счет использования средств локальной виброзащиты.

Разработка системы компенсационных мер, проводимых в межрейсовый период для снижения негативного влияния вибрации на организм членов экипажа, включая реабилитационные, в рамках предлагаемого подхода является неотъемлемой частью обеспечения нормальных условий труда и отдыха моряков.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. D.A. Boudanov, Y.A. Nikolsky. Ship hull vibrations underway in ice. Proc. of Int. Conf. "On Development and Commercial Utilization of Technologies in Polar Region", St. Petersburg, 1996.
2. I. Belov, N. Shiridonov Features of ship vibration in ice operation conditions. Proc. of 22th Int. Conf. ISOPE, Rhodes, Greece, 2012.
3. Суворов Г.А., Шкаринов Л.Н., Денисов Э.И. Гигиеническое нормирование производственных шумов и вибраций. – М.: Медицина, 1984. – С. 24 – 149.
4. Ломов О.П. Судовая гигиена. – Л.: Медицина, 1993. – С. 136 – 144.
5. Р 2.2.2006-005. Руководство по гигиенической оценке факторов рабочей среды и трудового процесса. Критерии и классификация условий труда.
6. Правила классификации и постройки морских судов. – Т.1. – СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2013.
7. СН 2.5.2.048–96. Уровни вибраций на морских судах.
8. ГОСТ Р ИСО 6954-2009. Вибрация. Руководство по измерению вибрации и оценке ее воздействия на человека на пассажирских и торговых судах.



**И.И. Костылев**

д-р техн. наук, проф.

**Ю.Н. Мясников**

д-р техн. наук, проф.

**В.А. Петухов**

д-р техн. наук, проф.



ГУМРФ им. адм. С.О.Макарова

## БЕЗОПАСНОСТЬ МОРЕПЛАВАНИЯ И ПРОБЛЕМЫ ПОДГОТОВКИ МОРСКИХ ИНЖЕНЕРОВ

Светлой памяти профессора  
Валерия Александровича Петухова

Теория без практики мертва и бесплодна... Для  
теории главным образом нужны знания, а для  
практики, сверх того, и умение.

*А.Н. Крылов*

**О**беспечение безопасности мореплавания остается не только актуальной проблемой, но становится основным конкурентным преимуществом на фрахтовом рынке.

На международных семинарах по проблемам обеспечения качественного судоходства, регулярно проводившихся Российским морским регистром судоходства, выделялись два основных компонента, определяющих безопасную эксплуатацию судов: техническое состояние (возраст) механического и навигационного оборудования судов и уровень знаний и практических навыков судового экипажа (человеческий фактор).

Задачей авторов этой статьи было высказать свою точку зрения по исключительно важному для морской индустрии вопросу – созданию качественного кадрового потенциала для экипажей судов и береговой инфраструктуры.

За последние десятилетия в мировом флоте произошли коренные технические изменения, касающиеся управления безопасной эксплуатацией судов. В первую очередь это – автоматизация процессов управления и централизация процедур контроля за правильным функционированием судовой энергетической установки (СЭУ) и технических средств судна. Положительный эффект этой эволюции несомненен, но явно проявляются и негативные моменты, усиливающие роль человеческого фактора. Во-первых, всякая автоматизация ведет к усложнению объекта, и обеспечение его надежности требует дополнительных серьезных усилий. Во-вторых, и это главное, автоматизация процессов управления и контроля реализует вожделенную мечту судовладельца – сокращение экипажа и, в первую очередь, машинной команды. Последнее ведет к утрате органолептической

составляющей определения текущего технического состояния оборудования СЭУ, и, как правило, усиливает значение человеческого фактора. Этим объясняется стабильность такого показателя, как степень влияния экипажа на возникновение аварийных ситуаций в море, проявляющаяся в 80% аварий.

Понятно, что высокий уровень автоматизации процессов управления, контроля и диагностики требует специалистов, владеющих междисциплинарными технологиями.

Отвечают ли программы и методики подготовки морских инженеров современному уровню развития судостроения и требованиям международных морских организаций в области обеспечения надежного и безопасного мореплавания? К сожалению, они попали под пресс новых федеральных государственных образовательных стандартов, в которых глубокие инженерные знания заменены компетенциями. Введение компетентного подхода устанавливает приоритет семинарских и практических занятий перед лекциями. А если учесть и низкий уровень школьного образования и интернетоманию у современной молодежи, становится очевидным низкий уровень теоретических знаний у выпускников морских вузов. К этому следует добавить перманентное падение уровня практической подготовки курсантов за последние 20 лет, связанное, с одной стороны, со старением лабораторной базы, и с другой – с трудностями организации плавательской практики курсантов в условиях рыночной экономики, когда судоходные компании не проявляют особого интереса к поддержке морского вуза.

Может ли вуз в одностороннем порядке в новых производственных отношениях обеспечить требуемый уровень знаний и умений корпуса дипломируемых

морских инженеров? К сожалению, необходимых оснований для положительного ответа нет. Искать последний необходимо в единении усилий морских вузов и судоходных компаний. Этому способствует и принятая Минобрнауки РФ отраслевая подчиненность транспортных вузов, что является в значительной степени заслугой Министерства транспорта РФ. Отсюда следует, что Минтранс и дальше должен стать инициатором разработки нормативной базы.

На данный момент в России имеются три основных университетских комплекса, обеспечивающих командными кадрами морской флот. Следуя принципу дальнейшей интеграции образования и производства, необходимо, на наш взгляд, рассмотреть вариант создания региональных кластеров водного транспорта. В Санкт-Петербурге этому уже есть примеры: Арктический кластер (идея Правительства СПб), Северо-Западный Аэрокосмический кластер (идея Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения) и др.

В региональный кластер водного транспорта должны войти не только учебные заведения и судоходные компании, но и научные организации. Объединение усилий участников даст дополнительный импульс развитию образованию, отраслевой науке с обеспечением кадрового резерва не только плавсостава, но и береговых служб, а также проектных организаций, где тоже есть проблемы с кадрами. Ключевым звеном здесь может быть Российский морской регистр судоходства.

Присутствие Регистра в образовательном процессе подготовки корпуса морских инженеров более чем значимо, так как Регистр контролирует состояние отечественного флота, независимо от того, под каким флагом ходят его суда, и располагает информацией о состоянии мирового флота.

В этой связи уже сегодня, независимо от решения Минтранса, полезно, на наш взгляд, использовать практику базовых кафедр и организовать при Регистре базовую кафедру «Перспективные междисциплинарные технологии в морском образовании», как интегрированную образовательную структуру ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова.

Цель создания кафедры – интеграция морских учебных заведений и судоходных компаний при участии Регистра в деятельности по следующим основным направлениям:

- безопасность мореплавания, в том числе проблемы энергетической и экологической безопасности, энергоресурсные и энергоэкономические проблемы;
- инновационные технологии в пропульсивном комплексе морского судна;
- совершенствование программ подготовки морских инженеров, адекватных современным вызовам мирового судостроения, на базе совместных научных исследований по приоритетным направлениям иннова-

ционного развития отечественного кораблестроения;

- организация и реализация совместно с судоходными компаниями плавательской практики курсантов учебных заведений отрасли;

- адресная подготовка специалистов корпуса морских инженеров;

- осуществление мероприятий по повышению научного потенциала преподавателей вузов и привлечение ведущих специалистов судоходной индустрии к преподавательской работе;

- ведение активной рекламной компании по восстановлению престижа морской профессии.

На последнем следует остановиться особо. Сегодня много говорят и пишут о падении престижности морской профессии. Причин для этого достаточно и, прежде всего, это последствия образовательных реформ, которые отбросили некогда передовую систему образования нашей страны на далеко не первое место в рейтингах лучших систем образования; ликвидация военно-морских кафедр в морских учебных заведениях; физическое старение флота; невысокий уровень заработной платы моряков. В таких условиях моряки предпочитают иностранные судоходные компании, то есть получается, что нами готовятся командные кадры для зарубежного флота, чем наносится экономический ущерб нашей стране в целом, а в перспективе и каждому моряку.

Следует отметить, что продолжающиеся образовательные реформы имеют как минусы, так и плюсы. Оправдывает себя процесс создания вертикально-интегрированных образовательных комплексов, объединение реализации программ высшего и среднего профессионального образования. Горизонтальная интеграция на примере объединения СПбУВК и ГМА им. адм. С.О. Макарова является положительным примером с позиций более оптимального использования кадрового потенциала и материальной базы. Учебные заведения делают многое для сохранения уровня образования, но теоретическую базу с учетом школьных пробелов уже не вернуть на прежний уровень. Планку требований приходится снижать, хотя преподавательский состав работает очень добросовестно. Без необходимых знаний по физике, химии, математике не может быть качественного инженера, занимающего должности старшего комсостава на морских судах в соответствии с Положением о дипломировании членов экипажей морских судов. Дополнительное «подтягивание» теории путем корректировки рабочих программ определенный результат дает, но задача практической подготовки усилиями только вузов, без судоходных компаний, решена быть не может. Это аксиома.

Говоря современным языком, вертикально-интегрированный образовательный комплекс оправдывает себя, но требует дальнейшего творческого развития. Это позволит вернуть теоретическую и

практическую базу морского образования на прежний достойный уровень, так как определенный контингент абитуриентов сможет пройти заключительную школьную программу и первичную морскую подготовку на среднем профессиональном уровне и принять осмысленное решение для продолжения образования уже на уровне высшего профессионального образования. Можно ли ожидать улучшения в этой сфере при существующем тестовом контроле знаний выпускников школ? Факты дают негативный ответ. Вот некоторые данные по результатам ЕГЭ в 2014 г. Средний тестовый балл (информация Минобрнауки) в текущем году, по сравнению с 2013 г., снизился:

- по математике – с 49 до 39;
- по русскому языку – с 63 до 62;
- по физике – с 54 до 45;
- по информатике – с 63 до 57.

Эти данные по предметам, дающим право выпускникам школ подавать документы в технические вузы. Подчеркнем, что это средний балл, а у реального контингента поступающих он еще ниже. Из абитуриентов с такими «успехами» подготовить нужного морского инженера невозможно, и этим объясняется стабильность (те самые 80%) влияния человеческого фактора, выявляющегося при анализе причин аварий и катастроф на море.

Создание кадрового потенциала морских экипажей, отвечающего современному уровню развития транспортного флота и задачам безопасной эксплуатации судов, является важной государственной проблемой.

Уместно напомнить, что еще в 2012 г. на заседании Морской коллегии было принято поручение Минобрнауке обеспечить целевой выпуск специалистов в соответствии с объемом государственного заказа.

Если сопоставить это поручение и отраслевую подчиненность транспортных вузов, инициатором предлагаемого формата подготовки корпуса морских инженеров может быть только Минтранс РФ.

Авторы выражают надежду, что их предложения будут услышаны и найдут поддержку в морском сообществе или, по крайней мере, будут стимулом для поиска вариантов решения кадровых проблем в обстановке новых экономических отношений.

Мировой океан, а это около 70% поверхности планеты (напомним, что протяженность морских границ России составляет около 40000 км), хранит огромные запасы минеральных ресурсов. На фоне неизбежной исчерпаемости земных кладовых в XXI веке человечество вынуждено вовлекать в промышленный оборот богатство морей и океанов. Освоение Мирового океана потребует, в первую очередь, нового флота.

И море снова, как это было не раз, позовет молодых людей – сильных физически и духовно и получивших блестящее морское образование в вертикально-интегрированных образовательных комплексах.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Костылев И.И., Мясников Ю.Н., Петухов В.А. «Человеческий фактор» и безопасность мореплавания // Судостроение. – 2014. – № 3. – С. 36 – 41.
2. Мясников Ю.Н., Иванченко А.А., Никитин А.М. Информационные технологии в пропульсивном комплексе морского судна. Монография. – СПб., ГУМРФ им. адм. С.О.Макарова, 2013.





## УДК 665.61

**Ключевые слова:** экологическая безопасность судоходства, морская транспортная система.

**Изотов О.А., Кириченко А.В., Латухов С.В., Соляков О.В.** Анализ рисков аварийных разливов нефти в Балтийском море // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – Вып. 37. – 2014. – С. 8 – 11.

Представлен анализ рисков аварийных разливов нефти в Балтийском море. Показана зависимость степени риска от интенсивности движения нефтеналивных судов по определенным маршрутам. Проанализированы факторы, влияющие на повышение вероятности аварийных разливов нефти. Дан прогноз увеличения числа вероятных аварийных разливов в ближайшие 5 – 7 лет.

## УДК 629.124; 622.242; 539.4

**Ключевые слова:** ветровые нагрузки, вероятностные и детерминистические методы расчета, математическая модель, адекватность оценок.

**Литонов О.Е.** Ветровые нагрузки на средства океанотехники // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – Вып. 37. – 2014. – С. 12 – 15.

Поднимаются вопросы о необходимости создания адекватной статистической модели композиции волновых и ветровых реакций, имеющих вероятностную природу, а также о необходимости располагать переходными зависимостями для оценок ветровых нагрузок, определенных альтернативными методами на основе вероятностных и детерминистических подходов. Предложены решения обсуждаемых проблем, показано, что принимаемый обычно редуцированный коэффициент 0,8 при сложении двух случайных нагрузок может быть уменьшен до 0,7.

## УДК 629.12: 539.32

**Ключевые слова:** армированный пластик, модуль нормальной упругости, коэффициент Пуассона, модуль сдвига, волокна, гранулы, пустоты.

**Емельянов М.Д.** Упругие характеристики композитов судовых корпусных конструкций // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – Вып. 37. – 2014. – С. 16 – 22.

Представлены приближенные формулы, позволяющие определять упругие характеристики композита по известным упругим свойствам его компонентов

## UDC 665.61

**Key words:** environmental safety of shipping, marine transport system.

**O.A. Izotov, A.V. Kirichenko, S.V. Latukhov, O.V. Solyakov** Oil spill risk analysis for the Baltic Sea // Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping. – Issue 37. – 2014. – P. 8 – 11.

Oil spill risk analysis is given for the Baltic Sea. Dependence of risk level on route-specific intensity of tanker traffic is demonstrated. Factors contributing to high risk of oil spills are reviewed. Increasing number of oil spills is forecast in the next 5 – 7 years.

## UDC 629.124; 622.242; 539.4

**Key words:** wind loads, probabilistic and deterministic calculation methods, mathematical model, adequate valuations.

**O.Ye. Litonov** Wind loads on offshore facilities // Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping. – Issue 37. – 2014. – P. 12 – 15.

The questions are raised about the need for adequate statistical model of combined wind and wave loads of probabilistic nature and for transitive dependencies to assess the wind loads calculated by alternative probabilistic and deterministic methods. Solutions of the issues discussed are presented. It is shown that the reduction factor normally equal to 0,8 may be reduced to 0,7 in case of addition of two random loads.

## UDC 629.12: 539.32

**Key words:** reinforced plastics, modulus of elasticity, Poisson's ratio, shear strength, fibres, granules, porosities.

**M.D. Yemelyanov** Elastic properties of hull structural composites // Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping. – Issue 37. – 2014. – P. 16 – 22.

The approximate formulas are given to determine the elastic properties of the composite based on the known

(модулей нормальной упругости и коэффициентов Пуассона связующего и волокон), объемной доле и схеме укладки волокон. Рассмотрены композиты, содержащие отдельные макрочастицы (гранулы), короткие волокна (рубленный ровинг), длинные волокна (непрерывные нити), слои, армирующие ткани и нетканые материалы, а также пустоты (включения, у которых модуль упругости равен нулю).

elastic properties of its components (moduli of elasticity and Poisson's ratios of adhesives and fibres), volume ratio and fibre lay-up sequence. Considered are the composites containing separate macroparticles (granules), short fibres (chop roving), long fibres (continuous fibres), layers, reinforcing fabrics and non-woven fabrics as well as porosities (inclusions with modulus of elasticity equal to zero).

УДК 629.12.001

UDC 629.12.001

**Ключевые слова:** *остойчивость рыболовных судов, кошельковый лов.*

**Key words:** *stability of fishing vessels, seine-net fishing.*

**Великанов Н.Л., Корягин С.И., Ярисов В.В.**

Остойчивость рыболовных судов на промысле // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – Вып. 37. – 2014. – С. 23 – 28.

Приведена математическая модель дополнительного расчета устойчивости рыболовных судов, которые во время промысловых операций могут оказаться под кренящим воздействием сил от орудий лова. Требования к выполнению такого расчета предусмотрены международной морской организацией (ИМО) и РС. Рассмотрены два расчетных случая: судно в дрейфе и судно при буксировке трала.

**N.L. Velikanov, S.I. Koryagin, V.V. Yarisov**

Fishing vessel stability when trawling // Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping. – Issue 37. – 2014. – P. 23 – 28.

The mathematical model is introduced for additional stability calculation of the fishing vessels, which may be subject to the heeling force produced by fishing gear when trawling. This calculation is required by IMO and RS. Two design cases are considered: ship adrift and ship towing the trawl.

УДК 669.14.018.41:620.17

UDC 669.14.018.41:620.17

**Ключевые слова:** *хладостойкость высокопрочной легированной стали, гарантированный предел текучести, температура вязко-хрупкого перехода, повышение хладостойкости толстолистового проката.*

**Key words:** *cold resistance of high strength alloy steel, guaranteed yield stress, ductile-brittle transition temperature, increasing hot-rolled plate cold resistance.*

**Башаев В.К., Мотовилина Г.Д., Рябов В.В., Сыч О.В., Гусев М.А.** Хладостойкость высокопрочной легированной стали с пределом текучести 500 МПа // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – Вып. 37. – 2014. – С. 29 – 38.

Представлены результаты исследования структуры и оценки характеристик работоспособности высокопрочной стали с пределом текучести не менее 500 МПа (низкотемпературной ударной вязкости, температуры вязко-хрупкого перехода  $T_{кб}$ , температуры нулевой пластичности  $NDT$  и трещиностойкости  $CTOD$ ) в зависимости от выбранной композиции легирования, типа исходной заготовки (слиток или сляб), технологии производства (термомеханическая обработка, закалка с прокатного нагрева или отдельного печного нагрева с последующим высокотемпературным отпуском) и толщины листового проката. Установлены возможные причины снижения хладостойкости листового проката больших толщин и предложены способы ее повышения.

**V.K. Bashaev, G.D. Motovilina, V.V. Ryabov, O.V. Sych, M.A. Gusev** Cold resistance of high strength alloy steel with a yield stress of 500 MPa // Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping. – Issue 37. – 2014. – P. 29 – 38.

The results are presented of the structural analysis and assessment of high strength steel properties with a yield stress not less than 500 MPa (low-temperature impact toughness, ductile-brittle transition temperature  $T_{kb}$ , nil-ductility temperature  $NDT$  and crack resistance  $CTOD$ ) depending on the chosen alloying system, type of initial billet (ingot or slab), production practice (thermo-mechanical rolling, quenching from rolling heat or separate furnace heat with subsequent high-temperature tempering) and rolled plate thickness. Possible reasons of cold resistance reduction in hot-rolled plates are determined and methods for its increasing are suggested.

## УДК 621.791.669.295

**Ключевые слова:** защитное покрытие, балластная цистерна, пространство двойных бортов судов, квалификационные испытания, качающийся испытательный танк.

**Михайлова М.А., Яковлев Н.С., Кордонетц С.М., Манихин И.В.** Оборудование и методика испытаний защитных покрытий балластных цистерн и пространства двойного борта // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – Вып. 37. – 2014. – С. 39 – 41.

Обращено внимание на обязательность выполнения Стандарта качества защитных покрытий для балластных цистерн и пространств двойных бортов морских судов, принятого ИМО (резолюция MSC.215(82)). Приведены требования к защитным покрытиям. Представлена информация о разработанном на основе названного стандарта ЦНИИ КМ «Прометей» проекте качающегося испытательного танка (документация согласована с Регистром) для проведения испытательных циклов образцов с защитными покрытиями для балластных цистерн забортной воды. Приведена методика и допустимые критерии квалификационных испытаний защитных покрытий.

## УДК 629.12.037

**Ключевые слова:** гребной винт, пропульсивная установка, прочность, надежность, сценарии взаимодействия, Российский морской регистр судоходства, нормирование, лед, фрезерование.

**Сергеев А.А., Иванов М.Ю., Серов А.В., Семионичев Д.С.** Особенности эксплуатации гребных винтов современных судов ледового плавания и развитие правил Регистра // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – Вып. 37. – 2014. – С. 42 – 45.

Сделан обзор режимов взаимодействия со льдом гребных винтов судов ледового плавания, которые были определены в ходе выполнения работ по Федеральной целевой программе «Развитие гражданской морской техники» на 2009–2016 годы и взятых в качестве расчетных при совершенствовании требований Правил классификации и постройки морских судов Регистра.

## UDC 621.791.669.295

**Key words:** protective coating, ballast tank, double-side space, qualification tests, swinging test tank.

**M.A. Mikhailova, N.S. Yakovlev, S.M. Kordonets, I.V. Manikhin** Test equipment and procedure for protective coatings of ballast tanks and double-side spaces // Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping. – Issue 37. – 2014. – P. 39 – 41.

Attention is paid to the mandatory compliance with the Performance Standard for Protective Coatings for ballast tanks and double-side spaces of sea-going ships, as adopted by resolution MSC.215(82) of the International Maritime Organization (IMO). Included are the requirements for protective coatings. The information is provided on design of a swinging test tank for conducting test cycles of samples with protective coatings for seawater ballast tanks developed by CRISM "Prometey" on the basis of the Standard (documentation has been agreed with the Register). Procedure and admissible criteria for qualification tests of protective coatings are specified.

## UDC 629.12.037

**Key words:** propeller, propulsion plant, strength, reliability, interaction scenarios, Russian Maritime Register of Shipping, standardization, ice, milling.

**A.A. Sergeev, M.Yu. Ivanov, A.V. Serov, D.S. Semionichev** Propeller operation in modern ice ships and development of Register rules // Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping. – Issue 37. – 2014. – P. 42 – 45.

The review is made of propeller-ice interaction scenarios for ice ships determined within the framework of Federal Target Program "Development of Civil Marine Engineering for 2009 – 2016" and accepted as design modes when improving the requirements of the Register Rules for the Classification and Construction of Sea-Going Ships.

## УДК 621.355

**Ключевые слова:** электрохимические генераторы, топливные элементы, сжиженный природный газ, суда-газовозы.

**Шишкин В.А., Кручинина И.Ю., Шурпяк В.К.** Перспективы применения топливных элементов при перевозках СПГ // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – Вып. 37. – 2014. – С. 45 – 50.

Рассмотрены экономические и экологические аспекты использования электрохимических генераторов (ЭХГ) на основе топливных элементов (ТЭ) в составе энергетических установок судов-газовозов, а также различные виды ТЭ. Проведен анализ применимых документов ИМО, Регистра и иностранных классификационных обществ. Кратко проанализированы особенности обеспечения безопасности при использовании ЭХГ на основе ТЭ. С учетом современных тенденций сделан вывод о высокой вероятности применения ТЭ на судах в ближайшие десятилетия.

## УДК 629.541 – 546; 629.5.021.18; 629.12.06-7

**Ключевые слова:** конструктивный коэффициент энергетической эффективности, системы охлаждения, забортные охладители.

**Шурпяк В.К.** Учет особенностей систем охлаждения при оценке энергетической эффективности судов // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – Вып. 37. – 2014. – С. 51 – 55.

Указано, что в настоящее время методика расчета Конструктивного Коэффициента Энергетической Эффективности (ККЭЭ), принятая ИМО, не учитывает возможности экономии топлива на ходу судна за счет применения систем охлаждения забортными охладителями и отказа от насосов охлаждения. Проведен сравнительный анализ требований ИМО и отечественных нормативных документов по проектированию систем охлаждения. Сформулированы и обоснованы предложения по корректировке методики расчета ККЭЭ ИМО.

## UDC 621.355

**Key words:** electrochemical generators, fuel cells, liquefied natural gas (LNG), gas carriers.

**V.A. Shishkin, I.Yu. Kruchinina, V.K. Shurpyak** Prospective use of fuel cells in LNG transportation // Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping. – Issue 37. – 2014. – P. 45 – 50.

The economic and environmental aspects of using fuel-cell electrochemical generators in the power plants of gas carriers are reviewed. Verification of the applicable documents of IMO, the Register and other classification societies is made. Safe use of fuel-cell electrochemical generators is briefly analyzed. High probability of fuel-cell application on board ships in the next few decades is suggested.

## UDC 629.541 – 546; 629.5.021.18; 629.12.06-7

**Key words:** Energy Efficiency Design Index (EEDI), cooling systems, sea-water coolers.

**V.K. Shurpyak** Cooling system features in ship energy efficiency estimation // Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping. – Issue 37. – 2014. – P. 51 – 55.

It is stated that the current IMO procedure for calculation of Energy Efficiency Design Index (EEDI) does not consider the possible fuel saving of the ship under way due to use of the cooling systems with sea water coolers and omission of the cooling pumps. The comparative analysis of the IMO requirements and requirements of the national normative documents on the cooling system design is made. Proposals on amending the IMO procedure for EEDI calculation are formulated and substantiated.

УДК 1.629.5.015; 629.562

**Ключевые слова:** амфибийные транспортно-пассажирские катера, спасательные операции, наводнения, колесные движители.

**Береза П.И., Ярисов В.В.** Применение колесного движителя при проектировании амфибийных транспортно-пассажирских катеров // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – Вып. 37. – 2014. – С. 55 – 57.

Рассматривается возможность применения амфибийных транспортно-пассажирских катеров для операций по спасению людей в аварийных ситуациях, особенно во время наводнений. В качестве движителя предлагается использовать оригинальный колесный движитель, представляющий предмет изобретения (защищено патентом). Показаны преимущества работы такого движителя на суше и в воде.

УДК 621.311.001.57

**Ключевые слова:** автоматизация расчетов, расчет надежности, надежность электроснабжения, судовая электроэнергетическая система, система MATLAB.

**Мищенко В.Ф., Устинов А.А.** Сравнительная оценка надежности различных вариантов судовых электроэнергетических систем // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – Вып. 37. – 2014. – С. 58 – 63.

Для автоматизации расчетов предлагается выполнять сравнительную оценку надежности различных вариантов судовой электроэнергетической системы (СЭЭС) с использованием специально разработанной библиотеки модулей в приложении Simulink системы MATLAB, что позволяет выполнять расчет надежности путем простого составления однолинейной структурной схемы СЭЭС. Приводятся схемы СЭЭС и примеры расчетов.

УДК 3.629.5.052.3; 628.193:665.61

**Ключевые слова:** интеллектуальный радар, нефтяные пятна, протяженная дисперсная цель, решение экологических задач.

**Маринич А.Н., Припотнюк А.В., Устинов Ю.М.** Радиолокационное обнаружение нефтяных пятен на взволнованной морской поверхности // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – Вып. 37. – 2014. – С. 64 – 69.

Рассматриваются особенности построения РЛС для обнаружения нефтяных пятен на взволнованной

UDC 1.629.5.015; 629.562

**Key words:** amphibious transport and passenger boats, rescue operations, floods, paddle wheels.

**P.I. Berioza, V.V. Yarisov** Paddle wheel for amphibious transport and passenger boats design // Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping. – Issue 37. – 2014. – P. 55 – 57.

A possibility of using amphibious transport and passenger boats for rescue operations in emergencies, especially during floods is considered. The inventive (patented) paddle wheel is suggested for propulsion. The benefits of the paddle wheel operation both on land and in water are demonstrated.

UDC 621.311.001.57

**Key words:** automated calculations, reliability analysis, electric reliability, shipboard electrical system, MATLAB software.

**V.F. Mishchenko, A.A. Ustinov** Ship electrical power systems in comparative reliability analysis // Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping. – Issue 37. – 2014. – P. 58 – 63.

For automated calculation it is suggested to use a comparative reliability analysis for different types of shipboard electrical systems, using a specially developed module library in the Simulink application of MATLAB software. This enables the reliability analysis to be made by simply drawing a single-line structural diagram of the shipboard electrical system. System diagrams and calculation examples are included.

UDC 3.629.5.052.3; 628.193:665.61

**Key words:** intelligent radar, oil spills, extended scattered target, environmental solutions

**A.N. Marinich, A.V. Pripotniuk, Yu.M. Ustinov** Radar detection of oil spills in a rough sea // Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping. – Issue 37. – 2014. – P. 64 – 69.

The construction of a radar for oil spill detection in a rough sea is reviewed. Scattering cross-section of a target

морской поверхности. Доказывается, что для нефтяного пятна эффективная поверхность рассеивания цели меньше, чем для чистой поверхности, что позволяет эффективно обнаруживать нефтяные пятна с помощью интеллектуальных радаров. Приведена зависимость максимальной дальности обнаружения загрязнения от состояния морской поверхности.

УДК 629.12, 629.5.01

**Ключевые слова:** САПР, оптимизация, проектирование и конструкция судов.

**Рюмин С.Н.** Состав и средства создания базовой информационной модели для систем автоматизированного проектирования крупнотоннажных судов // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – Вып. 37. – 2014. – С. 70 – 76.

Приведено описание и примеры работы программного комплекса для проектных расчетов танкеров, балкеров и контейнерных судов. Сделан вывод о том, что результаты расчетов могут применяться на стадии концептуального проектирования и для восстановления отсутствующих проектных данных, необходимых для оценки технического состояния судов.

УДК 621.311.24

**Ключевые слова:** морские плавучие ветроэлектростанции, ветропотенциал береговой зоны морей, конструкции опорных фундаментов, конструкция плавучего основания.

**Елистратов В.В., Большев А.С., Мегрецкий К.В.** Проектирование и научное обоснование морских ветроэлектрических станций // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – Вып. 37. – 2014. – С. 77 – 85.

Рассмотрены различные типы ветроэлектростанций, особое внимание обращено на новый их тип – морские плавучие ветроэлектростанции (МПВЭС). Приведены различные конструкции оснований ветроэнергетических установок. Дана оценка ветропотенциала оффшорных районов, перспективных с точки зрения ветроэнергетики. Приведена модель поведения МПВЭС под действием внешних нагрузок.

is proved to be less for an oil spill than for the clear water that enables effective oil spill detection by intelligent radars. Dependence between the maximum pollution detection range and the sea state is demonstrated.

UDC 629.12, 629.5.01

**Key words:** CAD systems, optimization, ship design.

**S.N. Riumin** Composition and development of basic information model for large ship CAD systems // Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping. – Issue 37. – 2014. – P. 70 – 76.

The description and operation examples of the software package for design analysis of tankers, bulk carriers and container ships are given. It is concluded that the analysis results may be applied for conceptual design and recovery of the missing design data for assessment of the ship technical condition.

UDC 621.311.24

**Key words:** marine floating wind power stations, wind power potential of offshore sea areas, foundation designs, floating structure design.

**V.V. Yelistratov, A.S. Bolshev, K.V. Megretsky** Design and scientific grounds for marine wind power stations // Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping. – Issue 37. – 2014. – P. 77 – 85.

Different types of wind power stations are reviewed with a focus on their new type – marine floating wind power stations. Various foundation designs of wind power stations are described. Wind power potential of offshore sea areas with perspective use of wind power is assessed. The behavioral model of a marine floating wind power station under external loads is described.

УДК 629.039.54

**Ключевые слова:** безопасность атомных ледоколов, развитие аварии, стратегия управления авариями.

**Королёв В.И., Ластовцев А.Ю.** Планомерное повышение безопасности атомных ледоколов – актуальное требование времени // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – Вып. 37. – 2014. – С. 86 – 90.

Рассматриваются возможности повышения уровня безопасности атомных ледоколов с помощью методов управления авариями и различные виды развития аварий. Предложены проектные решения для повышения уровня безопасности, такие как: использование физических закономерностей объекта управления, улучшение теплофизических характеристик реактора, дополнительные конструктивные усовершенствования. Приведена схема выбора стратегии управления авариями.

УДК 629.5:613.6

**Ключевые слова:** вибрация, нормативные требования, экипаж, суда, ледовые условия.

**Белов И.М., Мацевич Л.М., Разлетова А.Б.** Оценка вредного воздействия вибрации на организм людей на судне в ледовых условиях // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – Вып. 37. – 2014. – С. 91 – 93.

Проанализированы особенности вибрационного воздействия на экипажи судов ледового плавания высших ледовых категорий и ледоколов. Предложен подход к оценке этого воздействия на основе эксплуатационного мониторинга. Приведены результаты исследований по разработке средств локальной виброзащиты экипажа.

УДК 656.61.086

**Ключевые слова:** безопасность мореплавания, человеческий фактор, современный флот, уровень подготовки экипажей судов.

**Костылев И.И., Мясников Ю.Н., Петухов В.А.** Безопасность мореплавания и проблемы подготовки морских инженеров // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. – Вып. 37. – 2014. – С. 94 – 96.

Рассмотрены проблемы повышения уровня инженерного обучения и практической подготовки командного состава экипажей транспортных судов. Делается вывод о том, что обеспечение безопасности мореплавания является совместной задачей учебных заведений и работодателей.

UDC 629.039.54

**Key words:** nuclear icebreakers safety, accident development, accident management strategy.

**V.I. Koroliov, A.Yu. Lastovtsev** Systematic safety improvement for nuclear icebreakers: present day imperative // Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping. – Issue 37. – 2014. – P. 86 – 90.

The opportunities for improving the safety of nuclear icebreakers through the accident management procedures are considered and different accident scenarios are reviewed. Design solutions are suggested to improve safety, namely, use of physical properties of the item subject to management, improvement in the reactor thermal and physical characteristics, additional design improvements. The diagram for choosing the accident management strategy is given.

UDC 629.5:613.6

**Key words:** vibration, normative requirements, crew, ships, ice conditions.

**I.M. Belov, L.M. Matsevich, A.B. Razlyotova** Assessment of negative vibration effects upon humans on board a ship in ice conditions // Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping. – Issue 37. – 2014. – P. 91 – 93.

Vibration impacts on crew members of ice ships of the highest ice categories and icebreakers are analyzed. An approach is suggested for assessment of these impacts on the basis of operational monitoring. Results of research on developing the means for crew protection against local vibration are reported.

UDC 656.61.086

**Key words:** maritime safety, human factor, modern fleet, crew qualification.

**I.I. Kostylev, Yu.N. Miasnikov, V.A. Petukhov** Maritime safety and marine engineers training // Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping. – Issue 37. – 2014. – P. 94 – 96.

The issues of engineer training improvement and the practical training of transport ship officers are considered. Provision of maritime safety is stated to be the common goal of educational institutions and employers.

# ПРАВИЛА ПРЕДОСТАВЛЕНИЯ СТАТЕЙ

---

## 1. СОДЕРЖАНИЕ И ОФОРМЛЕНИЕ СТАТЕЙ

Материал статьи должен являться оригинальным, не опубликованным ранее в других печатных изданиях, соответствовать профилю журнала. Он должен содержать информацию, подтверждающую актуальность и практическую значимость исследования, а также информацию о внедрении его результатов.

Авторы несут личную ответственность за то, что текст статьи не содержит материалов:

- рекламного характера;
- содержащих государственную тайну;
- публикация которых приведет к нарушению действующего законодательства РФ в сфере защиты информации и интеллектуальной собственности.

В тексте статьи может быть указан источник финансирования выполненных исследований.

К материалу должна быть приложена рецензия (отзыв) за подписью рецензента, имеющего ученую степень и опыт работы по данному научному направлению. Формат рецензии доступен на интернет-сайте издания (<http://www.rs-class.org/ru/register/research/ntsb/>). Статьи для аспирантов должны быть подписаны их научным руководителем.

Материалы для публикации в журнале предоставляются авторами на безвозмездной основе.

### Общие требования к оформлению материалов.

1. Объем материалов в электронном виде должен составлять не более 20 000 печатных знаков. В этот объем включаются таблицы, схемы, диаграммы и т.д., а также изображения в виде иллюстраций.

2. Статья должна содержать следующую информацию.

- **Заглавие** на русском и английском языках, точно отражающее содержание статьи (не более 120 печатных знаков).

- **Фамилию, имя, отчество автора:** (приводятся полностью). Количество указанных авторов статьи не должно превышать 4 чел.

- **Сведения об авторе:** ученые степень и звание, должность, место работы (принятое в уставе организации официальное название и логотип), город, телефон и адрес электронной почты автора, фото автора (разрешение – не менее 300 dpi, форматы JPEG, TIFF).

- **Индекс УДК.**

- **Аннотацию** к статье: рекомендуемый объем – 500 печатных знаков. В аннотации должны быть четко определены основные цели, задачи, содержание и

результаты проведенного исследования, возможности его практического применения. Приводится на русском и английском языках.

- **Ключевые слова:** 3 – 5 слов/словосочетаний, наиболее полно отражающих тему статьи. Недопустимо использование слов общего характера (например, проблема, решение). Предоставляются на русском и английском языках (*Key words*).

- **Основной текст статьи:** общие принципы построения статьи могут варьироваться в зависимости от тематики и особенностей проведенного исследования. Рекомендуется выделять в тексте статьи постановку задачи, описание методов решения, анализ результатов и выводы. Если имеется перевод статьи на английский язык, желательно его представить.

- **Список литературы:** приводится в конце статьи, оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ 7.1-2003. Библиографические ссылки оформляются в соответствии с ГОСТ Р 7.0.5-2008. В статью рекомендуется использовать не более 10 источников.

## 2. ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ ТЕКСТА

- Редактор – MS Word.

- Шрифт: Times New Roman, размер шрифта – 14, цвет – черный, начертание – обычное. Интервал между строками – 1,5; абзацный отступ – 1,25; ориентация – книжная; поля – 2 см со всех сторон. Текст должен быть выровнен по ширине. Красные строки обязательны.

- Разделы статьи (кроме «Введение» и «Выводы») нумеруются арабскими цифрами. Допускается не нумеровать разделы (заголовки), служащие лишь для акцентирования тем в небольшом тексте.

- Нумерация пунктов и в списках – арабскими цифрами.

- Ссылки на источник в списке литературы нумеруются арабскими цифрами и приводятся в тексте в квадратных скобках.

- Подстрочные примечания (вынесенные из основного текста в конец полосы) связываются с текстом сносками в виде арабских цифр и нумеруются в пределах каждой отдельной полосы (страницы). Цифры набираются на верхнюю линию шрифта.

- Кавычки оформляются символами «...» для наименований, набранных кириллицей, и символами "...» для наименований, набранных латиницей.



### 3. ОФОРМЛЕНИЕ ФОРМУЛ, ТАБЛИЦ И ИЛЛЮСТРАЦИЙ

- Формулы должны быть набраны в Microsoft Equation 3.0 (MS Word) или символьным шрифтом. Вставки формул в виде картинок любого формата не допускаются. Размер кегля для формул – 12. Формулы, если их больше одной и если на них есть ссылки, нумеруются арабскими цифрами в круглых скобках по правому краю полосы.

- Таблицы, если их больше одной, должны быть пронумерованы. Таблицы должны иметь заголовки, если только они не следуют сразу за текстом, однозначно определяющим их содержание. Номер таблицы и заголовки размещаются над таблицей. Таблицы должны быть выполнены в MS Excel или MS Word и встроены в текст статьи. Вставка таблиц в виде картинок любого формата не допускается. Размер кегля для таблиц – 11.

- Иллюстрации (рисунки), если их больше одной (одного), должны быть пронумерованы и иметь подпись (если только содержание иллюстрации не понятно однозначно из предшествующего текста). Графические, фотоматериалы должны быть представлены в форматах JPEG, TIFF, быть качественными и иметь разрешение не менее 300 dpi.

### 4. РЕЦЕНЗИРОВАНИЕ СТАТЕЙ

Текст статьи в электронном виде и в твердой копии следует направлять непосредственно в научно-исследовательский отдел Главного управления Регистра на имя главного редактора журнала. Статья может быть представлена на соответствующей секции Научно-технического совета Регистра и передана ученым секретарем секции в научно-исследовательский отдел вместе с заключением о возможности опубликования.

Рецензирование статьи осуществляет Редакционная коллегия Регистра с привлечением специалистов соответствующих секций Научно-технического совета. По результатам рецензирования статья может быть принята, отклонена или направлена автору на доработку.

Материалы, не утвержденные Редакционной коллегией к размещению в журнале, возвращаются автору с объяснением причины отказа в публикации.

В оформлении издания использовались графические материалы  
из открытых источников сети интернет:

<http://gibka-rezka-svarka.ru/>  
<http://ns.abunda.ru/84637-ogromnye-vinty-bolshix-korablej-27-foto.html>  
<http://www.cloveritservices.com/Home.aspx>  
[www.fonstola.ru](http://www.fonstola.ru)  
[www.wallpapers.ru](http://www.wallpapers.ru)  
<http://www.ye42oester.nl/>  
<http://miraziz.uz/>  
<http://www.radioscanner.ru/>  
<http://xn--24-dlcyxgbyj.xn--80asehdb/?p=4257>  
<http://www.russiapost.su/archives/12268>

Российский морской регистр судоходства  
**Журнал**  
**«Научно-технический сборник**  
**Российского морского регистра судоходства»**  
**вып. 37**

*Редакционная коллегия*  
*Российского морского регистра судоходства*

Ответственные за выпуск *А.В. Зухарь, М.Р. Маркушина*  
Редактор *Е.Б. Мюллер*  
Компьютерная верстка *С.С. Лазарева*  
Дизайн концепции *М.В. Батракова*

Подписано в печать 30.10.14. Формат 60 х 84/8  
Усл. печ. л.: 12,3. Уч.-изд.л.: 12,1. Тираж 500

Российский морской регистр судоходства  
191186, Санкт-Петербург, Дворцовая набережная, 8  
[www.rs-class.org/ru/](http://www.rs-class.org/ru/)