

ISSN 2949-3684

ВЕСТНИК

**МОРСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО
УНИВЕРСИТЕТА**

Выпуск 99 / 2025

Вестник Морского государственного университета. Вып. 99 / 2025 / Морской государственный университет им. адм. Г. И. Невельского. — Владивосток: Мор. гос. ун-т, 2025. — 75 с. ; цв. ил., табл. — Библиогр. в конце ст. — ISSN 2949-3684.

Вестник Морского государственного университета содержит публикации, посвященные актуальным нормативно-организационным, техническим и технологическим проблемам судовождения и безопасности мореплавания, судоремонта, судовых силовых установок и их элементов, логистических транспортных систем и гидрографии, автоматизации и управления технологическими процессами, обработки информации, системного анализа и управления процессами перевозок на морском транспорте. Материалы содержат теоретические выводы и практические рекомендации, которые могут быть использованы для развития научных направлений и для принятия инженерных, административных и коммерческих решений.

Дата выхода в свет - 14 июля 2025 г. Выходит четыре раза в год.

Зарегистрировано Федеральной службой по надзору в сфере связи и массовых коммуникаций. Свидетельство о регистрации Эл № ФС77-82589 от 30.12.2021.

Учредитель и издатель – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Морской государственный университет имени адмирала Г.И. Невельского».

Адрес учредителя, издателя и редакции: 690003, Россия, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50а. Электронная почта редакции: vestnik@msun.ru; телефон редакции: +7 (423) 251-76-36.

Главный редактор – Соболенко Анатолий Николаевич, доктор технических наук, профессор.

Заместитель главного редактора – Рычкова Виктория Феликсовна, начальник управления научно-исследовательской и инновационной деятельности.

Научный редактор – Холоша Михаил Васильевич, кандидат технических наук, доцент.

Выпускающий редактор – Баранникова Анастасия Олеговна, кандидат исторических наук.

Редакционная коллегия:

Азовцев Анатолий Иванович, доктор технических наук, профессор;

Буров Денис Викторович, кандидат физико-математических наук, доцент;

Войлошников Михаил Владиленович, доктор технических наук, профессор;

Глушков Сергей Витальевич, доктор технических наук, профессор;

Друзь Иван Борисович, доктор технических наук, профессор;

Дыда Александр Александрович, доктор технических наук, профессор;

Лазарев Владимир Анатольевич, кандидат технических наук, доцент;

Луговец Александр Анатольевич, доктор экономических наук, доцент;

Москаленко Михаил Анатольевич, доктор технических наук, профессор;

Надежкин Андрей Вениаминович, доктор технических наук, профессор;

Огай Сергей Алексеевич, доктор технических наук, доцент;

Оськин Дмитрий Александрович, кандидат технических наук, доцент;

Холоша Михаил Васильевич, кандидат технических наук.

Цена свободная

СОДЕРЖАНИЕ

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ

Радченко П.М. Судовые электроэнергетические системы переменного тока с распределением электрической энергии на постоянном токе.....4

Соболенко А.Н. Концепция создания ударного морского дрона-«камикадзе»...21

Фокин Р.К. Беспилотные транспортные средства на воздухоопорных гусеницах для автоматизированной выгрузки грузов на необорудованный берег.....27

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА, ВОДНЫЕ ПУТИ СООБЩЕНИЯ И ГИДРОГРАФИЯ

Мотрич В.Н. Предотвращение коррозионных повреждений конструкций морских судов.....31

ЛОГИСТИЧЕСКИЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ

Баранникова А.О. О некоторых особенностях интеллектуальной модернизации морских портов Китая.....62

Переславцев Н.И. Функции и технологические особенности южнокорейских портов на примере порта Пусан.....69

Судовые электроэнергетические системы переменного тока с распределением электрической энергии на постоянном токе

Радченко Петр Михайлович, канд. тех. наук, профессор, e-mail: mikhaylovich2010@mail.ru

Морской государственный университет имени адмирала Г.И. Невельского, г. Владивосток

Производится сравнение двух технологий распределения электрической энергии, произведенной в судовых электрических системах генераторами переменного тока: на переменном токе и на постоянном токе.

Ключевые слова: судовая электрическая система, постоянный и переменный ток, распределение электрической энергии.

Marine AC electrical power systems with DC electrical power distribution

Radchenko Petr Mikhaylovich, Candidate of Technical Science, professor, e-mail: mikhaylovich2010@mail.ru

Maritime State University named after Admiral G.I. Nevelskoy, Vladivostok

Comparison of distribution technologies of electrical energy is considered which are generated by alternators of the ship's power station: by alternating current and by constant current.

Keywords: ship power station. direct current and alternative current, electrical energy's distribution.

Введение

С середины прошлого века производство и распределение электроэнергии на переменном токе заняло на судах прочные позиции, и в настоящее время является основной технологией их электроснабжения. Однако этой технологии свойствен ряд существенных недостатков.

Во-первых, электрические сети на переменном токе загружаются не только активной, но и реактивной энергией и соответствующей ей током. Это вызывает их дополнительный нагрев, потери энергии в сети и напряжения на зажимах приёмников. Недопустимость перегрева сетей требует увеличения при проектировании судовой электроэнергетической системы (СЭЭС) мощности электрических машин и сечения кабелей. Колебания реактивной мощности в процессе эксплуатации СЭЭС вызывают колебания напряжения, ухудшающие качество электроэнергии и предъявляющие к автоматическим регуляторам напряжения (АРН) повышенные требования и связанные с ними расходы, включая более подготовленный персонал.

Во-вторых, качество электроэнергии на переменном токе определяется не только напряжением, но так же формой кривой и частотой этого напряжения. Для стабилизации частоты напряжения генераторные агрегаты вынуждены работать с постоянной частотой вращения $n = \text{const}$, поддерживаемой за счёт автоматического регулятора частоты (АРЧ). При частичных, малых нагрузках менее 50 % номинального значения работа приводных двигателей внутреннего сгорания (ДВС) в режиме постоянной частоты вращения протекает при повышенном удельном расходе топлива из-за неполного его сгорания, которое сопровождается образованием сажи и токсичных газов в продуктах сгорания, выбрасываемых в атмосферу [1]. Горючая сажа повышает пожароопасность отработавших газов и частоту моточисток (трудоемкость обслуживания) приводных ДВС. Токсичные газы, в свою очередь, попадая в атмосферу и взаимодействуя с парами воды, возвращаются на поверхность земли в виде кислотных и азотных дождей.

В-третьих, искажения синусоидальной формы кривой напряжения, обусловленные присутствием в электрической сети элементов с нелинейным сопротивлением, вызывают циркуляцию по её цепям высших гармонических составляющих тока, которые также нагревают её оборудование и приводят к дополнительным потерям энергии. В изоляции обмоточных проводов электрических машин и кабелей распределительной сети высшие гармоники тока (ВГТ) вызывают ускоренные процессы её «старения», что сокращает ресурс оборудования СЭС. Одновременно с этим ВГТ, излучая в окружающее пространство высокочастотные электромагнитные волны, создаёт проблему электромагнитной совместимости силового оборудования с работой средств автоматики, измерительной техники, радио- и мобильной связи. Высокочастотные составляющие электромагнитного момента, формируемые при этом на валах электрических машин, усиливают вызываемые ими «шумы» и вибрацию. Присутствие в сети индуктивных и ёмкостных элементов могут вызывать на определённых частотах резонансные явления, создающие в СЭС дополнительные проблемы [2].

В-четвёртых, параллельная работа синхронных генераторных агрегатов, являющаяся основным режимом их работы в составе автономных электростанций, отличается повышенной сложностью алгоритмов управления ею, как в период включения генераторов на параллельную работу, называемого синхронизацией, так и в процессе распределения нагрузок между ними: активной и реактивной. Этот фактор усложняет конструкцию, увеличивает массу и объём пространства, занимаемого ГРЩ.

В-пятых, распределение и передача электроэнергии приёмникам посредством трёхжильных кабелей и трёхполюсного оборудования – сборных шин, фидерной ошиновки и коммутационно-защитной аппаратуры – также увеличивают их размеры и массу, расход меди на их изготовление и монтаж. Одновременно с этим присутствие в сопротивлении изоляции кабелей относительно корпуса судна («земли») ёмкостной составляющей снижает электро- и пожаробезопасность сети [2].

В совокупности все эти факторы увеличивают первоначальную стоимость СЭС и расходы на её эксплуатацию. Увеличивая общую массу и объём занимаемого пространства на судне, электроэнергетическая система (ЭС) с шинами переменного тока снижает провозную способность судна и его транспортную эффективность. Стремление уменьшить построечную стоимость СЭС, упростить алгоритмы управления ею, снизить эксплуатационные расходы и негативное воздействие на окружающую среду, а также продлить ресурс оборудования привели, с появлением силовых полупроводниковых преобразователей электроэнергии, к разработке СЭС с шинами постоянного тока. Назвать это возвратом к эре постоянного тока было бы неправильным. Скорее следует понимать этот шаг как утверждение в своих правах эры двойного рода тока, когда производство и потребление электрической энергии осуществляются на переменном токе, и только её распределение – на постоянном токе. Однако с углуб-

лением перспективных технологий генерирования электроэнергии посредством электрохимических, термоэлектронных и магнетогидродинамических генераторов [2] область применения постоянного тока в структуре СЭЭС будет распространяться также и на производство электроэнергии.

На рисунке 1 приведены для сравнения упрощённые однолинейные схемы распределения электрической энергии с ГРЩ переменного тока (рис. 1, а) и ГРЩ постоянного тока (рис. 1, б). На данном этапе судостроения распределение энергии на постоянном токе применяют как в электроэнергетических системах (ЭЭС) собственных нужд на судах с приводом гребного винта от тепловых двигателей, так и на судах-электроходах с единой ЭЭС. Единой называют такую электроэнергетическую систему судна с электродвижением, в которой объединены её гребная электрическая установка (ГЭУ) и автономная электросистема собственных нужд. При этом напряжение на шинах ГРЩ постоянного тока СЭЭС не должно превышать значения 1500 В [3].

Источниками электроэнергии в СЭЭС с шинами постоянного тока (рис. 1, б) могут быть вентильные генераторы (ВГ) G, коллекторные генераторы постоянного тока (не показано), статический накопитель электроэнергии (СНЭ) установившихся режимов ЭЭС (например, аккумуляторная батарея GB) с обратимым (двунаправленным) преобразователем постоянного напряжения (ППН) и импульсный накопитель энергии переходных режимов – суперконденсаторная батарея (СКБ).

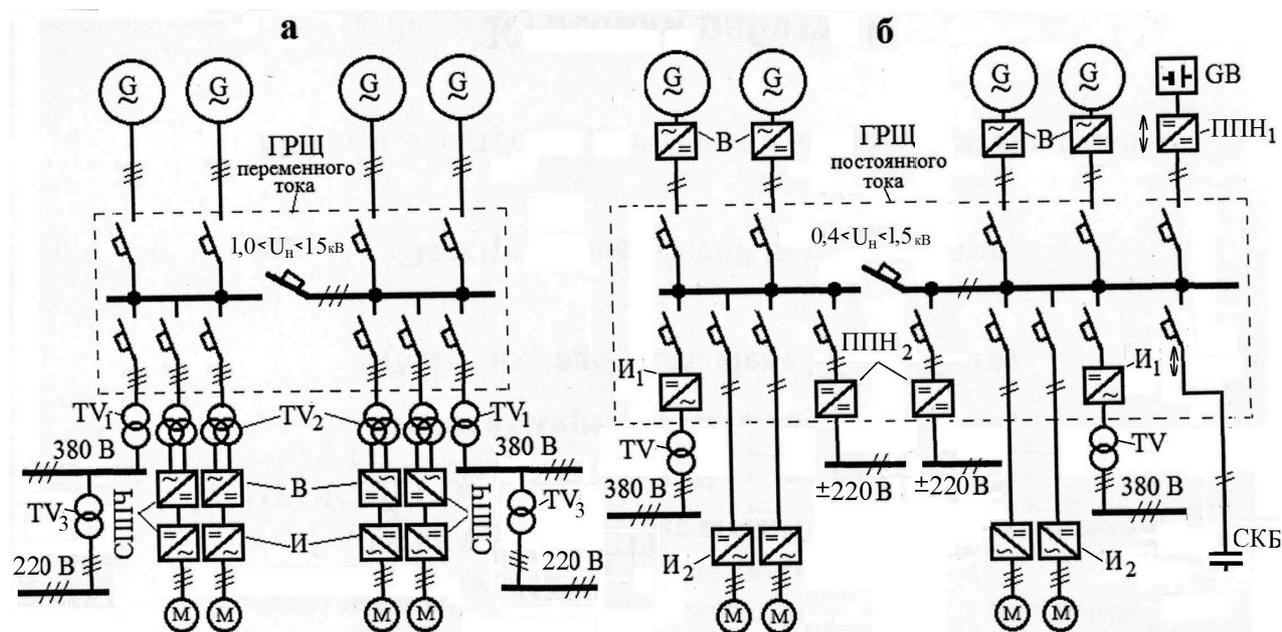


Рисунок 1. Принципиальные однолинейные схемы единой СЭЭС с шинами переменного тока (а) и постоянного тока (б)

Вентильным генератором постоянного тока (ВГПОТ) является вращающаяся электрическая машина переменного тока, в цепь рабочей обмотки которой включены последовательно полупроводниковый выпрямитель 3 (рис. 2), либо выпрямитель 3 в комплекте с преобразователем постоянного напряжения 5 (рис. 2, г). Выпрямитель может быть неуправляемый, если он собран на диодах (рис. 2, а, в, г), или управляемый, если он собран на тиристорах (рис. 2, б, д), либо силовых транзисторах (рис. 2, е). Транзисторный выпрямитель называют полностью управляемым или активным, что означает его способность переключаться посред-

ством системы управления в режим инвертора (обращённый режим), меняя при этом направление потока энергии.

Оба звена ВГ – генератор и выпрямитель – рассматривают, как составные элементы единой электрической машины, спроектированные с учётом взаимного влияния их процессов друг на друга [3] и объединённые конструктивно, включая общую систему охлаждения. Серийные генератор и выпрямитель, которые изготовлены каждый автономно, т. е., как самостоятельные звенья, и затем соединены последовательно, называть вентильной машиной можно только условно.

Вентильные генераторы на базе синхронной машины могут иметь электромагнитное возбуждение (рис. 2, а, б, в) или возбуждение на постоянных магнитах (рис. 2, г, д, е). На статоре

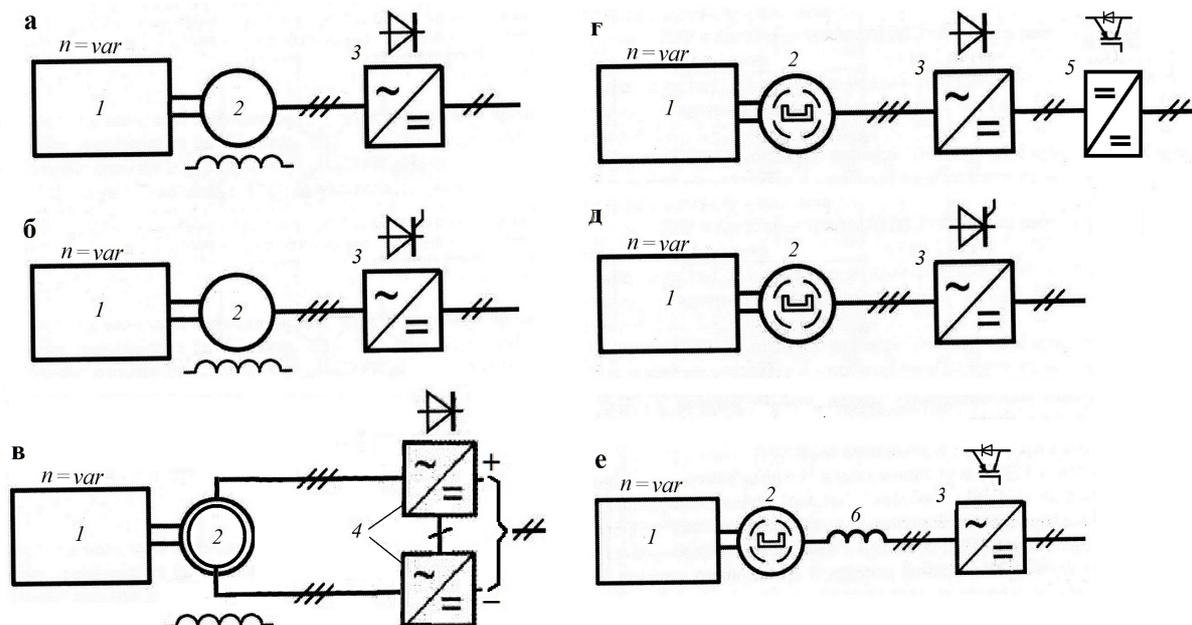


Рисунок 2. Структурные схемы вентильных генераторов на базе синхронного генератора (СГ) : **а** – шестифазного неуправляемого (диодного) выпрямителя и СГ с электромагнитным возбуждением; **б** – шестифазного управляемого тиристорного выпрямителя и СГ с электромагнитным возбуждением; **в** – двенадцатифазного неуправляемого выпрямителя и СГ с электромагнитным возбуждением; **г** – шестифазного неуправляемого выпрямителя и СГ на постоянных магнитах; **д** – шестифазного управляемого тиристорного выпрямителя и СГ на постоянных магнитах; **е** – шестифазного активного (транзисторного) выпрямителя и СГ на постоянных магнитах;

1 – приводной двигатель с переменной частотой вращения; 2 – синхронный генератор; 3 – однофазный шестифазный выпрямитель; 4 – двухфазный двенадцатифазный выпрямитель; 5 – преобразователь постоянного напряжения (ППН); 6 – дроссель активного транзисторного выпрямителя / инвертора

вентильного генератора, в его пазах, может располагаться одна (рис. 2, а, б, г, д, е) или две (рис. 2, в) якорные обмотки, сдвинутые относительно друг друга на 30° . У однообмоточных ВГ применяют, как правило, шестипульсный мостовой полупроводниковый выпрямитель 3. У двухобмоточных ВГ (рис. 2, в), используемых для повышения их мощности либо снижения высших гармонических составляющих напряжения на стороне постоянного тока, полупроводниковый неуправляемый выпрямитель 4 применяют двухфазный, двенадцатипульсный, соединяемый выходными клеммами последовательно либо параллельно.

Некритичные к частоте напряжения однофазные приёмники – в частности, осветительные и нагревательные приборы – получают питание по двухжильным кабелям непосредственно с шин ГРЩ постоянного тока. Если напряжение шин и приёмников не совпадает, то питание к ним подают через преобразователи постоянного напряжения $ППН_2$. Питание этой группы приёмников постоянным током, во-первых, исключает несимметрию загрузки распределительных щитов переменного тока напряжением 380 В однофазными приёмниками. Во-вторых, не требует применения понижающих трансформаторов $Т\text{V}_3$ напряжением 380/220 В (рис. 1, а). В-третьих, повышает пожаро- и электробезопасность сети ± 220 В за счёт устранения ёмкостной составляющей из тока утечки на корпус судна. Отметим, что однофазные замыкания на корпус судна чаще всего наблюдаются в бытовых сетях 220 В независимо от рода тока.

Трёхфазные нерегулируемые (односкоростные) электроприводы переменного тока напряжением 380 В при распределении электроэнергии на постоянном токе питают через групповые автономные инверторы I_1 (рис. 1, б). Такие же электроприводы, но регулируемые по частоте вращения, получают питание через индивидуальные инверторы I_2 : ведомые сетью – у вентильных электродвигателей, регулируемых величиной напряжения, и автономные транзисторные инверторы – у асинхронных электродвигателей, регулируемых величиной напряжения и её частотой в соотношении $U/f = const$. Получается, что в данной системе распределения электроэнергии источником питающего напряжения у трёхфазных электроприводов переменного тока выступают инверторы. Поэтому их и называют *вентильными генераторами переменного тока* (ВГПЕТ).

Индивидуальные инверторы устанавливают вблизи питаемых электроприводов, как правило, на их статорах. Так что питание к этим инверторам подают с шин ГРЩ по двухжильным кабелям, и только на коротком участке: от зажимов инвертора до клемм электродвигателя – по трёхжильному кабелю.

При распределении электроэнергии на постоянном токе существенно упрощается схема питания самых мощных, регулируемых электроприводов: ГЭД, подруливающих и грузовых устройств, механизмов технологического назначения. В них отсутствуют крупногабаритные трёхобмоточные трансформаторы (рис. 1, а), а вместо статических полупроводниковых преобразователей частоты $СППЧ$ со звеном постоянного тока используют более простые инверторы I_2 (рис. 1, б).

Значительно упрощается схема и облегчается двухполюсной ГРЩ постоянного тока вместо трёхфазного ГРЩ переменного тока. Вследствие упрощения управлением вентильными генераторами постоянного тока уменьшается количество приборов и регуляторов на генераторных панелях в составе ГРЩ постоянного тока, а панель управления исчезает полностью. На их распределительных панелях используют двухполюсные автоматические выключатели и ошиновку отходящих фидеров вместо трёхполюсных аналогов.

Сокращаются расходы на кабельную распределительную сеть благодаря тому, что наиболее протяжённые её участки выполняются двухжильными кабелями или шинопроводами.

Способы регулирования напряжения на шинах ГРЩ постоянного тока. Особенностью СЭЭС с шинами постоянного тока и его преимуществом является то, что качество электроэнергии характеризует всего лишь один параметр – напряжение. У синхронных вентильных генераторов постоянного тока с электромагнитным возбуждением регулирование напряжения на шинах ГРЩ постоянного тока производят воздействием на ток их обмотки возбуждения посредством автоматического регулятора напряжения (АРН).

У ВГПОТ, возбуждаемых постоянными магнитами, обмотка возбуждения отсутствует, и магнитное поле генератора постоянно. Для выпрямления его переменного тока применяют

шестиполусный мостовой полупроводниковый выпрямитель 3, собранный на диодах (рис. 2, г), тиристорах (рис. 2, д) или силовых транзисторах (рис. 2, е). У диодного, неуправляемого, выпрямителя форма выпрямленного напряжения U_d показана на рисунке 3, а. Его составляющими являются среднее значение напряжения U_{d0} , полученное при угле управления

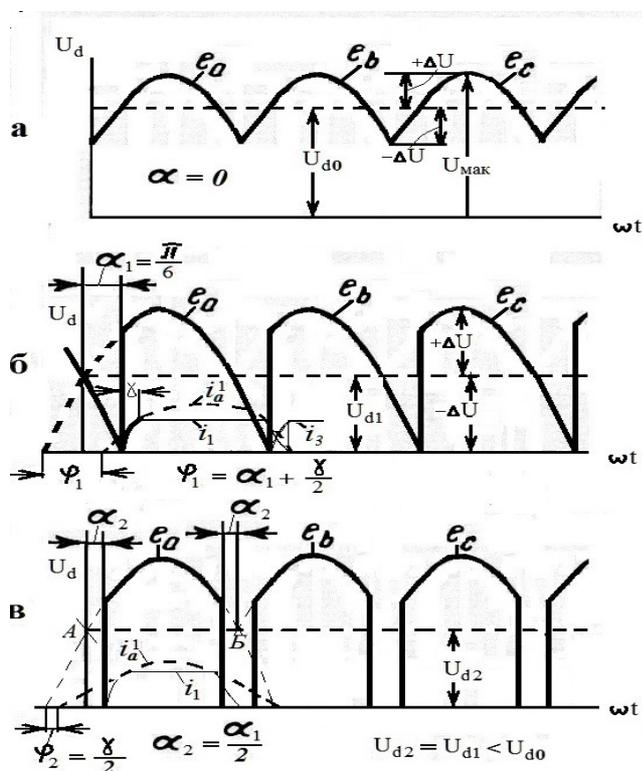


Рисунок 3. Временные диаграммы ЭДС, выпрямленного напряжения и тока вентильного генератора: с неуправляемым выпрямителем (а) и управляемыми выпрямителями на тиристорах (б) и силовых транзисторах (в);

i_1, i_3 – токи вентилей № 1 и № 3 анодной группы мостового выпрямителя; i_{a1} – ток основной гармоники фазы «А» генератора; α, γ – соответственно углы управления и коммутации вентилей; φ – фазовый угол сдвига между основной гармоникой фазного тока и фазной ЭДС;

U_{d0}, U_{d1}, U_{d2} – выпрямленное напряжение выпрямителя при углах соответственно $\alpha = 0, \alpha_1$ и α_2

$\alpha = 0$, и наложенные на него пульсации напряжения $\pm \Delta U$. С помощью полярной (электролитической) конденсаторной батареи, подключаемой на зажимы выпрямителя, выпрямленное напряжение может быть сглажено и повышено до значения U_{\max} . Регулирование выходного напряжения диодного выпрямителя осуществляют посредством промежуточного преобразователя постоянного напряжения ППН 5 (рис. 2, г), у которого регулирование напряжения U_d основано на принципе широтно-импульсного регулирования (рис. 4).

Широтно-импульсный регулятор (ШИР) – это электронное устройство, с помощью которого регулируют поток электрической энергии с целью стабилизации выходного напряжения независимо от входного напряжения или нагрузки. ШИР-регулятор работает на принципе сравнения компаратором (нуль-органом) K (рис. 4, а, в) сигналов опорного напряжения $U_{оп}$ и модулирующего (управляющего) напряжения U_m . Модулирующий сигнал U_m формируют задающим блоком ЗБ путём вычитания в сумматоре C из сигнала заданного напряжения $U_{зад}$ сигнала действительного выходного напряжения $U_{дей}$ – сигнала обратной связи. Сигнал их разности o_u после усиления в усилителе $У$ направляют в ШИР-регулятор (ППН) на инвертирующий вход его компаратора K как сигнал модулирующего напряжения U_m . Его сравнивают со стабильным сигналом опорного напряжения $U_{оп}$ пилообразной формы, формируемого генератором пилообразного напряжения ГПН на инвертирующем входе компаратора K . В точке пересечения этих сигналов (рис. 4, в), имеющих противоположную полярность, результирующий сигнал будет равен нулю. Компаратор (нуль-орган) K (рис. 4, а) релейно переключается, посылая сигнал на формирователь управляющих импульсов ФУИ, называемый драйвером. С его выхода подают сигнал включения транзисторного коротко-замыкателя ТК, представляющего собой параллельную цепь с незначительным сопротивлением R . Отпира-

ние транзисторного ключа приводит к замыканию выпрямителя на сопротивление R (практически на коротко), что приводит к провалу выходного напряжения $U_{\text{вых}}$ в течение паузы $t_{\text{п}}$. В конце цикла пилообразного напряжения $T_{\text{ц}}$ на инвертирующем входе компаратора K устанавливается нулевой сигнал, которым он возвращается в исходное состояние. Транзисторный короткозамыкатель выключается, напряжение на выходе ППН (ШИР) восстанавливается и начинается новый цикл пилообразного напряжения.

Процесс регулирования напряжения вентильного генератора с постоянными магнитами посредством ППН (ШИР) протекает следующим образом. Выходное напряжение $U_{\text{д0}}$ неуправляемого выпрямителя B несколько превышает номинальное напряжение сети $U_{\text{вых.н}}$ (рис. 4, б). Чтобы снизить напряжение сети до номинального значения, задающий сигнал на сумматоре C (рис. 4, а) устанавливают равным номинальному значению $U_{\text{зад.н}}$. Это приводит к установлению на неинвертирующем входе компаратора K модулирующего сигнала $U_{\text{м.н}}$ (рис. 4, в). С его приходом ШИР-регулятор переключается на режим периодического прерывания выпрямленного напряжения $U_{\text{д}}$, как описано выше, с периодом, равным $T_{\text{ц}}$. Он состоит из времени импульса выходного напряжения $t_{\text{и.н}}$ и времени паузы $t_{\text{п.н}}$. Среднее значение выходного напряжения ППН (ШИР) уменьшается и устанавливается на уровне номинального значения $U_{\text{вых.н}}$ (рис. 4, г).

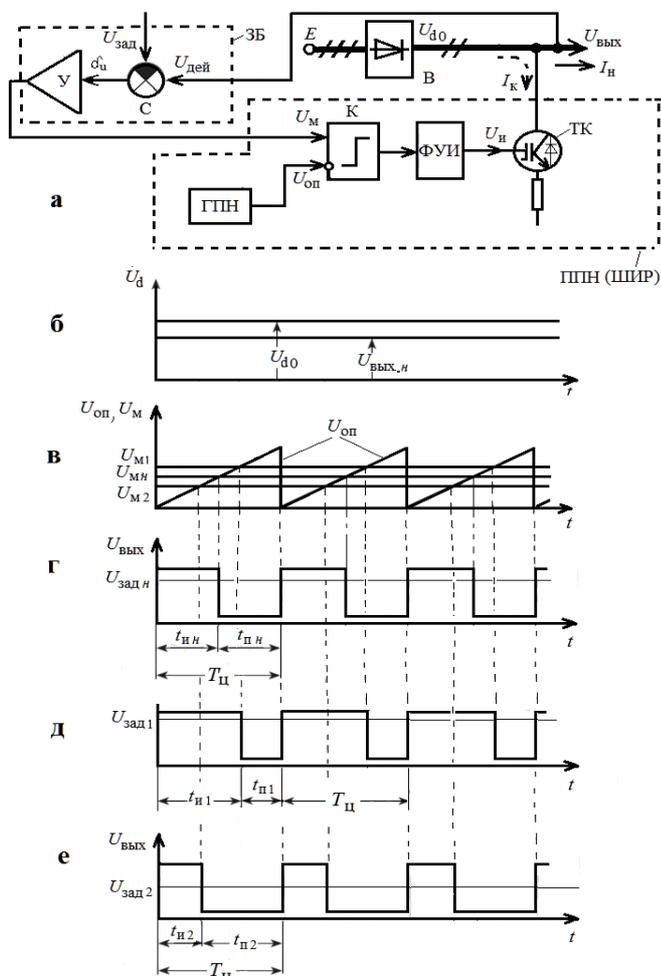


Рисунок 4. Упрощённая схема (а) и временные диаграммы работы преобразователя постоянного напряжения (ППН): б – выходное напряжение $U_{\text{д}}$ выпрямителя B ; в – входные сигналы компаратора K : $U_{\text{оп}}$ – опорное напряжение, $U_{\text{м}}$ – модулирующее (управляющее) напряжение; г, д, е – выходное напряжение ППН при различных значениях модулирующего сигнала: $U_{\text{м2}} < U_{\text{м.н}} < U_{\text{м1}}$; ЗБ – задающий блок; С – сумматор сигналов действительного $U_{\text{дей}}$ и заданного $U_{\text{зад}}$ напряжений; У – усилитель сигнала расогласования напряжений $\delta_{\text{ц}}$; ГПН – генератор пилообразного напряжения; К – компаратор опорного и модулирующего сигналов; ФУИ – формирователь управляющих импульсов (драйвер) ТК; ТК – транзисторный короткозамыкатель

Контур обратной связи непрерывно контролирует выходное напряжение ППН (ШИР) и регулирует модулирующее напряжение для поддержания выходного напряжения на заданном, номинальном уровне. В частности, при снижении выходного напряжения сети ниже номинального блок ЗБ устанавливает модулирующий сигнал на неинвертирующем входе компаратора K $U_{\text{м.1}} > U_{\text{м.н}}$ (рис. 4, в). Ширина импульсов выходного напряжения $t_{\text{и.1}}$ увеличивается

ется, а ширина пауз $t_{п.1}$ уменьшается при неизменной продолжительности цикла $T_{ц} = \text{const}$ (рис. 4, д). Среднее значение выходного напряжения *ППН* (*ШИР*) при этом возрастает до $U_{\text{вых.1}} > U_{\text{вых.н}}$, что приводит в конце переходного процесса к восстановлению его номинального значения.

При увеличении выходного напряжения сети выше номинального значения, задающий блок *ЗБ* устанавливает модулирующий сигнал на неинвертирующем входе компаратора *К* $U_{м.2} < U_{м.н}$ (рис. 4, в). Это вызывает процесс изменения ширины импульса $t_{и.2}$ и паузы $t_{п.2}$ (рис. 4, е), а также выходного напряжения *ППН* (*ШИР*), обратный описанному выше. В результате этого среднее значение выходного напряжения уменьшается до $U_{\text{вых.2}} < U_{\text{вых.н}}$, что к концу переходного процесса приводит к восстановлению заданного, номинального значения.

Для регулирования напряжения управляемого выпрямителя, собранного на однооперационных тиристорах (рис. 2, д), применяют горизонтальный, односторонний принцип изменения угла управления α_1 тиристорами (рис. 3, б), что приводит к искусственному смещению фазного угла между кривыми основных гармоник тока и напряжения вентильного генератора на угол

$$\varphi_1 = \alpha_1 + \gamma / 2,$$

где α_1 – односторонний угол управления тиристорами выпрямителя;

γ – угол коммутации тиристоров.

Это вызывает загрузку ВППОТ балластной реактивной энергией. При одностороннем фазовом управлении углом α_1 заметно возрастает размах пульсаций выпрямленного напряжения U_d , формируемого из синусоидальных кривые фазных ЭДС генератора e_a, e_b, e_c . В результате генератор и выпрямитель загружаются дополнительно ещё и энергией искажений. Для сглаживания пульсаций напряжения U_d увеличивают мощность (ёмкость) и габариты фильтрующего оборудования в цепи постоянного тока.

У активных, транзисторных выпрямителей (рис. 2, е) регулирование выходного, выпрямленного напряжения производят посредством двустороннего, симметричного смещения угла α_2 управления транзисторами (рис. 3, в) относительно двух точек отсчёта: «А» и «Б». Такой способ управления возможен только у транзисторного выпрямителя либо выпрямителя собранного на двухоперационных тиристорах, благодаря разным способам запираания однооперационного тиристора по сравнению с транзистором и двухоперационным тиристором. При одинаковом значении выпрямленного напряжения U_{d1} тиристорного (рис. 3, б) и U_{d2} транзисторного (рис. 3, в) выпрямителей двусторонний угол управления α_2 транзисторами будет равен половине одностороннего угла α_1 управления тиристорами. При двустороннем способе регулирования выходного напряжения U_d выпрямителя вентильный генератор реактивной мощностью практически не загружается, так как фазный угол сдвига φ_2 равен всего лишь половине угла коммутации $\gamma / 2$ (рис. 3, в). В принципе, подбором углов управления $\alpha_{2A} < \alpha_{2B}$ можно добиться, чтобы угол φ_2 был равен нулю. Гармонический состав выпрямленного напряжения при двустороннем регулировании угла α_2 близок к тому, что имеет диодный выпрямитель (рис. 3, а). Незначительным увеличением ёмкости сглаживающего конденсатора пульсации напряжения снижаются до нормированного значения.

Способы формирования автономным инвертором на силовых транзисторах синусоидальной формы выходного напряжения. При работе активного транзисторного преобразователя в режиме автономного инвертора I_1 (рис. 1, б), превращающегося в вентильный

генератор переменного тока (ВГПЕТ), его выходное синусоидальное напряжение формируют по принципу высокочастотной широтно-импульсной модуляции (ШИМ).

Основой автономного инвертора является вентиляльное переключающее устройство на силовых транзисторах типа IGBT (рис. 5, а). Как функциональный элемент, широтно-импульсный модулятор напряжения преобразует непрерывный входной управляющий (модулирующий) сигнал синусоидальной формы $U_{м. зад}$ (рис 5, г) в высокочастотную периодическую последовательность импульсов выходного напряжения U_2 (рис. 5, б, д). При изменении величины задающего сигнала пропорциональное изменение среднего значения выходного напряжения обеспечивают изменением ширины высокочастотных импульсов, то есть путем широтно-импульсной модуляции.

Период T модулирующего (задающего) сигнала $U_{м. зад}$ (рис 5, г) определяет частоту ос-

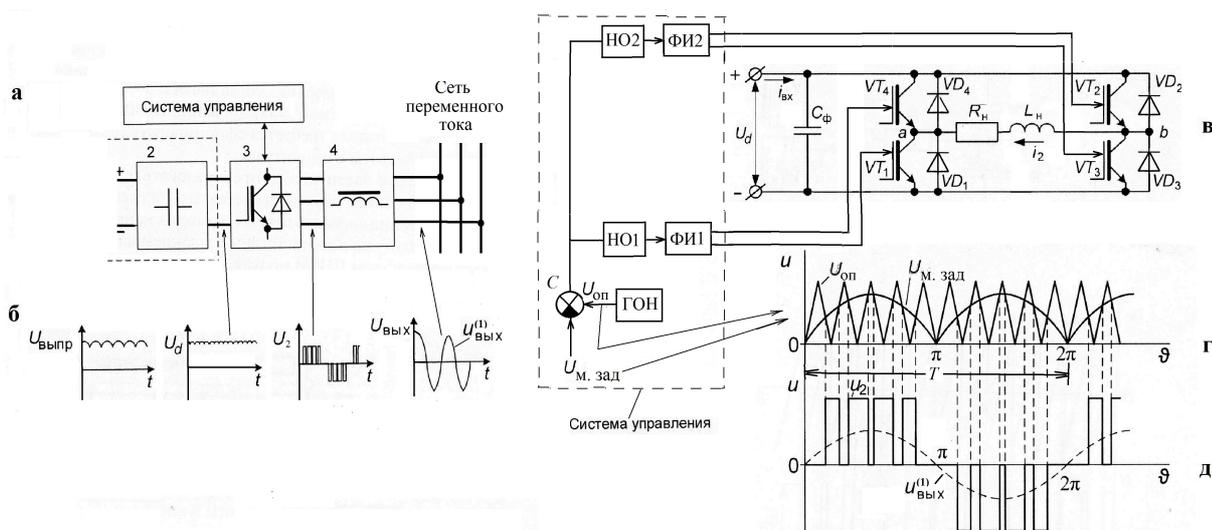


Рисунок 5. Структурная схема ВГПЕТ, питающего сеть переменного тока (а), функциональное назначение её элементов (б), принципиальная схема и принцип широтно-импульсной модуляции, используемый при формировании выходного синусоидального напряжения однофазного автономного инвертора на транзисторах (в, г, д);

ГОН – генератор опорного напряжения $U_{оп}$; НО1, ФИ1 – соответственно нуль-орган и формирователь (драйвер) импульсов управления транзисторами низкой частоты; НО2, ФИ2 – соответственно нуль-орган и формирователь импульсов управления транзисторами высокой частоты; $u_{вых}^{(1)}$ – первая гармоника отфильтрованного выходного напряжения

новой гармоники выходного напряжения $u^{(1)}_{вых}$ (рис 5, б, д). Если автономный инвертор является источником питания сети переменного тока, то период модулирующего сигнала поддерживают неизменным: $T_{м. зад} = const$. Регулируют только его величину: $U_{м. зад} = var$. А если нагрузкой автономного инвертора является отдельный электропривод переменного тока с регулированием его угловой скорости частотным методом, то у модулирующего сигнала задающими являются и величина, и период: $U_{м. зад} = var$, $T_{м. зад} = var$, в соотношении $U/f = const$.

Принцип формирования серии импульсов ШИМ в течение полупериода π показан на примере однофазного мостового автономного инвертора напряжения (рис. 5, в). При этом одна пара силовых транзисторов, например, $VT1$ и $VT4$, переключается драйвером $ФИ1$ на границах полупериода синусоидального модулирующего сигнала $U_{м. зад}$, а вторая пара транзисторов переключается драйвером $ФИ2$ с несущей высокой частотой опорного сигнала $U_{оп}$.

Длительность управляющих импульсов, подаваемых на транзисторы, формируют в результате сравнения опорного напряжения и модулирующего сигнала в сумматоре C (рис. 5, г).

Формирование импульсов выходного напряжения U_2 на выходе инвертора, например, положительной полярности, обеспечивается при совпадении сигналов включения транзисторов $VT1$ и $VT2$ (рис. 5, в). Поскольку транзистор $VT2$ переключается с высокой частотой, то в момент его выключения, для образования паузы, транзистор $VT1$ продолжает оставаться включенным. Это приводит к пропуску индуктивного тока нагрузки, через транзистор $VT1$ и обратный диод $VD3$ для перевода магнитной энергии, накопленной в индуктивности нагрузки, в тепловую энергию её активного сопротивления. При этом на выходе инвертора напряжение равно сумме падений напряжения на транзисторе и диоде, т. е. в момент высокочастотной паузы близко к нулю.

Аналогично этому создаются паузы выходного напряжения и при формировании отрицательной полуволны выходного напряжения U_2 , сдвинутой по фазе на 180° эл.: при выключении транзистора $VT3$ ток нагрузки замыкается через транзистор $VT4$ и обратный диод $VD2$.

Форма опорного сигнала, формируемого генератором опорного напряжения $ГОН$, влияет на продолжительность пауз модулированного выходного напряжения инвертора. Она может быть пилообразной (рис. 4, в) или иметь треугольную форму. При использовании в ШИМ-регуляторах пилообразной формы опорного сигнала из кривой выходного напряжения выпадают 3-я и 5-я высшие гармонические составляющие тока, а при треугольной форме опорного напряжения – выпадают 5-я и 7-я гармоники (рис. 5, г). В каждом конкретном случае используют ту форму опорного напряжения, при которой выпадают те высшие гармоники низкого порядка, которые труднее отфильтровать для данного частного случая.

Рассмотренные процессы в трёхфазном мостовом автономном инверторе протекают аналогично тем, что изложены выше для однофазного мостового преобразователя. С той лишь разницей, что они протекают в трёх парах вентилях трёхфазного мостового преобразователя, и сдвинуты по фазе относительно друг друга на 120° эл. Соответственно и драйверы $ФИ1$ и $ФИ2$ содержат каждый не два выходных канала управления транзисторами, а три канала. При этом выходные каналы драйвера $ФИ1$ переключают транзисторы анодной группы преобразователя через каждый полпериода задающего модулирующего сигнала $U_{м. зад.}$. А аналогичные каналы драйвера $ФИ2$ переключают транзисторы катодной группы с высокой частотой сигналов ШИМ.

Преимуществом способа регулирования напряжения методом ШИМ является сдвиг спектра высших гармоник выходного напряжения в область высоких кратностей и их существенно сниженный процентный объём относительно основной гармоники. Эти высшие гармонические составляющие тока и напряжения легко фильтруются выходным реактором (дросселем) L (рис. 5, а) с относительно небольшой индуктивностью. Соответственно мощность, масса, габариты и стоимость такого реактора сравнительно невелики.

Недостатком метода ШИМ является относительно сложный алгоритм управления транзисторами, большие потери энергии на их управление, приводящие к понижению КПД преобразователя и необходимости более интенсивного его охлаждения. Всё это необходимо учитывать при проектировании инвертора и в период его эксплуатации.

Способы регулирования параметров выходного синусоидального напряжения автономных инверторов на силовых транзисторах.

1. Стабильность частоты выходного напряжения группового автономного инвертора I_1 (рис. 1, б), питающего нерегулируемые асинхронные электродвигатели, поддерживают за счёт сохранения напряжения на шинах ГРЩ постоянного тока за счёт АРН вентильных гене-

раторов G при одновременном регулировании подачи энергоносителя в их приводные двигатели ПД в функции текущей нагрузки [6]. При этом параметры задающего модулирующего сигнала (рис. 5, г), посылаемого в систему управления транзисторами группового автономного инвертора, поддерживают постоянными $U_{м. зад} = const$, $T_{м. зад} = const$.

2. Регулирование частоты вращения у отдельных электроприводов частотным способом по закону $U_{вых} / f_{вых} = const$ выполняют посредством индивидуальных автономных инверторов I_2 (рис. 1, б). При этом задающий модулирующий сигнал на входе системы управления инвертором регулируют как по величине $U_{м. зад} = var$, так и по его периоду $T_{м. зад} = var$.

Параметры сигнала опорного напряжения – его величина $U_{оп}$ и частота $f_{оп}$ – у группового и индивидуальных автономных инверторов сохраняют стабильными $U_{оп} = const$, $f_{оп} = const$.

В зависимости от назначения судна, его режимов работы и конкретного перечня приёмников электроэнергии, питаемых от ЭЭС, её распределение на постоянном токе может быть частичным или полным.

При частичном распределении электроэнергии на постоянном токе (рис. 6) приёмники переменного тока I_7 общесудовых систем, как правило, нерегулируемые, получают питание непосредственно от синхронных генераторов I_1 через ГРЩ переменного тока 2 либо с РЩ трансформаторной подстанции 12 . Электроприводы, регулируемые по частоте вращения, получают питание от сети переменного тока посредством локальных участков с частичным распределением электроэнергии на постоянном токе. Их распределительный щит (РЩ) 5 на постоянном токе получает питание через силовые преобразовательные трансформаторы 3 и выпрямители 4 . Чаще всего, для питания РЩ постоянного тока используют трёхобмоточные трансформаторы напряжения с двумя вторичными обмотками, векторы напряжения которых сдвинуты на 30° за счёт соединения вторичных обмоток в «звезду» и «треугольник». К каждой обмотке подключен неуправляемый мостовой полупроводниковый выпрямитель 4 . Их выходные зажимы соединяют последовательно или параллельно. Такое двенадцатипульсное выпрямление напряжения улучшает его качество, как на стороне переменного, так и постоянного тока.

Мощные многоскоростные электроприводы переменного тока – ГЭД 9 , подруливающие устройства 13 , винторулевые колонки 14 и др. – получают питание от РЩ 5 постоянного тока через полупроводниковые инверторы 6 , ведомые сетью, – у вентильных двигателей, либо автономные инверторы 7 – у асинхронных двигателей. В режимах маневрирования судна возможен переход гребных электродвигателей 7 из двигательного режима работы в генераторный режим с рекуперацией электроэнергии на шины РЩ 5 . Это происходит в процессе генераторного торможения ГЭД, когда гребной винт работает в режиме приводной турбины, что существенно сокращает время реверса винта. Главный двигатель 8 при этом отключают от редуктора 10 разобщительной муфтой. Для реализации переходов ГЭД 9 из двигательного режима в генераторный и обратно преобразователь 6 должен быть активным (обратимым). Для поглощения рекуперированной энергии к шинам ГРЩ 5 подключают суперконденсаторную батарею (СКБ) 18 и / или статический накопитель энергии (СНЭ) 15 , содержащий двунаправленный (обратимый) преобразователь постоянного напряжения 16 .

Источники электроэнергии в такой системе – синхронные генераторные агрегаты – работают с постоянной частотой вращения $n = const$ и производят электроэнергию с номинальным напряжением и частотой при любой нагрузке от холостого хода до номинальной. Работа приводного ДВС синхронного генератора с постоянной частотой вращения в режимах малых нагрузок протекает, как отмечено выше, неэкономично и с низкими экологическими показателями. В этом и состоит один из существенных недостатков системы распределения на переменном токе.

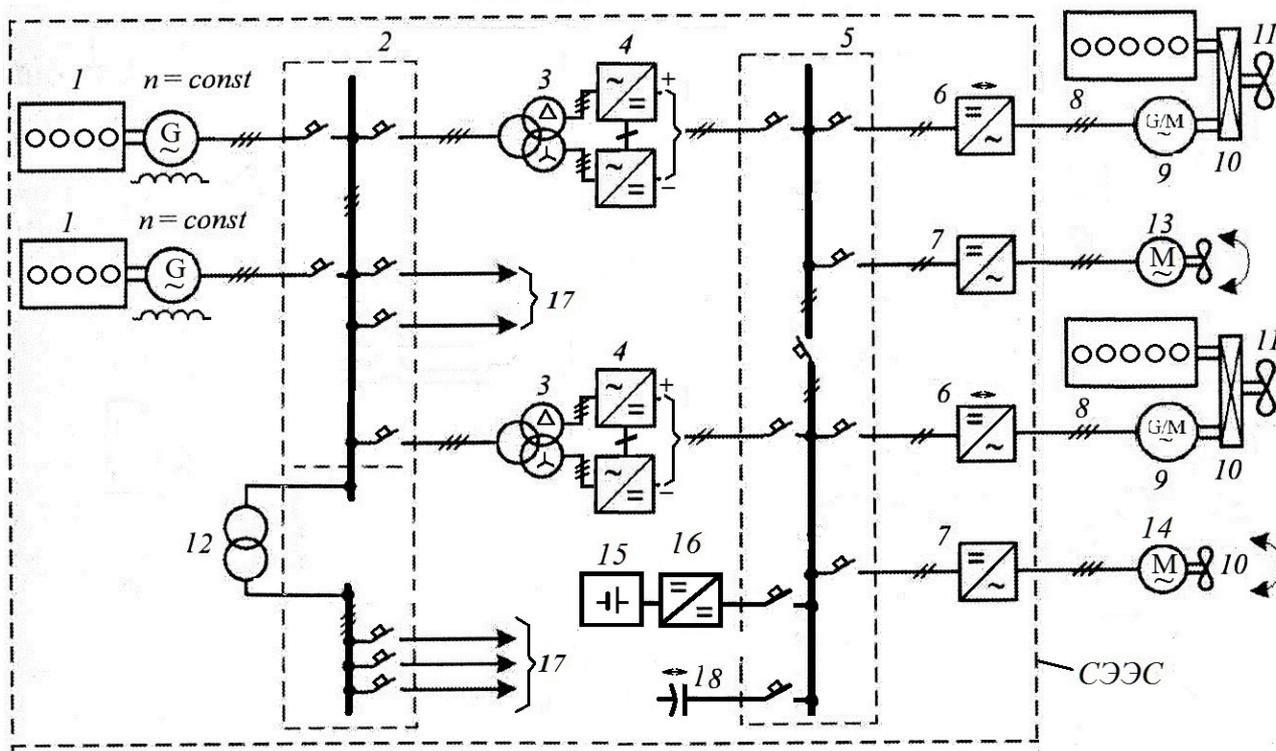


Рисунок 6. Структурная схема ЭЭС с частичным распределением электроэнергии на постоянном токе на судне с двухвальной гибридной движительной установкой:

1 – дизель-генераторы с $n = \text{const}$; 2 – ГРЦ переменного тока; 3 – трёхобмоточные преобразовательные трансформаторы; 4 – полупроводниковые 12-фазные неуправляемые выпрямители; 5 – РЩ постоянного тока; 6 – полупроводниковые обратимые инверторы; 7 – полупроводниковые автономные инверторы / выпрямители; 8 – среднеоборотный тепловой главный двигатель; 9 – ГЭД; 10 – редуктор; 11 – винт фиксированного шага; 12 – силовой понижающий трансформатор; 13, 14 – реверсивные электроприводы соответственно подруливающего устройства и выдвигной винтовой колонки; 15-16 – СНЭ в составе аккумуляторной батареи 15 и обратимого преобразователя постоянного напряжения 16; 17– приёмники общесудовых систем; 18 – суперконденсаторная батарея

ЭЭС с частичным распределением электроэнергии на постоянном токе применяют, в частности, на судах с гибридными движительными комплексами. Гребной винт *II* приводят во вращение от теплового главного двигателя 8 (дизеля или турбины) и от вспомогательного гребного электродвигателя 9. Если ГД является среднеоборотным, то суммирование их вращающих моментов производят посредством редуктора 10, а, если он является малооборотным, – то это суммирование производят посредством соединения их валов в тандем.

Частичное распределение электроэнергии на постоянном токе целесообразно также и для ЭЭС судов с динамическим способом позиционирования своего корпуса. Их позиционирование в заданной координатной точке осуществляют посредством реверсивных носовых и кормовых выдвигных винтовых электрических колонок (ВВЭК) 13 и 14, питаемых с промежуточного ГРЦ 5 постоянного тока.

В ЭЭС с полным распределением электроэнергии на постоянном токе (рис. 7) всю электроэнергию, вырабатываемую генераторными агрегатами 1, направляют через полупроводниковые выпрямители 2 на главный распределительный щит 3 постоянного тока. Генераторные агрегаты работают с переменной частотой вращения в определённом её диапазоне: от 60–80 до 100 % её номинального значения в функции от их текущей нагрузки. В качестве источников электроэнергии применяют синхронные вентильные генераторы с электромагнитным возбуждением или возбуждаемые постоянными магнитами.

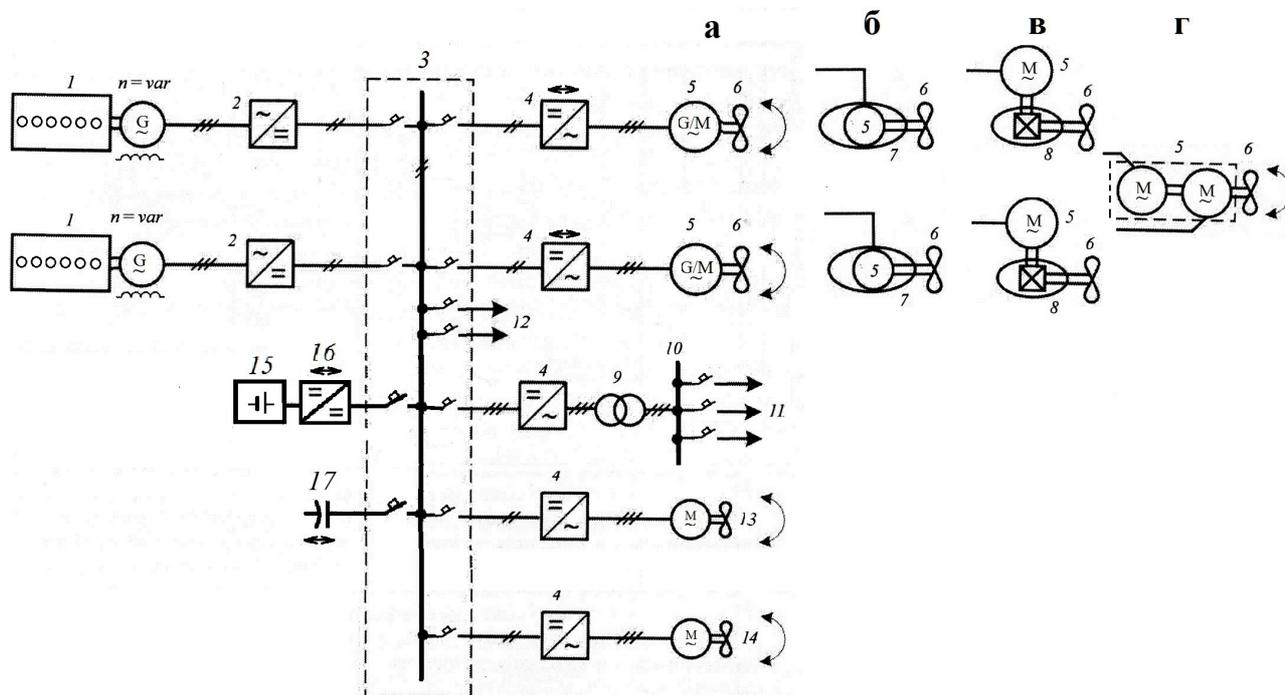


Рисунок 7. Структурная схема единой ЭЭС с полным распределением электроэнергии на постоянном токе на судне с двухвальной ГЭУ:

1 – вентильные дизельгенераторы с $n = var$; 2 – полупроводниковые неуправляемые выпрямители; 3 – ГРЩ постоянного тока; 4 – полупроводниковые автономные инверторы; 5 – ГЭД; 6 – гребные винты фиксированного шага; 7 – электрическая ВРК; 8 – механическая ВРК; 9 – согласующий трансформатор; 10 – РЩ переменного тока; 11 – приёмники переменного тока общесудовых систем; 12 – приёмники постоянного тока; 13 – реверсивный электропривод подруливающего устройства; 14 – электропривод ВВК; 15-16 – СНЭ; 17 – суперконденсаторная батарея

От ГРЩ 3 постоянного тока получают питание через активные (обратимые) автономные инверторы 4 реверсивные гребные электродвигатели 5 одно- или двухвальных гребных электрических установок. ГЭД 5 приводят во вращение гребные винты фиксированного шага 6 (рис. 7, а). При эксплуатации данных ГЭУ возможен, как и в гибридных движительных установках, переход ГЭД 5 из двигательного режима работы в генераторный режим с рекуперацией электроэнергии на шины ГРЩ 3 постоянного тока.

Структура электродвигательной установки в данной системе может быть различной. Она может представлять традиционный гребной малооборотный реверсивный электродвигатель, как правило вентильный, который установлен в машинном отделении и соединён – напрямую с гребным винтом 6 посредством гребного вала (рис. 7, а). В другом варианте, аналогичный тандем встраивают в забортную электрическую винторулевую колонку (ВРК) 7 (рис. 7, б). ГЭД 5 в данном варианте является неререверсивным, так как поворот и реверс судна обеспечивают за счёт разворота ВРК 7 на 180° в обоих направлениях. В третьем варианте (рис. 7, в), неререверсивный среднеоборотный асинхронный ГЭД 5, установленный в машинном отделении, передаёт вращающий момент на гребной винт через редуктор полноповоротной механической ВРК 8. В четвёртом варианте, в одновальной гребной электрической установке гребной винт 6 вращают напрямую два малооборотных реверсивных вентильных электродвигателя, соединённые валами в тандем (рис. 7, г). Либо один вентильный электродвигатель содержит две статорные обмотки (не показано), сдвинутые в пространстве одна относительно другой на 30° .

Индукторы вентильных ГЭД во всех вариантах ГЭУ могут иметь электромагнитное возбуждение или постоянные магниты.

По данной структурной схеме (рис. 7) проектируют распределение электроэнергии на постоянном токе на высокоманевренных судах-электроходах с единой электроэнергетической системой и теплоэлектроходах с гибридными движительными установками.

Отличительной особенностью СЭЭС с распределением электроэнергии на постоянном токе: полным или частичным, является присутствие в её составе фильтрующих, сглаживающих и демпфирующих накопительных звеньев. Функции фильтрующих и сглаживающих элементов выполняют локальные конденсаторные батареи (или дроссели), подключаемые буферно на выходе выпрямителей вентильных генераторов, а также на входе или выходе автономных инверторов распределительной сети.

А в качестве демпфирующих звеньев используют, во-первых, статический накопитель энергии, которым является аккумуляторная батарея *GB*. Её вводят в состав электроэнергетических систем с переменным характером нагрузки и подключают к ГРЩ постоянного тока с помощью обратимого (двунаправленного) полупроводникового преобразователя постоянного напряжения *ППН* (рис. 1, б; рис. 6; рис. 7). А, во-вторых, суперконденсаторную батарею, которую подключают к шинам ГРЩ постоянного тока напрямую посредством коммутационно-защитной аппаратуры. СКБ является быстродействующим, импульсным накопителем энергии большой мощности и тока, заряд и разряд которой длится несколько секунд, т. е. в переходных режимах электросистемы. Тогда как аккумуляторная батарея накапливает и отдаёт энергию в течение нескольких часов, поскольку заряжается и разряжается более медленно, преимущественно в установившихся режимах электросистемы. Её и называют, поэтому, статическим накопителем энергии.

Суперконденсатор – это одна из разработок последних 10–15 лет. Представляет собой электротехническое изделие, ранее науке неизвестное, работа которого основана на симбиозе принципов действия обычного электролитического (полярного) конденсатора и аккумуляторных батарей новейших типов: литий-ионных, в частности.

Функции отмеченных накопителей в зависимости от места их присоединения и ёмкости различны. Локальные КБ либо сглаживающие реакторы (дроссели) на выходе выпрямителей служат соответственно для сглаживания выпрямленного напряжения либо тока, а также для снижения пульсаций напряжения либо тока в цепи постоянного тока.

Локальные КБ на входе автономных транзисторных инверторов предназначены для обмена реактивной энергией, накапливаемой индуктивностями приёмников сети, питаемых переменным напряжением от этих инверторов.

Суперконденсаторная батарея может быть использована, как импульсный источник энергии большой мощности для разных целей. Например, как динамический компенсатор колебаний напряжения на шинах постоянного тока, как источник энергии для устройств защиты сети от токов короткого замыкания без выдержки времени с использованием новых принципов настройки селективности защиты, как источник питания стартерных систем двигателей

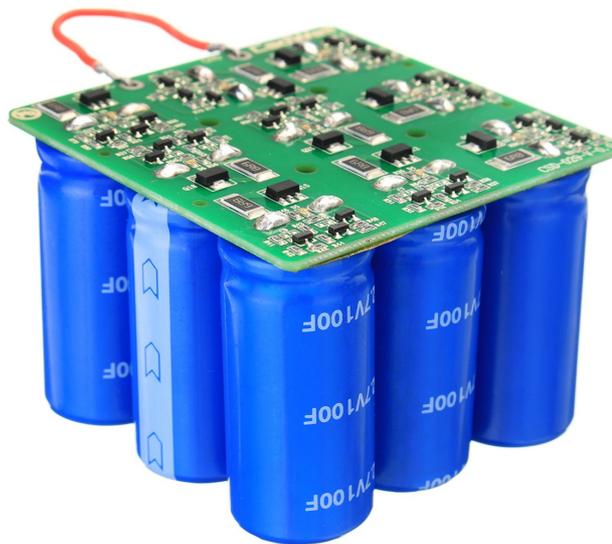


Рисунок 8. Внешний вид батареи суперконденсаторов, предназначенной для запуска двигателя внутреннего сгорания

внутреннего сгорания (рис. 8) и иных механизмов с энергоёмким вводом в действие. Последняя функция СКБ делает перспективной замену громоздкой, энергоёмкой, инерционной и малонадёжной воздушной системы запуска судовых ДВС на малогабаритную, быстродействующую, практически безотказную электростартерную систему пуска [5].

Аккумуляторную батарею применяют отдельно или в комплекте с СКБ в качестве демпфирующего источника энергии в режимах СЭЭС с импульсным характером нагрузки, сопровождаемых рекуперацией энергии торможения крупных электроприводных механизмов в сеть. В период избытка электроэнергии, генерируемой в указанных случаях электродвигателями, переходящими в генераторный режим, аккумуляторная батарея 15 (рис. 6, рис. 7) запасает её «впрок», а в период её дефицита – включение и разгон электроприводных механизмов – возвращает электроэнергию в сеть. Изменение направления электроэнергии в цепи аккумуляторной батареи производят за счёт системы управления обратимым преобразователем постоянного напряжения ППН 16.

Благодаря демпфирующему действию СНЭ и СКБ происходит сглаживание колебаний нагрузки на основные генерирующие источники электроэнергии с повышением её среднего значения до экономически благоприятного эксплуатационного уровня. За счёт этого улучшаются экономические, экологические, пожаробезопасные и сервисные показатели работы генераторных агрегатов.

В перспективе в качестве СНЭ могут применять и более ёмкие накопительные средства: как статические – сверхпроводящий индуктивный накопитель (СПИН), так и кинетические – криогенный или маховичный накопитель [3]. СПИН может хранить накопленную энергию сколь угодно долго. А маховичный накопитель, обладая, в частности, гироскопическим эффектом, может быть использован в штормовых условиях ещё и как средство успокоения качки судна.

На достижение отмеченных выше положительных целей в ЭЭС с полным распределением электроэнергии на постоянном токе направлена, как отмечено выше, ещё и возможность работы ВГПОТ с дизельным приводным двигателем с переменной частотой вращения в функции их текущей нагрузки. Такая возможность появляется только у вентильных генераторов. Если одновременно со снижением текущей нагрузки приводного ДВС снизить его частоту вращения, то условия для сгорания топлива в его камерах улучшаются благодаря более медленному перемещению поршня в цилиндре двигателя [1, 6]. Следовательно, более продолжительному времени, отводимому на процесс сгорания топлива после его впрыска. Вследствие этого уменьшается количество образующихся в продуктах сгорания горючей сажи и токсичных газов, и связанные с ними эксплуатационные показатели ДВС: пожароопасность, трудоёмкость обслуживания, удельный расход топлива (рис. 9) и воздействие на окружающую среду.

Об экономической эффективности этого мероприятия свидетельствуют результаты исследования, проведенные в Хельсинском Университете. Они показывают, что уменьшение у дизель-генераторов, работающих с пониженной нагрузкой в диапазоне от 90 % до 30 % номинального значения, частоты вращения в пределах соответственно от 100 % до 80 % номинальной величины, позволяет уменьшить удельный расход топлива g_e соответственно от 0 до 15 % по сравнению с работой ДГ в режиме $n = \text{const}$ [6]. А расширение диапазона понижения

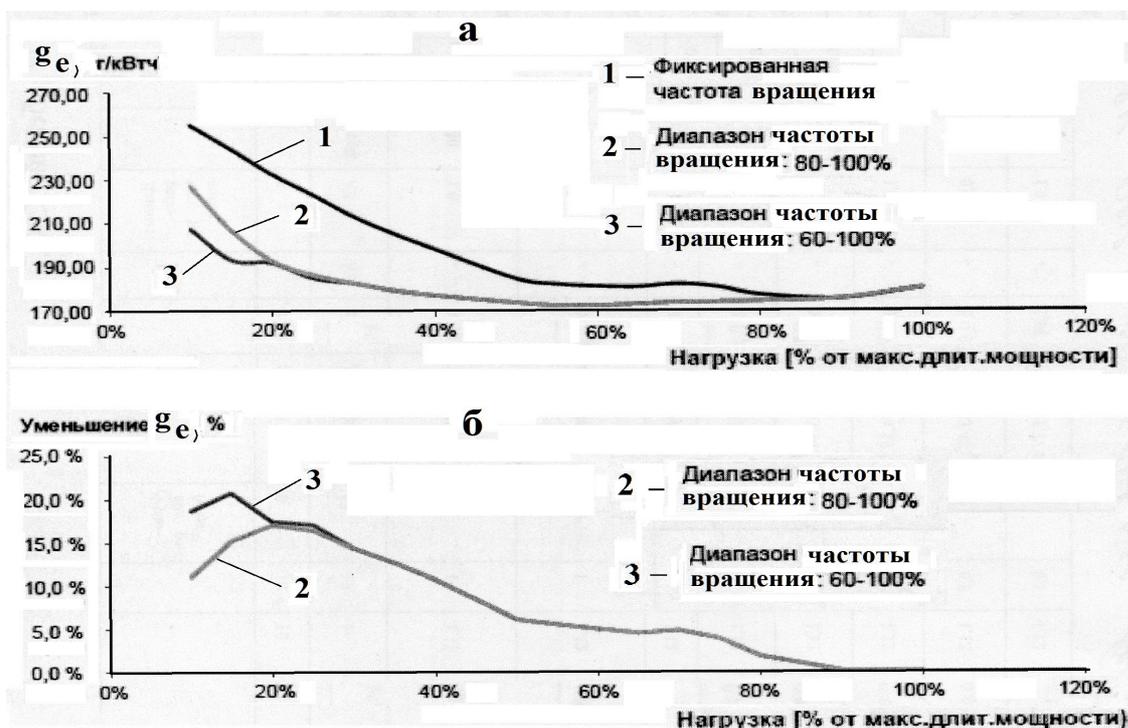


Рисунок 9. Оптимизационная зависимость удельного расхода топлива g_e от понижения частоты вращения и от диапазона этого понижения в режимах частичных нагрузок ДВС по сравнению с режимом постоянной частоты вращения (а) и процентного соотношения этого понижения (б)

частоты вращения до 100–60 % номинального значения продолжает снижать удельный расход топлива до 20 % даже в нагрузочных режимах 30–10 % номинальной нагрузки.

В ЭЭС переменного тока распределение электроэнергии на постоянном токе является сравнительно новой технологией электроснабжения. Для определённого класса судов она, безусловно, более прогрессивна и перспективна. С расширением сфер применения водородных электрохимических генераторов постоянного тока будут естественно расширяться и границы применения данной технологии на судах морского флота. Вместе с тем её применение порождает ряд новых проблем, требующих своего разрешения. В частности, насыщенность ЭЭС, в которых распределение электроэнергии производится на постоянном токе, полупроводниковой техникой, весьма чувствительной к любым перегрузкам и по току, и по напряжению, делает их защиту одной из наиболее первостепенных и сложных проблем.

Следует также заметить, что освещение данной технологии электроснабжения судов в учебной литературе практически ещё отсутствует.

Список литературы:

1. Радченко П. М., Коршунова З. В. Физические основы улучшения экологических характеристик судовых ДВС электрическими средствами. Science and technology research // Сбор. IV Межд. науч.-пр. кон. – Петрозаводск: МНПЦ «Новая наука», 2022. – С. 19–31.
2. Баранов А.Н. Судовые автоматизированные энергетические системы [Текст]: учебник / СПб: Судостроение, 2005. – 528 с.

3. РМРС. Правила классификации и постройки морских судов. Часть XI. Электрическое оборудование. / С-Петербург, 2020. – 331 с.
4. Н. В. Гулиа. Накопители энергии. [Текст]: монография / М.: «Наука», 1980. – 152 с.
5. Зубков Ю. В. и др. Исследование работы интегрированного стартер / генератора при запуске двигателя внутреннего сгорания // Вестник СГУ. Серия Технические науки. – Самара: Сам. гос. тех. ун-т, № 3(67), 2020. – С. 125–138.
6. Zahedi B. Optimized efficiency of all-electric ships by dc hybrid power systems / B. Zahedi, L. Norum, K. Ludvigsen // Journal of power sources. – 2014. – No.255. – pp. 341–354.

Поступила в редакцию 8 июня 2025 г.

Концепция создания ударного морского дрона-«камикадзе»

Соболенко Анатолий Николаевич, e-mail: sobolenko_a@mail.ru

Морской государственный университет имени адмирала Г.И. Невельского, г. Владивосток

В статье приводится попытка показать путь создания морского беспилотного глиссирующего катера с использованием отечественных комплектующих. Выполнены расчёты необходимой мощности главной пропульсивной установки для увеличения скорости стандартного катера с 70 км/ч до 120 км/ч, т.е. на 70%. Рассчитано, что обеспечения такой скорости необходимо мощность пропульсивной установки увеличить в два раза. Подобраны отечественные двигатели и предложено форсировать их по методу «Гипербар». Это позволяет повысить мощность каждого двигателя с 404 кВт до 808 кВт. Получаемое некоторое увеличение удельного эффективного расхода топлива не критично исходя из назначения катера. Предложено сделать прямую передачу мощности от двух главных двигателей на гребные винты при 1500 мин-1. Чтобы обойти вопрос кавитации гребных винтов применены суперкавитирующие гребные винты Арнесона.

Ключевые слова: глиссирующий катер, мощность энергетической установки, система «Гипербар», кавитация, гребной винт Арнесона.

Concept of creating a kamikaze-type attack sea drone

Sobolenko Anatoly N., e-mail: sobolenko_a@mail.ru

Maritime State University named after Admiral G.I. Nevelskoy, Vladivostok

The article attempts to show the way to create a marine unmanned gliding boat using domestic components. Calculations have been made of the required power of the main propulsion unit to increase the speed of a standard boat from 70 km/h to 120 km/h, i.e. by 70%. It is calculated that to ensure such a speed, the power of the propulsion unit must be doubled. Domestic engines have been selected and it has been proposed to boost them using the "Hyperbar" method. This allows increasing the power of each engine from 404 kW to 808 kW. The resulting slight increase in specific effective fuel consumption is not critical given the boat's purpose. It has been proposed to make a direct power transfer from the two main engines to the propellers at 1500 min-1. To get around the issue of propeller cavitation, supercavitating Arneson propellers are used.

Keywords: planning boat, power plant capacity, Hyperbar system, cavitation, Arneson propeller.

Объект исследования.

Современное развитие военной техники, как показала Специальная Военная Операция

на Украине, немислимо без создания и развития ударных дронов-камикадзе. Особое место здесь занимают морские беспилотные катера. К ним предъявляются жёсткие требования по мощности судовой силовой установки, способной обеспечить высокую скорость и иметь невысокие массогабаритные показатели.

Несомненно, что на первом месте среди претендентов на выбор корпуса для морского ударного беспилотника отводится судом-глиссерам. Именно глиссеры способны развивать огромные скорости, нести большую массу боевого заряда. Проведённые нами расчёты показали, что могут достаточно успешно обеспечиваться скорости таких судов до 70-90 км/ч (38-50 узлов), что совершенно не достижимо для обычных судов водоизмещающего типа.

Выберем в качестве базового глиссера судно со следующими параметрами

Таблица 1 – Основные характеристики катера

№ п/п	Наименование характеристики	Единица измерения	Величина
1	Длина максимальная	м	13,4
2	Длина между перпендикулярами	м	11
3	Ширина	м	3,45
4	Осадка	м	0,55
5	Водоизмещение	т	8,9
6	Вес	т	5,4
7	Гребные винты	-	ВФШ
8	Диаметр гребного винта	м	0,7
9	Число лопастей	шт.	4
10	Мощность одного главного дизеля	кВт	327-404
11	Номинальная частота вращения	мин ⁻¹	2170
12.1	Частота вращения гребного винта	мин ⁻¹	1446,7-1500
12.2	Частота вращения гребного винта	с ⁻¹	24,1
13.1	Скорость катера по проекту	км/ч	70-90
13.2	Скорость катера по проекту	м/с	19,44–25
18	Частота вращения гребного винта	мин ⁻¹ /с ⁻¹	1500/25

Расчёт необходимой мощности энергетической установки в зависимости от скорости катера

Для взаимосвязи скорости глиссера и мощностью пропульсивной установки воспользуемся формулой [1]

$$N = \frac{g \cdot \Delta \cdot v}{K\eta} \quad (1)$$

где $K\eta$ – суммарное пропульсивное качество глассерного катера [1]. Графики $K\eta$ для реданных и безреданных катеров приведены в работе [1]. Результаты расчёта мощности пропульсивной установки катера приведены в табл. 1.

Расчётная скорость потока в диске гребного винта [4, 6]

$$v_p = 0,514 \cdot (1 - \omega) \cdot v_s, \text{ м/с.} \quad (2)$$

Коэффициент попутного потока ω определяется по формуле для глассирующих катеров [4]

$$\omega = 0,5 v^2, \quad (3)$$

$$\text{где } \vartheta = \frac{\vartheta^0}{57,3} = \frac{15}{57,3} = 0,261, \quad (4)$$

$\vartheta^0 = 15$ – Trim Angle Degree [5]

$$\omega = 0,5 \cdot 0,261^2 = 0,034. \quad (5)$$

Значения расчётной скорости потока в диске гребного винта

$$v_p = (1 - 0,034) \cdot 100/3,6 = 26,8 \text{ м/с.}$$

$$v_p = (1 - 0,034) \cdot 90/3,6 = 24,2 \text{ м/с.}$$

$$v_p = (1 - 0,034) \cdot 80/3,6 = 21,5 \text{ м/с.}$$

$$v_p = (1 - 0,034) \cdot 70/3,6 = 18,8 \text{ м/с.}$$

$$v_p = (1 - 0,034) \cdot 50/3,6 = 13,4 \text{ м/с.}$$

$$v_p = (1 - 0,034) \cdot 30/3,6 = 8,05 \text{ м/с.}$$

$$v_p = (1 - 0,034) \cdot 10/3,6 = 2,7 \text{ м/с.}$$

Для глассера число Фруда $Fr = v_p / \sqrt{g^3 \Delta / \gamma}$. (6)

Таблица 1

Результаты расчёта мощности пропульсивной установки катера

Скорость, V , км/ч	120	100	90	80	70	62	50	30	10
Скорость, V_p , м/с	32,2	26,8	24,2	21,5	18,8	17,2	13,4	8,05	2,7
Число Фруда Fr (формула 6)	7,2	6,0	5,4	4,8	4,2	3,83	3,0	1,8	0,6
Коэффициент пропульсивного качества $K\eta$	1,7	2,0	2,2	2,5	2,7	3,0	4	4,7	6,0
Суммарная мощность пропульсивной установки N (по формуле 1)	1656	11172	959	750	608	500	292	149,5	39,2

Выбор главного двигателя

Для выбора главного двигателя воспользуемся номенклатурой выпускаемых российских дизелей. Необходимо, чтобы дизели подходили по габаритам и имели небольшую массу. Учитывая, что это катер-«камикадзе», то такие показатели как ресурс и долговечность,

удельный расход топлива не играют особой роли. Выбираем дизели БМД-81 производства ОАО «Барнаултрансмаш» со следующими параметрами [2].

Мощность $N_e = 404$ кВт, частота вращения $n = 1500$ мин⁻¹, количество цилиндров – 8, удельный эффективный расход топлива 201 г/ (кВт·ч), габаритны размеры 1450x1300x1310 мм, масса 1800 кг, ресурс до капитального ремонта 10000 ч.

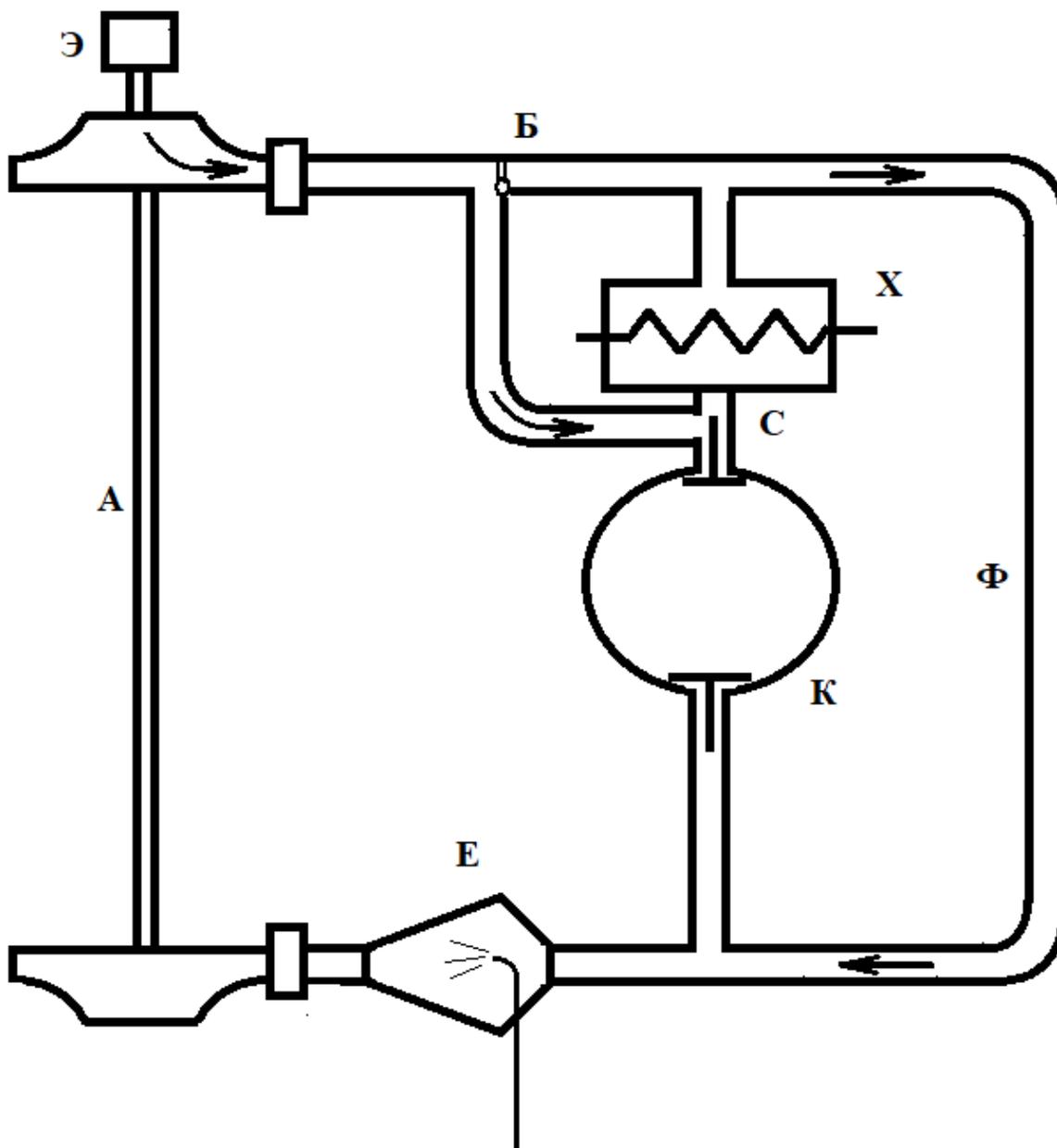
Но эти дизели имеют невысокие показатели эффективности. Для их повышения предлагаем форсировать их по методу Гипербар [8]. Суть этого метода заключается в том, что существенно повышается давление наддува до 0,4 Мпа. Чтобы не допустить роста механической напряженности одновременно снижается степень сжатия до 7,4. Происходящие при этом изменения показателей двигателя от исходного варианта пересчитываются по разработанным соотношениям [7].

Важно, что мощность агрегата увеличивается вдвое до 808 кВт. Неизбежно мы теряем ресурс и увеличивается удельный расход топлива примерно на 10 %. Однако, учитывая, что это дрон-камикадзе эти характеристики не играют особой роли.

Схема воздухообеспечения системы «Гипербар» приведена на рис.2.

Турбонагнетатель (А) подаёт воздух в ответвление коллектора специальной конструкции снабжённое клапаном (Б), который включает байпасный трубопровод (Ф), соединённый непосредственно с выхлопным коллектором. Камера сгорания (Е) с топливной форсункой и запальником включены в выхлопной коллектор перед газовой турбиной турбонагнетателя.

Перед пуском двигателя клапан (Б) открывают и турбонагнетатель раскручивается от электродвигателя. Топливо подаётся и сжигается в камере сгорания. Таким образом газотурбокомпрессор работает как газотурбинный двигатель. После того как будет создано достаточно давление наддувочного воздуха клапан (Б) закрывает байпасный трубопровод (Ф), направляя горячий сжатый воздух через воздушный коллектор (С), и обратный поток через два промежуточных холодильника (Х) во впускной коллектор (К). Рассмотренная система обеспечивает достаточно быстрый и надёжный запуск двигателя. Следует также отметить, что у двигателя, снабжённого такой системой воздухообеспечения при снижении частоты вращения ниже номинальной на 40 %, мощность возрастает почти на 25 % [8].



А – турбокомпрессор, Э – электродвигатель, Б – клапан байпасного трубопровода; Ф – байпасный трубопровод, Е – камера сгорания, С – воздушный коллектор, Х – промежуточный холодильник, К – впускной коллектор.

Рис. 2. Схема воздухообеспечения системы «Гипербар»

Выбор гребного винта

В качестве гребных винтов рекомендуется выбрать винты, работающие в суперкавитирующем режиме. Это гребные винты Арнесона (рис.2) [3, 5]. В принципе можно оставить установленные на катере-прототипе гребные винты Арнесона, следует проверить расчётом их соответствие новой мощности.



Рис.2. Внешний вид гребного винта Арнесона

Заключение

При имеющейся суммарной мощности двух главных двигателей $2 \times 808 \text{ кВт} = 1616 \text{ кВт}$ будет обеспечиваться скорость глиссирования 118 км/ч , при условии чистого корпуса и чистого гребного винта [3]. Такая скорость вполне сопоставима со скоростью самой высокоскоростной торпеды. Габариты новых двигателей вписываются в габариты исходного катера. Таким образом создание высокоскоростных морских ударных дронов вполне достижимо на базе отечественных комплектующих.

Список литературы:

1. Ваганов А. М. Проектирование скоростных судов. Л.: Судостроение, 1978, - 279 с.
2. Конс Г.А., Лашко В.А. Современные подходы к конструированию поршневых двигателей. М.: Моркнига, 2009, 388 с.
3. Соболенко А.Н. Расчёт мощности главной пропульсивной установки глиссирующего катера с гребными винтами Арнесона. Вестник Морского государственного университета им. адм. Г.И. Невельского. 2024. № 94. С. 13-17.
4. Хейфец Л. Л. Гребные винты для катеров. Л.: Судостроение, 1976, - 180 с.
5. Описание ASD12 ARNESON Surface drive. Technical Data ASD12B1LU.
6. Романенко Л.Л., Щербаков Л.С. Моторная лодка. Л.: Судостроение, 1971, -448 с.
7. Соболенко А.Н. К определению параметров рабочего процесса дизелей с повышенным и высоким наддувом. Научные труды ЛКИ, Л.: 1977, вып. 122. 0,25 п.л.
8. Hyperbar turbocharged engines. Gas and Oil poer. V.71. № 784, 1975, p. 16.

Поступила в редакцию 1 июля 2025 г.

Беспилотные транспортные средства на воздухопорных гусеницах для автоматизированной выгрузки грузов на необорудованный берег

Фокин Роман Константинович, e-mail: fokin.99.roman@mail.ru

МГУ им. адм. Г. И. Невельского, Владивосток

Транспортные средства на воздухопорных гусеницах (ТСВГ), обладающие уникальной проходимостью и амфибийными свойствами, могут стать основой для создания автономных беспилотных платформ, предназначенных для доставки грузов в труднодоступные регионы. В статье рассматриваются перспективы модернизации ТСВГ в беспилотные дроны, способные выполнять задачи по выгрузке грузов на необорудованный берег в условиях Арктики, Дальнего Востока и других удаленных территорий.

Ключевые слова: беспилотный транспорт, воздухопорные гусеницы, автономная логистика, Арктика.

Unmanned vehicles on air-supported tracks for automated unloading of cargo on an unequipped shore

Fokin Roman K., email: fokin.99.roman@mail.ru

Maritime State University named after Admiral G.I. Nevelskoy, Vladivostok

Air-supported tracked vehicles (ASTV), which have unique cross-country ability and amphibious properties, can become the basis for the creation of autonomous unmanned platforms designed to deliver goods to hard-to-reach regions. The article discusses the prospects for upgrading ASTVs into unmanned drones capable of performing tasks on unloading goods on an unequipped shore in the Arctic, Far East and other remote areas.

Keywords: unmanned transport, air-supported tracks, autonomous logistics, Arctic.

Введение

Что такое ТСВГ?

Транспортное средство на воздухопорных гусеницах (рис.1) — это гибридная амфибийная платформа, объединяющая преимущества судна и вездехода. Ее ключевой элемент — воздухопорные гусеницы, которые сочетают принцип воздушной подушки с классической гусеничной ходовой частью. Это обеспечивает:

- Снижение давления на грунт (до 12–31 кПа в зависимости от модели), что минимизирует повреждение экосистем тундры, болот и прибрежных зон;
- Высокую проходимость по сложным поверхностям: битому льду, глубокому снегу, болотам, лесосекам с пнями, а также по воде;

- Мореходность до 5 баллов, включая работу в прибойной зоне и на волнении.

Конструктивно ТСВГ включает:

- Грузовую платформу (длиной от 6,3 до 13,3 м), адаптированную для перевозки контейнеров, техники или спецоборудования;

- Энергетическую установку (дизель-электрическую, турбо-электрическую или гидромеханическую), обеспечивающую мощность до 2000 кВт;

- Систему воздухоподдержания с вентиляторами, создающими избыточное давление под гусеницами (12–31 кПа).

Модельный ряд ТСВГ варьируется от компактных версий (ТСВГ-5, грузоподъемность 5 т) до тяжелых платформ (ТСВГ-150, грузоподъемность 150 т), что позволяет решать задачи разного масштаба — от спасательных операций до строительства инфраструктуры.[1]

Освоение арктических и прибрежных зон требует инновационных решений для логистики, особенно в условиях отсутствия инфраструктуры. Традиционные методы доставки грузов на необорудованный берег часто связаны с высокими рисками и затратами [2]. ТСВГ, сочетающие мореходность, вездеходность и грузоподъемность, предлагают альтернативу. Их преобразование в беспилотные системы позволит минимизировать участие человека, повысить безопасность и эффективность операций.

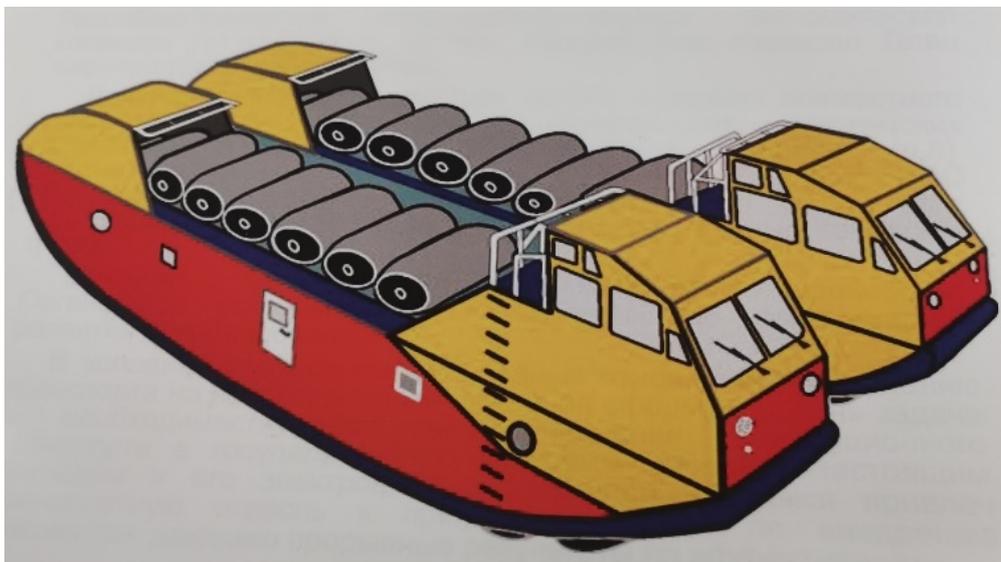


Рисунок 1 – эскизный облик ТСВГ

Технические возможности ТСВГ для автономной работы

1. Проходимость и амфибийность:

Способность преодолевать болота, битый лед, снежные заносы и крутые склоны (до 20°). Мореходность до 5 баллов, что обеспечивает работу в прибрежной зоне даже при сильном волнении. Скорость до 40 км/ч на суше и 20-25 узлов на воде.

2. Грузоподъемность:

Модели ТСВГ-20 и ТСВГ-150 способны перевозить от 20 до 150 тонн груза, что делает их пригодными для крупногабаритных грузов, включая контейнеры и технику.

3. Энергоэффективность:

Дизель-электрические и турбо-электрические схемы (мощность до 2000 кВт) обеспечивают автономность и снижение расхода топлива на 30–50% по сравнению с судами на воздушной подушке аналогичной грузоподъемности.

Концепция беспилотного ТСВГ

Для преобразования ТСВГ в беспилотное транспортное средство требуется адаптация аппаратных и программных компонентов под специфические условия эксплуатации — такие как водная среда, бездорожье, возможное отсутствие инфраструктуры и сложные погодные условия. В первую очередь необходимы сенсоры, способные работать как на суше, так и в воде. Лидар (LiDAR) может быть полезен для создания 3D-карты местности на суше, но на воде его эффективность снижается из-за отражений от поверхности, поэтому здесь важнее радар (Radar), который устойчив к помехам от дождя, волн или брызг, и гидролокатор (сонар) для подводной навигации и обнаружения подводных препятствий или измерения глубины. Камеры с защитой от воды и грязи, включая инфракрасные или тепловизоры, помогут ориентироваться в условиях плохой видимости, например, в тумане или ночью. Ультразвуковые датчики могут дополнительно использоваться для обнаружения близких объектов при маневрировании в ограниченном пространстве.

Вычислительная платформа должна быть устойчива к вибрациям, влаге и экстремальным температурам. Она будет обрабатывать данные с сенсоров, совмещая алгоритмы компьютерного зрения для распознавания природных объектов (камни, деревья, волны) и машинного обучения для прогнозирования изменений среды, например, внезапного появления течений или смещения плавучих препятствий. Поскольку вездеход не полагается на дорожную инфраструктуру, акцент смещается на SLAM (одновременную локализацию и построение карты), адаптированную для работы в условиях отсутствия чётких ориентиров — например, в открытой воде или густом лесу. Навигация потребует комбинации GPS/ГЛОНАСС с коррекцией (например, RTK для точности до сантиметров), инерциальных систем (IMU) для случаев потери сигнала спутников.

Система управления должна быть интегрирована с механизмами вездехода. Резервирование критических систем, например, дублирование контуров управления, важно из-за повышенного риска поломок в экстремальных условиях. Безопасность должна учитывать риски затопления: датчики уровня воды и система аварийного осушения.

Связь может быть ограничена в удалённых районах, поэтому, помимо стандартных модулей 4G/5G, стоит предусмотреть спутниковую связь или радиомодемы дальнего действия.

Программное обеспечение должно быть обучено на данных, специфичных для среды эксплуатации: распознавание типов грунта (ил, песок, камни), анализ волновых паттернов, прогнозирование поведения плавучих объектов. Тестирование нужно проводить в симуляторах, имитирующих комбинированные условия — переход из воды на сушу, шторм, встречу с животными, — а также на реальных полигонах с контролируемыми препятствиями[4].

Кибербезопасность особенно важна, если вездеход управляется дистанционно, чтобы исключить взлом и перехват управления. Пользовательский интерфейс должен позволять оператору переключать режимы (автономный/ручной), отслеживать состояние систем и получать предупреждения о критических ситуациях — например, о приближении к зоне с сильным течением или потере плавучести.

Ключевые сложности включают обеспечение надёжности сенсоров в условиях грязи, воды и механических нагрузок, разработку алгоритмов, устойчивых к быстро меняющейся среде (например, внезапные изменения глубины или появление плавучего мусора), а также минимизацию энергопотребления, если вездеход работает на аккумуляторах [5].

Преимущества беспилотных ТСВГ

- Снижение рисков: Исключение человеческого фактора при работе в экстремальных условиях.

- Круглосуточная эксплуатация: Возможность работы в темное время суток и при низкой видимости.

- Экономия ресурсов: Оптимизация маршрутов и расхода топлива за счет алгоритмов ИИ.

- Масштабируемость: Модельный ряд ТСВГ (от 5 до 150 тонн) позволяет адаптировать платформы под задачи разной сложности.

Заключение

Интеграция технологий автономного управления в ТСВГ открывает новые возможности для логистики в удаленных регионах. Беспилотные платформы на базе воздухоопорных гусениц способны работать в условиях, недоступных для традиционного транспорта, обеспечивая надежность и экономическую эффективность.

Список литературы:

1. Проектирование, постройка и предварительные испытания морской крупномасштабной модели транспортного средства на воздухоопорных гусеницах (ТСВГ). Отчет о НИР/ Дальневост. высш. инж. Морское уч-ще им. Адм. Г. И. Невельского. Руков. темы А. И. Азовцев – М.: ВНИИЦ. – 1987. – 32с.
2. Азовцев А. И., Огай С. А., Москаленко О. В. Прогноз преимуществ транспортных средств на воздухоопорных гусеницах для комплексного освоения замерзающего шельфа и побережья Арктики и Дальнего Востока./ Проблемы транспорта Дальнего Востока. Доклады научно-практической конференции. 2017. Т. 1. С. 354-358.
3. Криволицкий, С. А. Разработка системы удалённого управления беспилотной платформой / С. А. Криволицкий // Решетневские чтения : Материалы XXVIII Международной научно-практической конференции, посвященной 100-летию со Дня рождения генерального конструктора ракетно-космических систем академика Михаила Федоровича Решетнева. В 2-х частях, Красноярск, 18–22 ноября 2024 года. – Красноярск: Сибирский государственный университет науки и технологий им. акад. М. Ф. Решетнева, 2024. – С. 326-327. – EDN KMOWGY.
4. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024662145 Российская Федерация. Система управления беспилотным микро транспортом на основе технологий компьютерного зрения : № 2024619883 : заявл. 04.05.2024 : опубл. 23.05.2024 / Л. А. Голофеев ; заявитель ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ "ЭД-КАР МОТОРС". – EDN NOYFRA.

Поступила в редакцию 25 апреля 2025 г

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА, СУДОВОЖДЕНИЕ, ВОДНЫЕ ПУТИ СООБЩЕНИЯ И ГИДРОГРАФИЯ

УДК 623.83: 620.194

Предотвращение коррозионных повреждений конструкций морских судов

Мотрич Владимир Николаевич, доцент, MotrichVN@msun.ru

МГУ им. адм. Г. И. Невельского, Владивосток

Статья посвящена проблеме коррозии морских судов, ее причинам, механизмам и методам предотвращения. В ней подробно рассматриваются различные виды коррозии, такие как атмосферная, электрохимическая, гальваническая и другие, а также их влияние на конструкции судов. Особое внимание уделяется коррозии в морской воде и ее воздействию на металлы и сплавы. Документ также содержит информацию о методах защиты от коррозии, включая использование защитных покрытий, катодной защиты и других технологий. Рассмотрены примеры аварий судов, вызванных коррозией, и анализируются их причины. Приведены рекомендации по предотвращению коррозионных повреждений.

Ключевые слова: Коррозия, прочность корпуса судна, аварии судов в море, коррозионные повреждения, защита от коррозии.

Prevention of corrosion damage to seagoing vessel's structures

Motrich Vladimir N., MotrichVN@msun.ru

Maritime State University named after Admiral G.I. Nevelskoy, Vladivostok

The article is devoted to the problem of corrosion of seagoing vessels, its causes, mechanisms and methods of prevention. It discusses in detail various types of corrosion, such as atmospheric, electrochemical, galvanic, and others, as well as their effects on ship structures. Special attention is paid to corrosion in seawater and its effects on metals and alloys. The article also contains information on corrosion protection methods, including the use of protective coatings, cathodic protection, and other technologies. Examples of ship accidents caused by corrosion are considered and their causes are analyzed. Recommendations for the prevention of corrosion damage are given.

Keywords: corrosion, hull strength, ship accidents at sea, corrosion damage, corrosion protection.

В природе все должно находиться в равновесии. Любой дисбаланс вызывает ответную реакцию. Если мы нагреваем воду, то рано или поздно по законам термодинамики ее температура вновь сравняется с окружающей средой. Если затрачивается энергия на извлечение металла из руд, по тем же законам эта энергия затем высвобождается, в результате чего полученные металлы снова переходят в окислы, сульфиды, карбонаты и другие свойственные им

природные соединения. Таким образом, цикл, который начался с выплавки металла из руды, завершается (рис. 1). Этот процесс называется коррозией и совершается самопроизвольно.

Термин «коррозия» - понятие очень широкое. Латинское слово «rodere» означает и поражение тканей организма язвенными процессами, и разрушение поверхности металлических изделий и конструкционных материалов, и выветривание горных пород, а также оно дало название целому отряду в зоологии – *rodentia* – «грызуны», «амбарные вредители». Префикс “cor” усиливает ощущение интенсивности процесса.

Коррозия - это химическое разрушение материалов, таких как металлы, полупроводники и даже полимеры, под воздействием окружающей среды. Окружающая среда может представлять собой газовую фазу с влагой или без нее, а также водный или неводный электролит.

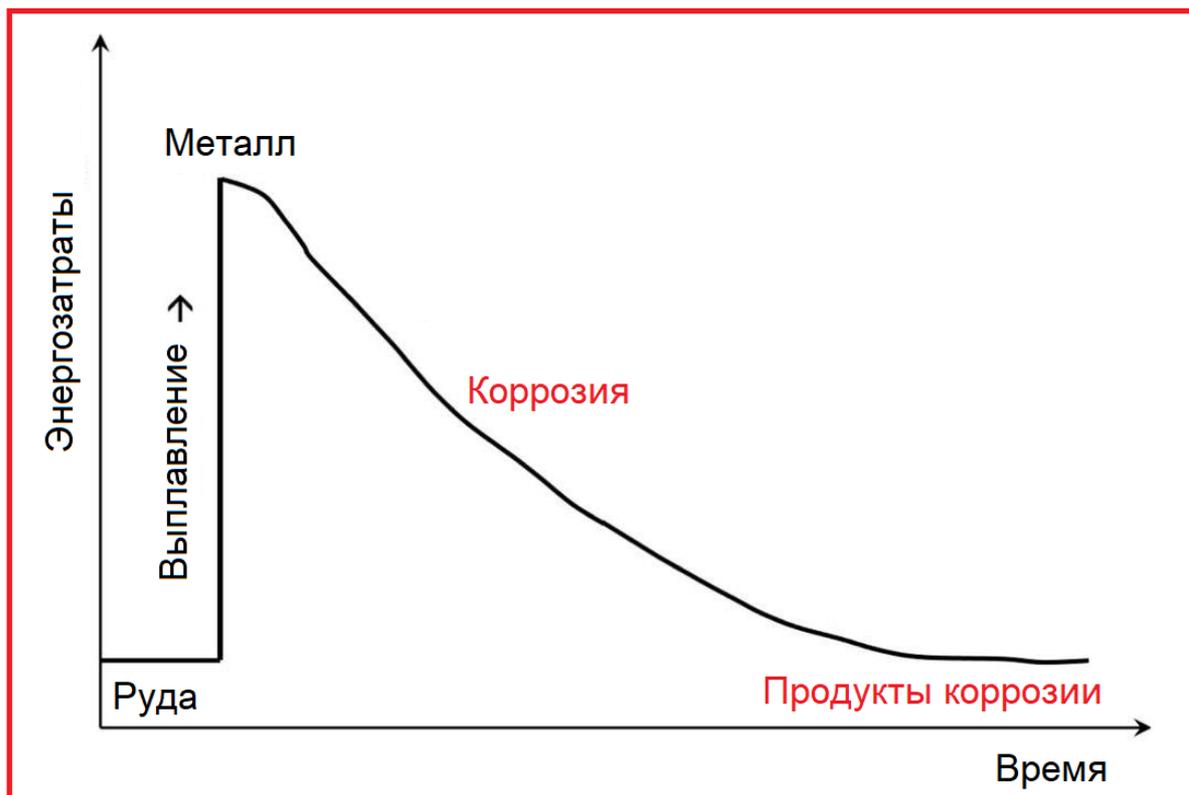


Рисунок 1 - Коррозионный цикл

Обычно корродируют металлы (черные или цветные), встречающиеся в природе не в самородном состоянии, а в виде минералов и руды. Это практически все металлы, используемые в судостроении, за исключением «благородных».

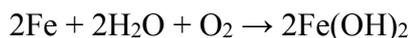
С самого начала железного века, который начался около трех с половиной тысячелетий назад, человечество знало, что железо и сталь подвержены коррозии. В наблюдательности древним отказать нельзя. Хорошо отражает отношение многих поколений к коррозии полная горечи фраза Плиния Старшего, утверждавшего, что ржавчина – проклятие для железа.

Еще Ломоносов высказал мысль, что при прокаливании металлы соединяются с воздухом, образуя окалину. Так появилась первая научная теория окисления металлов – теория химической коррозии. Позднее Лавуазье доказал, что металлы окисляются, реагируя с кислородом.

Используемая в судостроении сталь, представляет собой железо, легированное небольшим количеством углерода и различными другими элементами. Но, коррозионное поведение сталей с низким содержанием легирующих элементов во многом схоже с железом.

Химическая коррозия металлов представляет собой их самопроизвольное разрушение по законам химических реакций, не сопровождающихся возникновением электрического тока (например, коррозия в неэлектролитах, коррозия стали в нефтепродуктах).

Если поместить в две пробирки по железному гвоздю, одну из них заполнить водопроводной водой и оставить открытой, а вторую кипяченой водой, из которой растворенный воздух вышел в виде пузырьков, а затем плотно закрыть, то через некоторое время окажется, что гвоздь в первой пробирке покрылся налетом ржавчины, а во второй – остался в неизменном виде. Это свидетельствует о том, что для образования ржавчины на железе требуется не только вода, но и растворенный в ней воздух. Эта химическая реакция описывается следующей формулой:



Затем происходит сложная серия дальнейших реакций, в результате которых практически бесцветный студенистый гидроксид железа превращается в сложную смесь гидратированных оксидов красновато-коричневого цвета, которые мы называем ржавчиной.

В любом районе моря различают пять зон коррозии: атмосферную, зону брызг, зону приливо-отливных явлений, коррозию в морской воде и донную при погружении в ил.

При соответствующих условиях все металлы в той или иной степени подвержены атмосферной коррозии (рис. 2). Но в отличие от плотных оксидных покрытий, образуемых на поверхности алюминия, ржавчина, покрывающая железо, хрупка и легко отслаивается и практически не защищает металл.

Сухая атмосферная коррозия протекает в очень тонких пленках (до 10 нм) при влажности воздуха 30-50 % и приводит к образованию оксидов металла. Она, как правило, не приводит к серьезным коррозионным разрушениям.



Рисунок 2 - Примеры атмосферной коррозии на надводных участках морского судна

Влажная атмосферная коррозия начинается обычно при относительной влажности воздуха выше 70 %. При этой влажности, называемой критической, происходит капиллярная конденсация влаги и вода начинает проявлять свойства электролита. Капиллярную конденсацию могут стимулировать шероховатость поверхности, различные неровности, загрязнения металла твердыми частицами (пыль) и т.п.

Коррозионная агрессивность атмосферы определяется не только влажностью, но наличием различных химических веществ: твердых и газообразных. В воздухе содержатся раз-

личные газы биогенного, природного и антропогенного происхождения (SO_2 , SO_3 , NO_2 , N_2O_3 , N_2O_5 , H_2S , Cl_2 и др.), а также частицы твердых веществ (хлориды, сульфаты, силикаты, частицы пыли и др.). Все эти вещества, могут растворяться в пленках конденсированной влаги, увеличивая ее коррозионную агрессивность. Наиболее опасными в коррозионном отношении газами являются SO_2 и SO_3 , образующие с парами воды в атмосфере аэрозоли сернистой и серной кислот.

Наиболее агрессивными условиями являются теплые тропические прибрежные районы с преобладающими ветрами, которые переносят хлориды и сульфаты с океана на берег.

Исследуя влияние атмосферного электричества на сокращение мышц препарированных лягушек, биолог Луиджи Гальвани подвешивал их на железную проволоку при помощи медных стержней, введенных в спинной мозг. Он заметил, что когда ветер раскачивал лягушек и их лапки касались железной проволоки, наблюдалось сокращение мышц. Так был создан прообраз гальванического элемента. Он состоял из двух разных металлов – железа и меди, соприкасающихся с раствором – жидкостью, содержащейся в биологической ткани.

Физик Вольта оценил незначительное на первый взгляд явление из далекой от физики области и в 1799 году создал первый химический источник тока, использовавший электрохимические реакции. Он состоял из чередующихся медных и цинковых кружков, попарно соприкасающихся друг с другом и разделенных суконными прокладками, смоченными кислотой.

Особенности, отличающие металлы от других веществ, натолкнули Ломоносова на мысль о взаимосвязи химических и электрических явлений при растворении металлов. Он высказал предположение, что металлы в кислотах растворяются иначе, чем соли в воде. Доподлинно подтвердилось. Наблюдая за растворением цинка в кислотах, швейцарский врач и физик Шарль-Гаспар де ля Рив предложил рассматривать такие разрушения металла как результат действия гальванических элементов. Эта первая теория электрохимической коррозии металлов послужила основой многих научных работ.

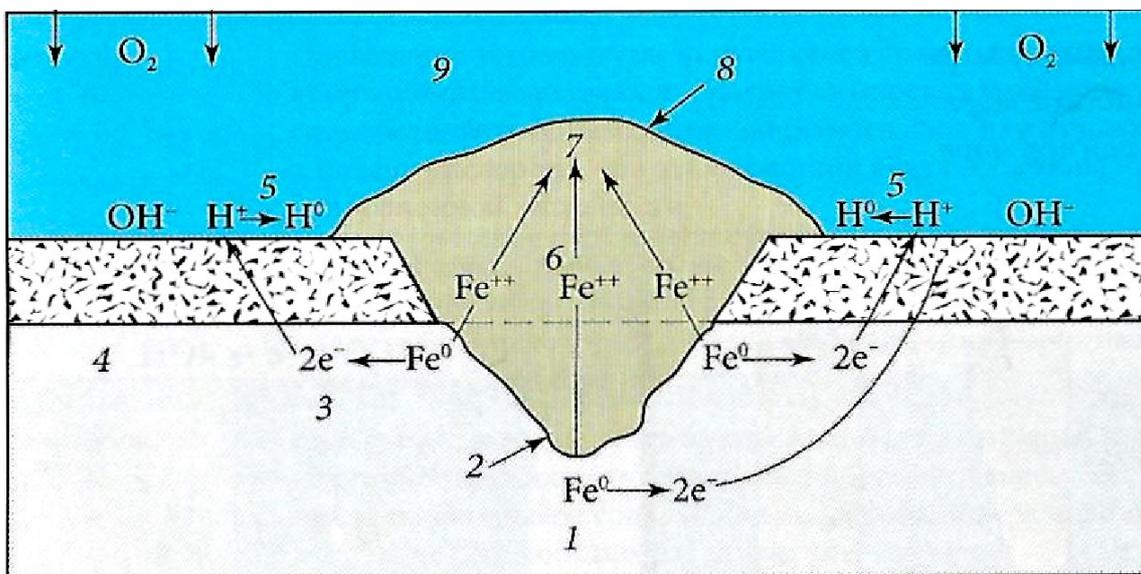


Рисунок 3 - Процесс электрохимической коррозии: 1 – анод (сталь); 2 – язва, образовавшаяся в результате разрушения железа; 3 – электроны; 4 – катод (окалина); 5 – ионы водорода; 6 – ионы железа; 7 – оксиды железа, пропитанные водой, содержащей кислород; 8 – плотный, постепенно увеличивающийся в размерах бугорок ржавчины; 9 – вода, содержащая растворенный кислород

Термины «анод» и «катод», означающие в переводе с древнегреческого «восхождение» и «нисхождение», были придуманы кембриджским священником и эрудитом Уильямом Уэ-

веллом (William Whewell) в 1834 году по просьбе Майкла Фарадея. Он же ввел и другие электрохимические термины, такие как «ион», «диэлектрик» и «электрод».

Жизнь требовала объяснения процессов, происходящих в гальваническом элементе. Была создана химическая теория, которая определяла «механику» и «химию» реакций на границе «металл-раствор». Ее авторы – Риттер, Нернст и Оствальд.

Колоссальным шагом вперед для науки о разрушении металла была теория двойного электрического слоя на границе «металл-раствор», разработанная Гельмгольцем, который предложил переходный слой между металлом и раствором считать похожим на обычный плоский конденсатор. Формулы для расчета были понятны и ни у кого не вызывали сомнений.

Оставалось неясным, почему раствор поваренной соли проводит электрический ток, а спирт нет. В 1887 году Сванте Август Аррениус сформулировал теорию электролитической диссоциации растворов, сыгравшую важную роль во всех исследованиях, связанных с водной средой. Почти 50 лет эта теория была основой различных электрохимических расчетов, пока Петер Дебай и Эрих Гюккель в 1923 году не вывели уравнение поведения ионов в концентрированном растворе.

В простейшем виде коррозионный процесс выглядит так (рис. 3): при соприкосновении с электролитом на поверхности металла возникают коррозионные элементы. По своей природе они сродни элементам Гальвани. Причина их возникновения – в различных внутренних (состав и кристаллическое строение металла, чистота обработки поверхности) и внешних (концентрация и температура электролита, доступ воздуха) факторах. Образуется электрическая цепь, в которой течет ток от участка с большим потенциалом к электролиту, а затем от электролита – к участку с меньшим потенциалом. На анодных участках металл разрушается из-за перехода его ионов в электролит. В это время на катоде накапливаются избыточные электроны.

Для возникновения коррозии необходимо наличие кислорода и водорода, а также контакт металла с электролитом, то есть с электропроводящей средой. Когда металл погружают в электролит, например, в морскую воду, металл переходит в раствор в виде ионов металлов, что приводит к возникновению разности потенциалов между металлом и раствором. Металл становится отрицательно заряженным по отношению к раствору из-за высвобождения электронов. При этом раствор приобретает положительный заряд по отношению к металлу.

Макропары в подводной части корпуса в морской воде могут создаваться между деталями из цветных сплавов, например, гребным винтом и стальным корпусом судна. Причем роль анодов, на которых происходит разрушение поверхности, будут иметь металлы или сплавы с более низкими электродными потенциалами. Металлы, находящиеся в ряду таблицы Менделеева выше, чем железо, имеют более отрицательный потенциал и в паре с ним будут играть роль разрушающегося анода, а в ряду ниже, чем железо, - наоборот, будут стимулировать коррозию железа. Это же правило относится к любому другому металлу.

В примере железа (или стали), подверженного коррозии в морской воде, на поверхности металла в любой момент времени имеется бесчисленное количество анодных и катодных участков. Эти участки разделены субмикроскопическими расстояниями.

Соотношение между массой потерянного металла и током, протекающим в таком элементе, определяется уравнением Фарадея:

$$M = kIt ,$$

где M - масса металла, потерянного на аноде,

I - сила тока (амперы),

t - время (секунды),

k - постоянная величина, «электрохимический эквивалент», значение которой зависит от металла, участвующего в реакции.

Для возникновения коррозии всегда нужны анод и катод, но необязательно, чтобы это были разные металлы. Ни один сплав металла не является абсолютно однородным по своей структуре. Различия в свойствах поверхности, возникающие в процессе производства, нагрузки, термическая обработка, загрязнения и множество других факторов могут привести к появлению неодинаковых участков поверхности. Такие участки функционируют как локальные аноды и локальные катоды, когда металлическая поверхность находится в контакте с электролитом.

Интенсивность, с которой происходит коррозия, зависит не только от типа используемого металла, но и от природы электролита. Электролитом обычно является морская вода. Эффективность морской воды в качестве электролита зависит от ее температуры, солёности, того, находится ли она в стоячем состоянии или быстро перемещается, а также от количества и характера любых загрязнений в воде.

Вода - это растворитель. Когда ионное вещество, такое как хлорид натрия (соль), погружается в воду, оно подвергается диссоциации, распадаясь на положительные и отрицательные ионы, которые затем окружаются молекулами воды. Этот раствор называется электролитом. Электролиты представляют собой электрические проводники, в которых ток переносится ионами, а не свободными электронами, как в металле.

Морская вода представляет собой сложную смесь химических, физических и биологических компонентов, на характеристики которых могут влиять многие факторы, такие как география, температура, глубина и океанские течения. Это сложная смесь, содержащая множество различных солей, растворенных газов, микроэлементов, взвешенных веществ, разложившихся органических веществ и живых организмов.

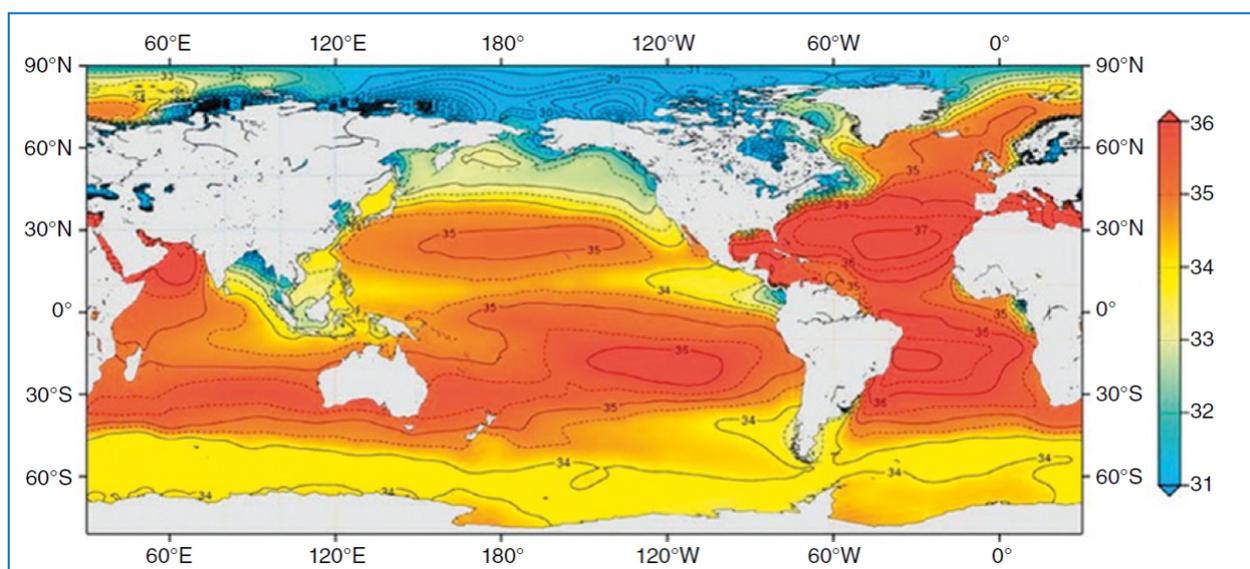


Рисунок 4 - Среднегодовая солёность Мирового океана, 1955-2012 гг. [1]

Солёность принято выражать в тысячных долях (промилле), обозначаемой символом ‰. Солёность морской воды неодинакова по всему миру, как показано на рисунке 4. В Северной и Южной Атлантике есть зоны относительно высокой солёности по сравнению с Ти-

хим океаном, которая разбавляется дождями в сезон муссонов. В тропиках она выше, особенно в закрытых бассейнах, где концентрация воды за счет испарения благоприятна. И наоборот, арктические и антарктические регионы имеют более низкие значения солености. Соленость может быть значительно ниже в районах, где морская вода разбавляется пресноводными стоками из впадающих рек или вблизи тающих ледников. В подавляющем большинстве в морских бассейнах на значительном удалении от суши соленость находится в диапазоне 32-36 ‰. Она колеблется от минимума примерно в 8 ‰ в Балтийском море до примерно 47 ‰ в Персидском заливе. В Мертвом море, не имеющем выхода в океан, она на порядок выше, чем в обычной морской воде.

Присутствие соли в воде делает две важные вещи: она увеличивает электропроводность воды, а ионы хлорида разрушают защитные пленки, образованные металлом.

Скорость коррозии достигает максимума при концентрации соли (NaCl) около 3,5 ‰, что примерно соответствует средней концентрации соли в морской воде [1].

Растворенный кислород принимает активное участие в катодных реакциях и значительно ускоряет коррозию металлов.

Фотосинтез увеличивает содержание O_2 , а разложение органических веществ снижает его. Эти процессы обуславливают изменения концентрации O_2 , например, в зависимости от глубины.

Прибрежная морская вода часто богаче питательными веществами, чем в пелагических зонах. Обычно это происходит из-за сельскохозяйственных или городских стоков.

В сильно загрязненных эстуариях или портовых водах концентрация сероводорода (H_2S) может достигать 50 частей на миллион или даже выше. Донные отложения, содержащие большое количество разлагающихся органических веществ, также могут содержать очень большое количество сульфидов. Сульфиды ускоряют коррозию и особенно образование язв в медных сплавах, используемых для изготовления труб теплообменников и трубопроводов.

Температура морской воды может варьировать в широких пределах. На поверхности она колеблется от примерно $35^\circ C$ на экваторе до примерно минус $2^\circ C$ на полюсах. Температура морской воды также подвержена сезонным колебаниям, вызванным климатом и океанскими течениями. Она может изменяться даже в одном и том же месте и, как правило, уменьшается с глубиной. Более высокие температуры снижают растворимость O_2 , но увеличивают скорость диффузии. Конечным результатом может быть повышение скорости коррозии, даже если содержание O_2 ниже.

Скорость движения морской воды также влияет на скорость коррозии. Удвоение скорости потока воды также увеличивает скорость коррозии в два раза. Однако обрастание морскими организмами может свести на нет этот эффект [1].



Рисунок 5: а - коррозия в районе пояса переменных ватерлиний и б - в балластном танке

Коррозия металлов, подверженных воздействию морской воды или даже соленого воздуха, практически неизбежна. Наиболее чувствительной областью для коррозионного воздействия является приливо-отливная зона, пояса переменных ватерлиний, балластные емкости, зона забрызгивания и заливания, где скорость коррозии может в два-три раза превышать скорость атмосферной коррозии из-за постоянной подачи обогащенной кислородом соленой воды (рис. 5). Испытания показали, что при циклическом погружении и воздействии воздуха образуется больше точечных повреждений, чем при непрерывном погружении. Недоступность отдельных участков конструкций, как надводных, так и внутри корпуса способствует интенсивному развитию коррозии.

Поскольку сталь неизбежно подвергается коррозии, то важно знать, как быстро при этом разрушается металл. Скорость коррозии обычно выражается в единицах, относящихся к толщине металла, например, в мм/год.

Предсказать конкретную скорость коррозии чрезвычайно сложно. Средняя скорость коррозии в засушливых районах может составлять всего 0,0046 мм/год, в то время как в промышленных районах она может быть почти в 10 раз выше и составлять около 0,043 мм/год. В морской среде коррозия может быть еще выше и составлять до 0,30 мм в год [1].

По закону Фарадея скорость потери массы с поверхности и, следовательно, величина тока прямо пропорциональны площади поверхности металла. Это означает, что скорость коррозии железа (или стали) в 0,1 мм/год эквивалентна силе тока 0,087 А/м² поверхности.

Концепция коррозионного элемента учитывает только неорганическую химию и электрохимию. При этом не учитывается тот факт, что природная морская вода является средой с различным содержанием организмов. Его правильнее было бы рассматривать не как раствор солей, а как биологический суп из разнообразных и в значительной степени неизвестных ингредиентов.

Микроорганизмы (бактерии), содержащиеся в морской воде, образуют на металлических поверхностях биопленки. Активность микроорганизмов в значительной мере зависит от температуры воды.

Таким образом, хотя фундаментальные научные данные дают нам обоснованное объяснение того, почему сталь подвергается коррозии, и могут даже указать приблизительную величину скорости коррозии, они не дают полной картины процесса коррозии.

Для определения скорости коррозии в лабораторных условиях образцы стали взвешивают, после чего помещают в настоящую или искусственную морскую воду на определенный период времени. После заданной экспозиции образец вынимают, очищают и повторно взвешивают. Поскольку площадь поверхности образца и время воздействия известны, можно определить скорость коррозии в пересчете на массу, приходящуюся на единицу площади стали. Традиционно такая информация выражается в мг/дм²/сутки. При известной плотности стали ($7,9 \times 10^3$ кг/м³), можно преобразовать измеренную скорость потери массы в среднюю скорость коррозии, которую удобнее выражать в единицах мм/год (или мкм/год).

Однако в лабораторных опытах невозможно создать условия погружения в морскую воду, особенно в отношении микробиологической активности. Из этого следует, что наиболее надежным способом оценки степени коррозии стали в морской воде является либо проведение длительных испытаний в море, либо оценка фактической коррозии, которой подвергаются незащищенные стальные конструкции.

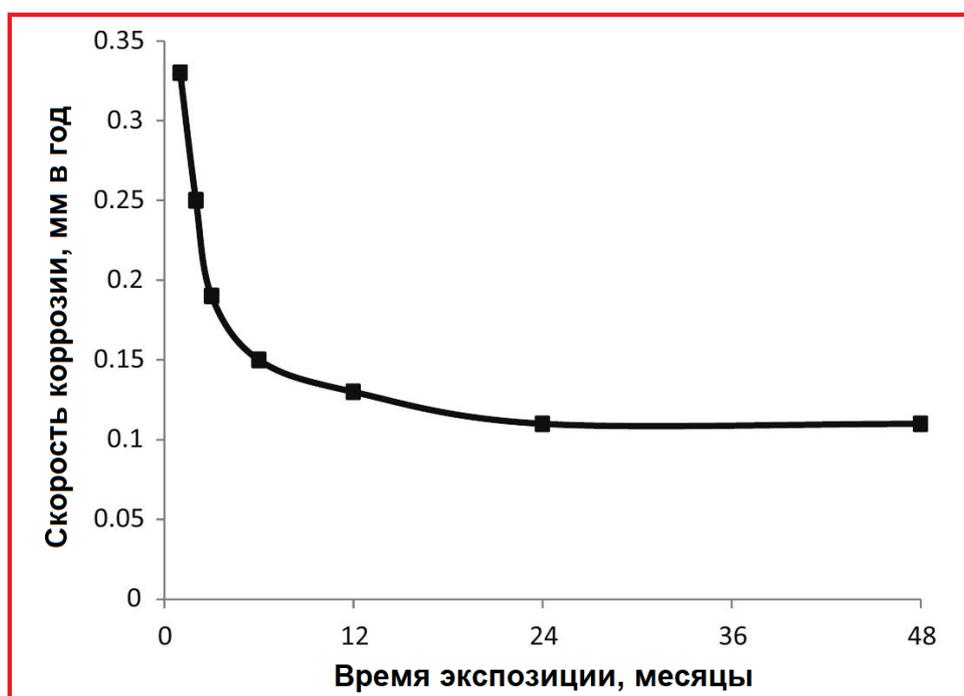


Рисунок 6 - Средняя скорость коррозии стали по данным Британского Адмиралтейства

С 40-х годов XX века проводились различные испытания с погружением металла в морскую воду. Как правило, в них участвовали предварительно взвешенные образцы панелей, подвешенные к плотам или причалам на относительно небольшой глубине в прибрежных районах. Подобные испытания, проведенные Британским Адмиралтейством, выявили довольно высокие начальные показатели, которые затем снижаются до постоянного значения (примерно 0,11 мм/год) (рис. 6) [1].

В 1969 году компания Southwell опубликовала результаты длительных (16 лет) погружных испытаний, проведенных Военно-морскими силами США в Тихом океане у берегов Панамы. Сообщалось, что начальная скорость коррозии, определенная в первый год, составляла 0,19 мм/год, но в течение 8-16 лет она снизилась до 0,02 мм/год [1].

Эксперименты также показали, что с увеличением скорости движения морской воды по поверхности стали увеличивается и скорость коррозии. Это отражает тот факт, что скорость диффузии растворенного кислорода из основного раствора на поверхность стали увеличивается с увеличением скорости движения жидкости. Кроме того, при любой температуре жидкости и гидродинамических условиях течения скорость диффузии кислорода к поверхности и, следовательно, скорость коррозии прямо пропорциональны концентрации растворенного кислорода в морской воде [1].

Большинство натурных испытаний по измерению скорости коррозии проводилось в прибрежных водах, расположенных вблизи поверхности. Неудивительно, что было проведено сравнительно мало работ по изучению зависимости скорости коррозии углеродистой стали от глубины залегания. Такие испытания неизбежно сопряжены с большими затратами и не приносят очевидной практической пользы [1].



Рисунок 7 - Останки «Титаника» на дне океана

Места кораблекрушений дают возможность изучить коррозию, которая прогрессировала в течение многих десятилетий или даже дольше. Самым известным из всех затонувших судов является «Титаник», который с 15 апреля 1912 года лежит на дне Северной Атлантики на глубине 3784 метра (рис. 7). Значительная часть обшивки его корпуса толщиной около 19 мм еще не разрушена, несмотря на то, что более столетия она подвергалась воздействию морской воды с обеих сторон. Это говорит о том, что на сегодняшний день средняя скорость коррозии, должно быть, значительно меньше 0,1 мм/год, хотя мы не можем оценить вклад лакокрасочного покрытия в сдерживание коррозии, особенно в первые десятилетия [1].

На корпусе судна имеются богатые железом наросты, кишасщие бактериями «рустикулами» в виде скоплений, похожих на сосульки или сталактиты, содержащие до 36 % железа. Хотя точно не установлено, ускоряет ли новый вид бактерий *Halomonas titanicae* коррозию или она просто процветает, потому что естественная коррозия обогащает содержание железа в морской воде вблизи ее поверхности, многие ученые считают, что «Титаник» вскоре полностью исчезнет как объект исторического наследия [1].

Виды коррозионных повреждений весьма разнообразны. Во многих случаях процесс коррозионного разрушения затрагивает всю поверхность металла, и наблюдается равномерная или сплошная коррозия. Особым видом коррозионного разрушения является гальваническая коррозия между двумя разнородными металлами (рис. 8, а). Для возникновения гальванической коррозии оба металла должны находиться в электрическом контакте друг с другом и быть погружены в один и тот же сплошной слой электропроводящей жидкости (в данном случае в морскую воду).



Рисунок 8: а - гальваническая коррозия на поверхности меди в контакте со стальными трубами и б - щелевая коррозия

При определенных условиях коррозионные разрушения металла могут носить локальный характер. Таким типом повреждения является щелевая коррозия, которая возникает на поверхности трещины или непосредственно рядом с ней (рис. 8, б). Трещины, швы, дефекты или разломы на поверхности металла могут быть признаны местами возникновения щелевой коррозии. Небольшой объем стоячей (с дефицитом кислорода) морской воды задерживается в расщелине, и она становится анодной. Относительно небольшая площадь трещины, являющейся анодной по отношению к большой площади окружающего катода, приводит к неблагоприятному соотношению катода и анода.



Рисунок 9 - Точечная коррозия

Точечная коррозия (pitting) - это интенсивная форма локализованной коррозии (рис. 9). Она возникает, когда неровности поверхности или царапины приводят к тому, что небольшой участок становится более анодным, чем окружающие поверхности. Интенсивность точечной коррозии в значительной степени обусловлена относительно небольшой площадью анода (ямки) и большой площадью катода (прилегающая территория). Ямки могут образовываться и распространяться очень быстро. Это очень опасная форма коррозии, поскольку она не всегда очевидна. Ямки могут образовываться под отложениями, при дефектах или трещинах в лакокрасочных покрытиях, а также вокруг кусочков сварочных брызг. Даже если поперечное

сечение металла не перфорировано, углубления представляют собой места концентрации напряжений, которые могут привести к катастрофическому разрушению под воздействием напряжения.

Углеродистые и низколегированные стали также подвержены коррозии, возникающей в результате блуждающих токов или утечек, непреднамеренно вызванных неисправностью электрических систем. Как правило, ток от оголенного провода или незащищенного соединения, погруженного в трюмную воду, стремится найти путь с наименьшим сопротивлением к источнику заземления. Коррозия, вызванная блуждающими токами, практически не зависит от таких факторов, как концентрация кислорода, кислотность или щелочность.

Разрушение сварного шва является особенно опасной формой коррозии, поскольку сталь, подверженная межкристаллитной коррозии, может выглядеть прочной, но на самом деле может быть серьезно повреждена. При сварке растворенный углерод в зоне сварки перемещается к границам зерен и образует карбиды хрома. Из-за этого в прилегающей к сварному шву области остается мало хрома, что значительно снижает устойчивость к коррозии на границах зерен. Именно эта область подвержена коррозионному воздействию или разрушению.

Коррозия, вызванная микробиологическими факторами (MIC - microbiologically induced corrosion) возникает, когда микроорганизмы образуют локальные колонии на поверхности металла. Существует две основные группы бактерий: анаэробные, которые размножаются в отсутствие кислорода и являются наиболее распространенным типом, и аэробные, которым для жизнедеятельности необходим кислород. И то, и другое вызывает коррозию, но разного рода. Образование и накопление атомарного водорода на катоде всегда будет ограничивать скорость протекания коррозии.

Анаэробные бактерии, такие как бактерии, восстанавливающие серу (SRB - sulfur-reducing bacteria), потребляют водород. Это деполяризует катод, ускоряя коррозию. Аэробным аналогом SRB являются бактерии, окисляющие серу, которые могут создавать среду, насыщенную серной кислотой. Кислота вызывает коррозию, обычно точечную, под этими колониями. (рис. 10) [1].

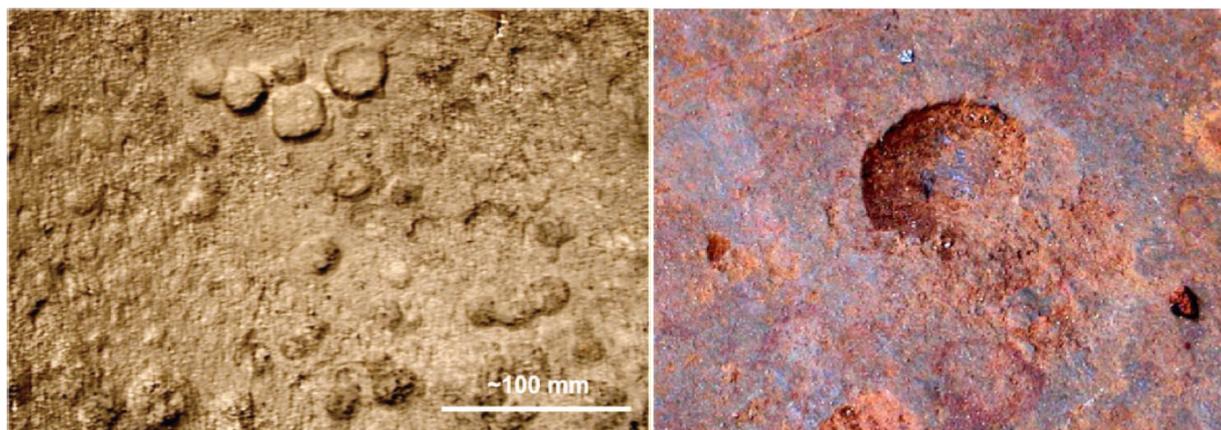


Рисунок 10 - Колонии бактерий в районе точечной коррозии в балластном танке

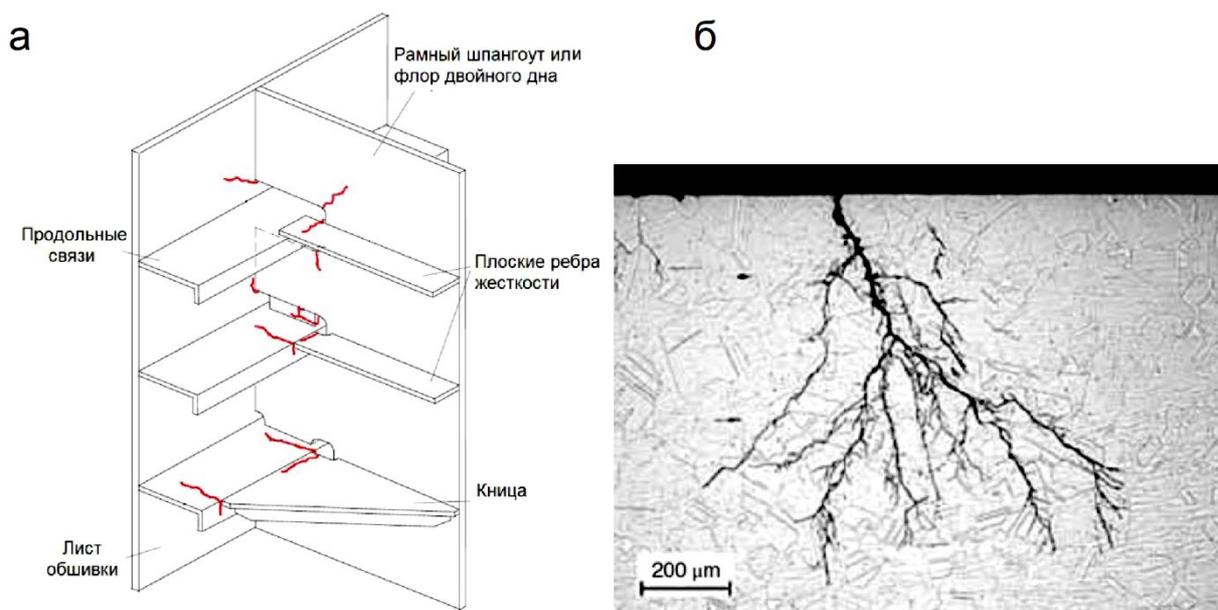


Рисунок 11 – Усталостные трещины: а - характерные места образования усталостных трещин; б - усталостные трещины под микроскопом

Помимо электрохимических механизмов коррозии, необходимо также учитывать механические коррозионные процессы, такие как коррозионная усталость.

Воздействие переменного напряжения на металл, если уровень напряжения достаточно высок, приведет к разрушению металла в результате процесса, известного как циклическое напряжение. Любой сплав, подверженный коррозии в морской воде, также подвержен коррозионной усталости в этой среде (рис. 11).

Фреттингговая коррозия возникает на несущих поверхностях между сопрягаемыми деталями, когда они подвергаются вибрации или движению, состоящему из колебаний с очень малой амплитудой. Постоянное истирание металлических поверхностей приводит к отслаиванию от них мельчайших частиц. Эти частицы вызывают коррозию и могут вызвать заедание или истирание. Это частая проблема в насосах, клапанах, креплениях и подшипниках, где сопрягаемые поверхности трутся друг о друга без смазки.

Проблема защиты металлов от коррозии исключительно актуальна для всех отраслей народного хозяйства, что связано с огромным ущербом, наносимым коррозией, составляющим в промышленно развитых странах 4-5 % национального дохода. Последствия коррозии весьма многообразны. Прежде всего, это безвозвратные прямые потери металла (примерно 10-20 % производимого металла теряется в результате коррозии). При этом неизбежно снижается прочность связей корпуса судна. В случае интенсивности изнашивания, скажем, 3 мм за 20 лет, лист наружной обшивки при строительной толщине 20 мм потеряет 15 % прочности, а лист толщиной 10 мм—уже 30 % [1].

Косвенные потери связаны с увеличением массы металлоконструкций за счет надбавок на коррозию, ростом трудоемкости изготовления конструкций, снижением их эксплуатационных характеристик, большим объемом ремонтных работ и др.

Проблема коррозии и защиты внутренних поверхностей танков крупнотоннажных нефтеналивных судов возникла в послевоенный период, когда танкеры стали подвергаться масловым коррозионным разрушениям в связи с ростом перевозок сырой нефти с высоким содержанием серы. Характер и степень коррозии металлической поверхности танков обусловлена многими факторами: природой перевозимых грузов, частотой их смены, длительностью

нахождения в танках груза и балласта, режимами мойки танков, климатическими условиями, а скорость язвенной коррозии достигала 3,2 мм в год. [1].

Одной из самых тяжелых аварий в мировом нефтеналивном флоте стала гибель танкера «Эрика» в связи с коррозионным разрушением корпуса. Он был вторым в серии из восьми судов, построенных японской верфью Kasado Dock Co. Ltd в Кудамачу между 1974 и 1976 годами. Судно дедвейтом 37 283 тонны имело однокорпусную конструкцию с 13 грузовыми танками, без отдельных балластных отсеков и с двумя отстойными цистернами (слоп-танками) [3].

Требования Международной конвенции МАРПОЛ-73/78 вступили в силу в 1983 году, и танкер по дате постройки относился к классу «pre-MARPOL». Однако в 1990 году, для удобства эксплуатации, но в первую очередь из-за того, что судно не было оснащено системой мойки сырой нефтью (COW), четыре его бортовые балластные танки № 2 и № 4 правого и левого борта в 1993 году были переоборудованы в танки изолированного балласта [3].

Это переоборудование существенно сказалось на судьбе танкера, так как чередование морской воды и соленой атмосферы способствует развитию коррозии, особенно в труднодоступных местах. Кроме того, нагрев грузовых танков приводит к образованию конденсата в соседних балластных танках, что также способствует коррозии. В наибольшей степени от этого страдают продольные части палубы и обшивка, которые способствуют прочности балки судна. К этому следует добавить тепловые нагрузки, обусловленные различиями в температуре различных переборок. Одной катодной защиты, как правило, недостаточно для предотвращения коррозии, особенно если балластный танк заполнен лишь частично [3].

«Эрика», как и многие танкеры-продуктово-возы его возраста, использовалась для перевозки темных продуктов (тяжелого топлива, гудрона), которые являются наиболее загрязняющими, но наименее требовательными с точки зрения качества и чистоты грузовых танков. Светлые продукты (дизельное топливо, бензин, керосин, нефть), из-за своей легковоспламеняемости более опасны в пожарном отношении, но при этом меньше загрязняют окружающую среду, потому, что они очень летучие. Кроме того, к таким продуктам предъявляются высокие требования в отношении чистоты грузовых танков. Как правило, они перевозятся на танкерах с более современными покрытиями грузовых танков.

Большинство рейсов танкер выполнял между портами Европы в различных условиях погоды. За все это время «Эрика» прошла большое количество проверок. При этом почти в каждом акте инспекции в рамках Парижского меморандума отмечались серьезные технические недостатки; несколько раз судно задерживалось из-за неисправности спасательных и противопожарных средств, состояния машинного отделения и электрооборудования. Однако при инспекциях государственного контроля никогда не проводилась тщательная проверка внутренней конструкции судна. Причина этого заключается в том, что такие проверки обычно проводятся, когда судно находится в порту и выполняет грузовые операции, что очень затрудняет доступ инспекторов даже в специальные балластные цистерны [3].

Крупные проблемы возникли во время специального освидетельствования судна, которое было проведено итальянским классификационным обществом RINA в феврале 1998 года в турецком порту Алиага в соответствии с Резолюцией А.744(18) «Руководство по расширенной программе проверок во время освидетельствований навалочных судов и нефтяных танкеров». При этом было отмечено множество недостатков, включая обширную коррозию обшивки главной палубы (с изъязвлениями и пятнами ржавчины), крайне плохое состояние бортовых балластных цистерн № 2 левого и правого борта с коррозионным износом от 18 % до 68 %, сквозные проржавления между шпангоутами 80 и 82 и очень сильная коррозия сварных швов листов во многих местах, значительный износ форпика из-за коррозии и тре-

щин на таранной переборке, стрингеров, вертикальных ребер жесткости и продольных связей днища [3].

Основными причинами такого износа были почти полное исчезновение покрытия в том, что всего несколько лет назад было грузовыми танками, балластование морской водой и образование конденсата из-за присутствия нагретых продуктов в соседних танках.

Судну требовался капитальный ремонт.

В целом, при выборе ремонтной площадки учитываются многие факторы, включая географическое положение, имеемое оборудование и репутацию верфи. В случае с «Эрикой» этот выбор был основан лишь на экономических соображениях, и судно проследовало в балласте на одну из заштатных верфей Восточной Европы.

Несмотря на то, что на ремонт израсходовано 100 тонн металла, от него было больше вреда, чем пользы.

Ввиду отсутствия нужного металла, вместо многих листов обшивки с первоначальной толщиной 16 мм пошли в ход листы толщиной всего 14 мм, и даже 12 мм [3].

По технологическим причинам в скуловых частях балластных танков без предварительного разрешения RINA были сделаны большие вырезы, чтобы танки было легче чистить. Новые продольные части палубы были приварены встык к старым продольным связям, что в целом не улучшило конструктивную прочность [3].

Неразрушающий контроль сварных швов не продвинулся дальше проверки керосином и водонепроницаемости поливом из шлангов. Даже в таких ответственных местах, как скулы, сварные швы не подвергались рентгеновскому или ультразвуковому контролю.

Но, тем не менее, класс судна был возобновлен и выданы все документы [3].

В свой последний рейс танкер «Эрика» отправился из Дюнкерка с грузом 30882 тонн мазута 8 декабря 1999 года в 19:45 (UTC+1) и направилось в Ливорно. Лоцман ничего необычного в поведении судна не заметил.

Погрузка производилась в полном соответствии с инструкцией по загрузке. Груз был распределен между всеми грузовыми танками, которые были заполнены на 95-98 % от их вместимости. Осадка на отход 10,55 метра на ровном киле, изгибающие моменты относительно мидель-шпангоута находились в допустимых пределах и составляли 75 % от максимального значения [3].

Пройдя пролив Ла-Манш, судно встретило тяжелые условия погоды: ветер юго-западный силой 8 - 9 баллов, высота волн достигала 6 метров и более. Период волнения составлял 8-10 секунд при длине 100 - 155 метров, период зыби – 10 - 12 секунд при длине 125 - 225 метров [3].

Судно сильно качало, волны постоянно заливали палубу, а в полдень 11 декабря неожиданно возник постоянный крен 12 - 15° на правый борт. Старший помощник капитана произвел обход и обнаружил в обшивке палубы в носовой части балластного танка № 2 по правому борту три трещины длиной до 3,5 метров и гофры. Капитан немедленно послал в эфир сигнал бедствия [3].



Рисунок 12 - Гибель танкера «Эрика»

На следующее утро танкер начал разваливаться на части и затонул на глубине 120 метров после неудачной попытки буксировки (рис. 12). Весь экипаж был снят вертолетом. Большая часть груза и бункера судна оказалась в море, что привело к загрязнению нескольких сотен километров береговой линии от Бретани до Иль-де-Ре [3].

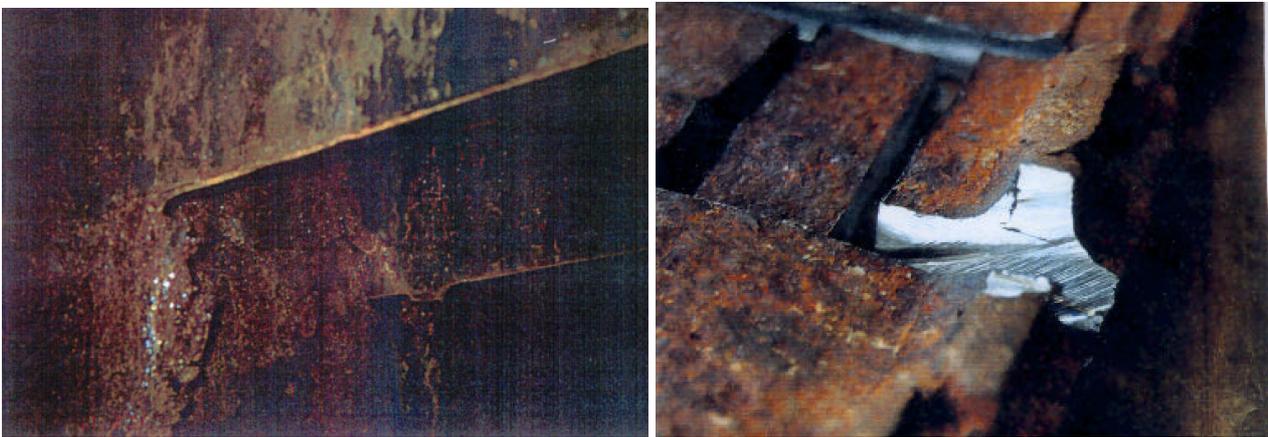


Рисунок 13 - Коррозия бортовой обшивки и трещина на палубе

В конце декабря того же года останки танкера «Эрика» были обследованы подводным автономным аппаратом. В ходе этих подводных исследований были подняты обломки и фрагменты конструкции судна, которые были отправлены в Центральную лабораторию Нанте. Образцы, взятые с обшивки палубы кормовой части, показали уменьшение толщины металла от 16 до 63 % (максимальное значение в коррозионной зоне) и в основном превысило 20 %; среднее значение составило около 25 %. Образцы, снятые с днищевой обшивки, показали уменьшение толщины на 15-25 %, местами достигая 30 % (рис.13) [3].

Таким образом, решающей причиной гибели танкера «Эрика» стало недостаточное техническое обслуживание и быстрое развитие коррозии, которая и привела к разрушению конструкции

Следует отметить, в процессе эксплуатации все восемь судов серии, построенной японской верфью «Касадо» в период с 1974 по 1976 год, испытывали конструктивные проблемы.

Небольшое водоизмещение порожнем этих судов не более 7000 тонн, или примерно на 1000 тонн меньше, чем у других танкеров этой категории явилось следствием того, их конструкция была оптимизирована с помощью компьютерных расчетов. Однако при их постройке не были применены меры для защиты от коррозии и не использовались высокопрочные стали [3].

Одно из судов этой серии затонуло, остальные были списаны, не отслужив положенный срок из-за сильной коррозии и дефектов корпуса, трещин и деформаций, несмотря на частые ремонты [3].

Примерно в том же месте и при аналогичных обстоятельствах произошла катастрофа танкера «Престиж», который также разломился на две части.

Это был также однокорпусный танкер дедвейтом 81564 т, построенный в 1976 году на судовой верфи Hitachi Zosen-Sakurajima Shipyard, Osaka, Japan. «Престиж» был одним из четырех судов серии, построенных на той же судовой верфи, но три его собрата к тому времени уже закончили свою службу.

Три бортовых танка правого и левого борта были определены как танки чистого балласта при работе в режиме СВТ (Clean Ballast Tank) в соответствии с Правилем 13G Приложения 1 к МАРПОЛ. Эти танки не могли использоваться для перевозки нефтяных грузов [4].

До своего последнего рейса танкер «Престиж» находился на рейде Санкт-Петербурга, выполняя с 22 июня 2002 года по 30 октября 2002 года функции хранилища и перевалочного пункта, загружая и выгружая мазут. При этом груз мазута загружался с барж и перегружался на танкеры дедвейтом 30-50 тыс.т. [4].

Затем танкер «Престиж» получил распоряжение принять груз для пункта назначения, который должен быть объявлен после прохождения Гибралтара. Часть груза мазута была загружена во все грузовые танки, которые были заполнены не полностью. Затем в Вентспилсе была принята еще партия груза мазута [4].

Погрузка была завершена 5 ноября в 03.20 (UTC+2), и в 14.30 того же дня танкер отправился в рейс. На отход из Вентспилса, судно имело на борту 76972 тонны груза мазута. Осадка составляла 13,54 м носом и 13,86 м кормой. Максимальные перерезывающая сила и продольный изгибающий момент на корпусе судна составляли 62 % и 56 % соответственно от максимально допустимых значений [4].

Танкер «Престиж» был надлежащим образом загружен в соответствии с утвержденным руководством по погрузке и всем применимым требованиям Международных конвенций.

Плавание в Северном море и проливе Ла-Манш прошло без происшествий: 10 ноября судно прошло Дуврский пролив и во второй половине дня 11 ноября вошло систему разделения движения Уэссан. К полудню 12 ноября судно находилось в центральной части Бискайского залива. Западный ветер достиг силы 9 баллов. Капитан часто поднимался на мостик и, по мере ухудшения погоды, сбавил обороты двигателя до 60 об/мин [4].

Около 15.00 второй помощник нес вахту, вахтенный матрос стоял на руле. На мостике также находились капитан и старший механик. По их словам, в 15:10 на судно обрушилась большая волна, и раздался громкий звук, похожий на взрыв. Судно содрогнулось, легло на правый борт, в нескольких танках выбило крышки горловин. Из открывшихся люков танка № 3 правого борта, который был пуст, полетел фонтан брызг. Судно резко начало крениться на правый борт, за две минуты угол крена достиг 10° и к 15.20 вырос до 20°. Главный двигатель и котел остановились, и судно продолжало крениться.

Когда «Престиж» резко накренился на правый борт, капитан, осознав, что складывается критическая ситуация, приказал объявить общесудовую тревогу и подать сигнал бедствия, который был принят радиостанцией Ла Корунья и службой Finisterre Traffic.

Капитан «Престижа» обратился с просьбой отвести «Престиж» в безопасное место, где можно выгрузить груз и спасти судно. В этом ему было отказано [4].

Без тщательной оценки состояния судна испанскими властями было принято решение отбуксировать танкер подальше от испанского побережья, вместо того чтобы отвести судно в укрытие, когда в грузовых танках была пробоина ограниченного размера.

В течение нескольких дней танкер буксировали то на северо-запад, то на юг, пока 19 ноября в 08:00 было замечено, что «Престиж» прогибается и разламывается. Буксиры получили приказ прекратить буксировку и перерезать буксирные тросы. К полудню обе секции «Престижа» приняли вертикальное положение (рис. 14), а к вечеру обе части затонули на глубине 3600 м [4].



Рисунок 14 - Гибель танкера «Престиж»

К тому времени около 50 тысяч тонн топлива уже вытекли в море. Надежды испанских властей на то, что в условиях сильного давления и низкой температуры на океанской глубине мазут затвердеет, не оправдались. Остававшееся на борту танкера, легшего на дно на глубине около 4 тысяч метров, топливо продолжало вытекать в океан вплоть до августа 2003 года [4].

Толстый слой нефти покрыл большую часть западного побережья Галисии, а также северных берегов Португалии и юго-запада Франции. На грани исчезновения оказались 25 охраняемых видов животных, 115 тысяч птиц погибли. Очисткой галисийских пляжей и скал занимались более 300 тысяч добровольцев со всей Европы.

К сожалению, тяжелые аварии с судами в море из-за коррозионных повреждений конструкций судов продолжают. По данным Регистра морского судоходства Ллойда за последние 10 лет погибло от потери плавучести 281 судно [5].

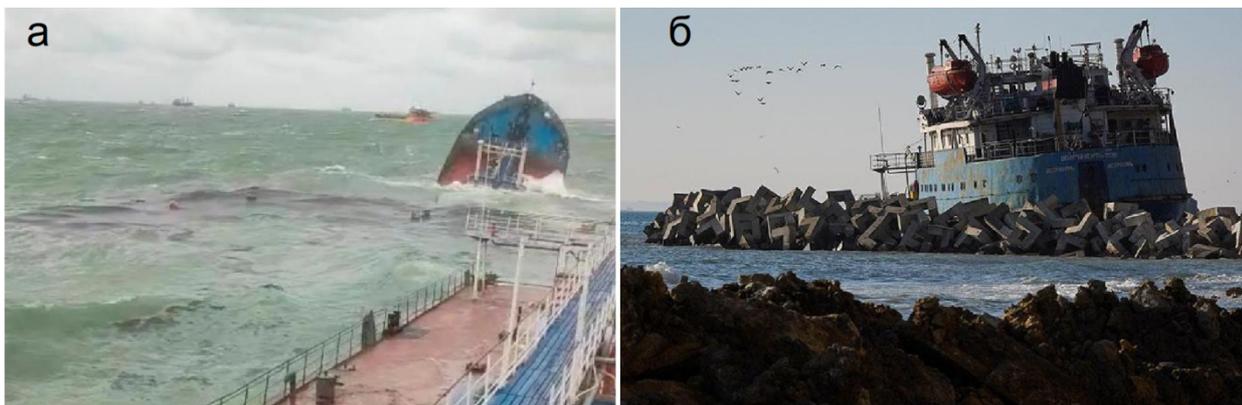


Рисунок 15 – Аварии танкеров класса «река-моря»: а - перелом корпуса танкера «Волгонефть-212» и б - кормовая часть танкера «Волгонефть-239» на мели

15 декабря 2024 г. в 08.57 в Чёрном море во время шторма произошёл разлом корпуса танкера «ВОЛГОНЕФТЬ-212» с грузом нефтепродуктов тяжелых сортов (мазут) наливом в количестве 4251,781 тонн в районе танков № 3 и № 4. По УКВ радиостанции капитаном подан сигнал бедствия. Экипаж в количестве 13 человек собрался в кормовой части судна. 12 членов экипажа спасено, один погиб. Судно затонуло (рис.15, а). Произошла утечка мазута в море [6].

В то же утро произошёл разлом корпуса танкера «ВОЛГОНЕФТЬ-239» с грузом мазута 4300,938 тонн. Носовая часть судна затонула. Кормовая часть т/х «ВОЛГОНЕФТЬ-239» вынесена на мель в районе мыса Панагия (рис.15, б). Экипаж не пострадал.

Оба судна возрастом старше 60 лет могли иметь значительный коррозионный износ [6].

Все эти аварии наглядно показали всю важность как надежной защиты корпуса судов от коррозии, так и контроля этой защиты в процессе эксплуатации.

Цель настоящей статьи ограничена описанием применяемой ведущими судостроительными предприятиями технологии защиты балластных танков нефтяных танкеров и судов для перевозки навалочных грузов вследствие их особой уязвимости и выработка рекомендаций для членов экипажа этих судов.

Под *балластным танком* понимается танк, используемый для водяного балласта, включая танки изолированного балласта, балластные танки двойного дна, подпалубные и скуловые танки и пики.

Из многочисленных методов защиты танков от коррозии (использование коррозионно-стойких конструкционных материалов, протекторная защита, введение ингибиторов коррозии в воду и нефтепродукты и др.) наиболее эффективным и распространенным является применение лакокрасочных покрытий, так как при этом облегчаются условия эксплуатации танков и сохраняется качество транспортируемых грузов. Установлено, что окраска танков экономически эффективна, если срок службы покрытий составляет не менее 5 лет [2].

Нержавеющая сталь идет главным образом на изготовление трубопроводов и арматуры, находящихся в контакте с морской водой.

Катодная защита - способ защиты стальной поверхности от коррозии путем установки расходоуемых протекторов в контакте со сталью, используемых в электрохимическом процессе.

О методе катодной защиты впервые сообщил в 1824 г. сэр Гемфри Дэви в серии докладов, представленных Лондонскому королевскому научному обществу. После продолжительных испытаний его впервые применили на судне «Самаранг». Анодные протекторы из железа были установлены на медную обшивку корпуса судна ниже ватерлинии, что значительно

снизило скорость коррозии меди. Медные листы медленно разрушаясь, освобождают ионы меди, проявляющие альгицидное действие.

Катодная защита не эффективна, если танк пуст и требуется время (день или более), чтобы она стала эффективной после заполнения танка [7].

Лакокрасочные материалы (ЛКМ) представляют собой многокомпонентные системы, способные при нанесении на защищаемую поверхность высыхать с образованием пленок, удерживаемых силами адгезии (сцепления).

Основная роль судовых антикоррозионных покрытий состоит в создании барьера, уменьшающего проникновение кислорода и агрессивных ионов морской воды к металлу.

Наибольшее распространение получили эпоксидные лако-красочные материалы, которые содержат жидкие низкомолекулярные эпоксидные смолы.

Эпоксидная смола является искусственным олигомером, набирающим максимальную прочность при взаимодействии с веществом-отвердителем. Для полимера характерна высокая степень адгезии, за счет которой он плотно соединяет почти все материалы, от кожи и легкой древесины до металлов.

Впервые об этом соединении стало известно, когда русский ученый Н. А. Прилежаев в 1909 г вследствие ряда химических экспериментов открыл реакцию эпоксидирования ненасыщенных соединений пероксибензойной кислотой. Далее уже ближе к середине 30-х годов химик из Германии П. Шлак получил патент на метод формирования полиаминов с высокими значениями молекулярной массы, образуемых при реакции аминов с эпоксидными соединениями.

Высокая адгезия, отличные защитные свойства эпоксидных покрытий и возможность снизить содержание растворителей компенсируют неудобство их применения, связанное с необходимостью смешения двух компонентов перед нанесением.

Одними из наиболее перспективных эпоксидных ЛКМ являются материалы, не содержащие летучих растворителей, - безрастворительные эпоксидные материалы (БЭП). Эти материалы отличаются от всех эпоксидных ЛКМ тем, что, как правило, содержат реакционно-способный нелетучий разбавитель, способный снижать вязкость композиции и участвовать в процессе пленкообразования после введения отвердителя.

Наличие эффективной системы предотвращения коррозии, такой, как прочное защитное покрытие, или его эквивалент, требует Правило 3-2 «Предотвращение коррозии балластных танков забортной воды» Главы II-1 Международной конвенции СОЛАС-74, вступившее в силу 1 июля 1998 года. В настоящее время это правило действует в редакции Резолюции MSC.216(82) от 8 декабря 2006 года и озаглавлено «Защитные покрытия специально предназначенных для забортной воды балластных танков на судах всех типов и помещений двойного борта на навалочных судах». Ключевым изменением стало требование соответствия защитного покрытия Стандарту качества защитных покрытий специально предназначенных для забортной воды балластных танков на судах всех типов и помещений двойного борта на навалочных судах, принятым Комитетом по безопасности на море резолюцией MSC.215(82) от 8 декабря 2006 года.

Руководство по выбору, применению, техническому обслуживанию и ремонту системы предотвращения коррозии балластных танков забортной воды было принято Резолюцией А.798(19) от 23 ноября 1995 года.

Для надежной защиты от коррозии путем нанесения лакокрасочных покрытий необходимы следующие условия:

- правильная подготовка поверхности под окраску;
- применение оптимальной схемы окраски с учетом условий эксплуатации судов, свойств лакокрасочных материалов и условий выполнения окрасочных работ;

- применение современных методов нанесения покрытий;
- строгое соблюдение при окрасочных работах всех необходимых технологических требований.

Поэтому 76-я сессия Комитета безопасности на море ИМО признала необходимость в разработке международных стандартов эксплуатационных характеристик покрытий балластных танков в дополнение к резолюции А.798(19).

Была учреждена рабочая групп (страна-координатор Китай). В работе группы активно участвовали следующие страны и организации: Китай, Греция, Япония, Либерия, Норвегия, Республика Корея, Соединенное Королевство и Соединенные Штаты Америки а также Балтийский и Международный морской совет (BIMCO), Международная палата судоходства (ICS), Европейское сообщество Ассоциация верфей (CESA), Международная ассоциация классификационных обществ (IACS), Международная ассоциация владельцев сухогрузных судов (ИНТЕРКАРГО), Международная ассоциация независимых владельцев танкеров (ИНТЕРТАНКО), Международный морской форум нефтяных компаний (OCIMF).

Эксперты ИНТЕРТАНКО посетили шесть судоверфей Юго-Восточной Азии и Дальнего Востока и представили отчет о существующей практике (рис.16). Хорошую возможность для обмена мнениями и информацией по данному вопросу предоставил Международный симпозиум по технологии судостроения (ISST 2007), проведенный в Японии, где также обсуждались технологии защиты судовых конструкций от коррозии, включая балластные цистерны для морской воды, пустые пространства, грузовые трюмы и грузовые танки, а также технология нанесения покрытий для такой защиты.



Рисунок 16 - Цех для нанесения защитного покрытия в процессе постройки судна

Проект стандарта в первоначальном виде был представлен Балтийским и международным морским советом BIMCO, Международной ассоциацией классификационных обществ IACS, Международной палатой судоходства ICS, Международной ассоциацией судовладельцев сухогрузов INTERCARGO, Международной организацией независимых танкерных судовладельцев INTERTANKO.

В процессе обсуждения этого проекта делегация Японии предложила включить в стандарт положения об одобрении защитных покрытий, оценке их эффективности, удалению грунтовки, нанесенного во время строительства и альтернативным процедурам, а также уточнила некоторые определения.

Делегация Японии также предложила вести на борту судна технический файл покрытия (CTF - Coating Technical File), включающий информацию о характеристиках покрытия и другие данные для облегчения ремонта и технического обслуживания. Согласившись, в принципе, с концепцией технического файла на покрытие, группа детально рассмотрела этот вопрос и предложила, чтобы CTF было представлено в упрощенной форме, состоящей из уже имеющихся материалов, не создавая трудностей для судовладельцев и верфей и не вводя ненужных изменений и дублирования.

На втором этапе был представлен проект, выработанный с учетом замечаний сторон.

Стандарт основан на рекомендации Форума по сотрудничеству в конструкции танкеров TSCF15, которая обосновала целевой срок эксплуатации 15 лет, считающийся периодом времени от первоначального нанесения покрытия, в течение которого система покрытия, как предполагается, будет оставаться в хорошем состоянии. Этот срок предоставляет адекватный уровень безопасности и ведет к ожидаемому повторному нанесению покрытия один раз за весь срок службы судно. 10-летний стандарт приведет к более чем одному возобновлению покрытия (что является дорогостоящим мероприятием) при низших характеристиках. 20- или 25-летний стандарт представляется непрактичным, так как требует дополнительных мероприятий для его обеспечения. Фактический срок эксплуатации будет различным в зависимости от многочисленных переменных факторов, включая фактические условия в ходе эксплуатации.

Стандартом предписывается степень очистки поверхности металла Sa 2½ по ISO 8501; очень тщательная пескоструйная очистка. Степень очистки — 96% чистой поверхности (рис.17). Проверка невооруженным взглядом показывает, что поверхность зачищена от видимых масляных, жировых пятен и грязи, от большей части окалины, ржавчины, краски, иных посторонних веществ. Остаточные следы заражения могут присутствовать только в форме едва заметных полос и пятен.



СТЕПЕНЬ ОЧИСТКИ Sa 2,5 A

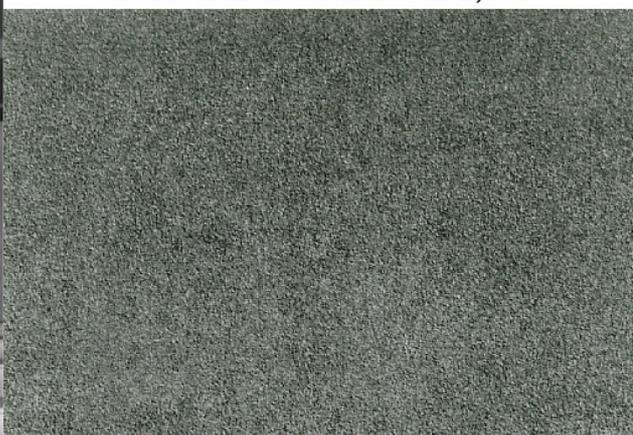


Рисунок 17 - Поверхность металла, подготовленная под окраску

0 МГ/СМ ²	10	30	50	70
НЕТ	НЕТ	НЕТ	НЕТ	НЕТ

100	150	200	400
РЖАВЧИНА 3 %	РЖАВЧИНА 10 %	РЖАВЧИНА 16 %	РЖАВЧИНА 33 %

Рисунок 18 - Развитие коррозии стали под эпоксидным покрытием в зависимости от концентрации хлоридов после 4200 часов эксперимента

Струйная очистка не должна производиться, когда относительная влажность выше 85%; или температура поверхности стали менее чем на 3°C выше точки росы.

Проверку чистоты и шероховатости стальной поверхности следует производить в конце подготовки поверхности и перед нанесением грунтовой краски в соответствии с рекомендациями изготовителя.

Проведенные Республикой Корея и ИНТЕРТАНКО исследования по влиянию растворимых солей на поверхности стали, подвергнутой пескоструйной обработке, на качество покрытия показали, что при концентрации хлоридов 0 – 70 мг/м² ржавчина под покрытием практически не образуется (рис.18).

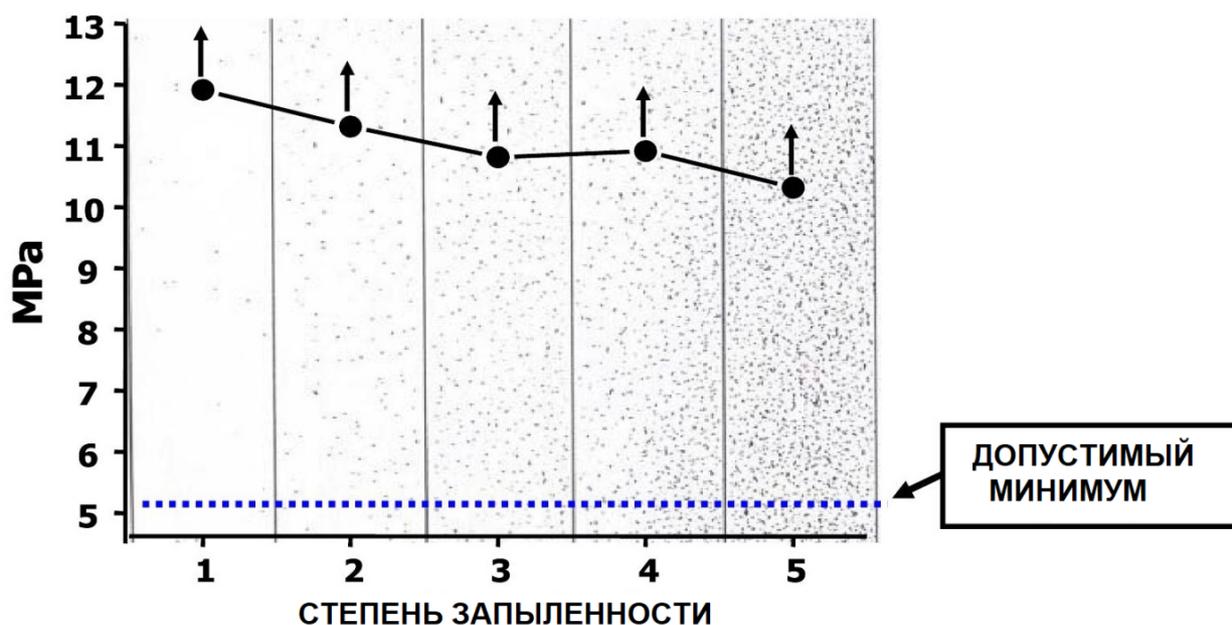


Рисунок 19 - Сила адгезии в зависимости от степени запыленности

Аналогичные исследования, проведенные в Южной Корее по исследованию сил адгезии в зависимости от степени запыленности позволили включить в стандарт допустимую степень запыленности «1» на поверхности стали после пескоструйной обработки (рис.19).

После длительного обсуждения заданная общая толщина сухой пленки для покрытий на эпоксидной основе в окончательном варианте принята 320 мкм.

При рассмотрении количества слоев большинство придерживалось мнения, что для обеспечения удовлетворительных эксплуатационных характеристик необходимо как минимум два слоя непрерывной полосой и два полных слоя (напыления).

В стандарте требования к защитным покрытиям сведены в таблицу. Важность тщательного соблюдения стандарта иллюстрируют приведенные ниже фотографии (рис. 20).



Рисунок 20 - Фотографии балластных танков двух судов одинакового возраста 13 лет: а - покрытие нанесено с соблюдением стандарта, б – с нарушением технологии

Затем Рабочая группа занялась разработкой требований к защитным покрытиям пустых пространств, в которые обычно не попадает морская вода.

Вначале группа намеревалась заняться междубортными пустыми пространствами всех типов судов. Однако вскоре пришли к выводу, что особенности конструкции пустот варьиру-

ют от типа судна к типу, и будет сложно охватить все типы судов в рамках одного стандарта. Поэтому работ была сосредоточена только на пустых междубортных пространствах балкеров и нефтяных танкеров, принимая во внимание, что на этих двух типах судов они наиболее подвержены коррозии и важны для безопасности перевозки грузов. Пустые помещения других типов судов также следует рассмотреть, но на более позднем этапе.

Отметив важность этих пустот для прочности и целостности конструкции балкеров и, признавая, что условия в пустых помещениях могут быть самыми разными, группа сочла, что, возможно, нецелесообразно применять для них единый подход и решила классифицировать их, чтобы разработать подходящие требования для пустых помещений различных категорий.

Сначала были предприняты попытки сгруппировать пустые пространства в соответствии с условиями, в которых они находятся, и их доступностью для осмотра и технического обслуживания. Затем ИНТЕРТАНКО, при поддержке некоторых членов, было предложено выделить две группы пустых пространств (категория I и категория II) только по условиям окружающей среды в пустом пространстве в соответствии со следующими критериями.

Группа 1 – Пустые помещения вне помещений с кондиционером (и без работающего осушительного оборудования), с относительной влажностью воздуха > 60% и с постоянным присутствием застаивающейся воды.

Группа 2 – Пустые пространства в сухих помещениях с кондиционированным воздухом (или с работающим осушительным оборудованием), с постоянной относительной влажностью воздуха <60% и отсутствием застаивающейся воды.

Пустые помещения категории I (CI) должны рассматриваться как балластные цистерны, а помещения категории II (CII) должны подпадать под проект стандарта на пустые помещения. На основе вышеуказанных критериев и условий составлена таблица 1, в которой пустые пространства расположились по трем уровням коррозионной опасности и возможным последствиям.

Таблица 1 - Матрица оценки коррозионного риска

По сле дст вия кор роз ион ног о пов реж ден ия	Суровые	Нет требований	Высокий стандарт PSPC/VS CI	Стандарт для балластных танков PSPC/DSWBT
	Умеренные	Нет требований	Низкий стандарт PSPC/VS CII	Высокий стандарт PSPC/VS CI
	Нет последствий	Нет требований	Нет требований	Нет требований
		Отсутствует	Низкий	Высокий
	РИСК КОРРОЗИОННЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ			

PSPC/DSWBT = Performance Standard for Protective Coating of Double Side Water Ballast Tank
PSPC/VS = Performance Standard for Protective Coating of Void Spaces

Структура эксплуатационного стандарта на защитные покрытия пустых пространств аналогична структуре эксплуатационного стандарта на защитные покрытия балластных танков, но, в отличие от последнего, он носит рекомендательный характер. Срок эксплуатации такого покрытия должен также составлять 15 лет, толщина защитного слоя – не менее 200 мкм. Резолюция MSC.244(83) утвердила Стандарт качества защитных покрытий для пустых помещений навалочных судов и нефтяных танкеров.

Техническое обслуживание является обязательным требованием, и судовладелец должен разработать и внедрить систему планового технического обслуживания в соответствии с требованиями Кодекса МКУБ и других документов.

Комитет безопасности на море на своей 86-й сессии в июне 2009 г. утвердил циркуляр MSC.1/Circ.1330 «Руководство по обслуживанию и ремонту защитных покрытий», который был пересмотрен на 108-й его сессии (циркуляр MSC.1/Circ.1330/Rev.1 от 28 июня 2024 г.).

Очень важно объективно оценить состояние защитного покрытия. Рабочая Группа согласилась применять в проекте Руководства по техническому обслуживанию и ремонту защитных покрытий те же определения понятий ХОРОШЕЕ, УДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНОЕ и НЕУДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНОЕ, которые даны в резолюции А.744(18), поскольку промышленность с ним знакома, и оно хорошо зарекомендовало себя на практике (табл. 2).

Таблица 2 - Состояние покрытия

	ХОРОШЕЕ³	УДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНОЕ	НЕУДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНОЕ
Повреждение покрытия или площадь ржавчины	< 3%	3 – 20%	> 20%
Площадь твердой окалины	-	< 10%	≥ 10%
Локальное повреждение покрытия или ржавчина на кромках или сварных швах ²	< 20%	20 – 50%	> 50%

Примечания:

1 % - это процент, рассчитанный на основе рассматриваемой площади или критической структурной области.

2 % - это процент, рассчитанный на основе кромок или линий сварного шва в рассматриваемой области или критической области конструкции.

3 точечная коррозия, т.е. точечная коррозия без видимого разрушения покрытия.

ХОРОШЕЕ - состояние, характеризующееся лишь незначительным ржавлением в отдельных точках;

УДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНОЕ - состояние, характеризующееся местным нарушением покрытия на кромках ребер жесткости и сварных соединениях и/или легким ржавлением 20 процентов или более рассматриваемых районов, но в меньшей степени, чем определено в отношении ПЛОХОГО состояния;

ПЛОХОЕ - состояние, характеризующееся общим нарушением покрытия у 20 процентов или более районов или сильным отслаиванием покрытия в 10 процентах или более рассматриваемых районов.

Для оценки состояния покрытия служит специальная шкала (рис. 21).

«Техническое обслуживание» означает текущие работы по восстановлению покрытия, регулярно выполняемые экипажем судна с использованием обычных судовых средств и инструментов для поддержания ХОРОШЕГО состояния; в то время как «Ремонт» означает работы по восстановлению покрытия более длительный по своему характеру, обычно выполня-

емый во время стоянки судна в сухом доке или планового ремонта с целью восстановления состояния покрытия до ХОРОШЕГО.

Повреждения покрытия, которые рассматриваются в Руководстве, это ухудшение его качества в течение предписываемого срока службы. Ниже приведены основные типы повреждений.

Растрескивание - это повреждение, при котором трещины проникают по меньшей мере в один слой и которое, как можно ожидать, в конечном итоге приведет к полному разрушению (рис.22, а). Такие трещины могут быть вызваны чрезмерной толщиной слоя краски, пластическими структурными деформациями из-за превышения способности работы пленки краски на растяжение и локализованное усталостное напряжение из-за неподходящей конструкции.

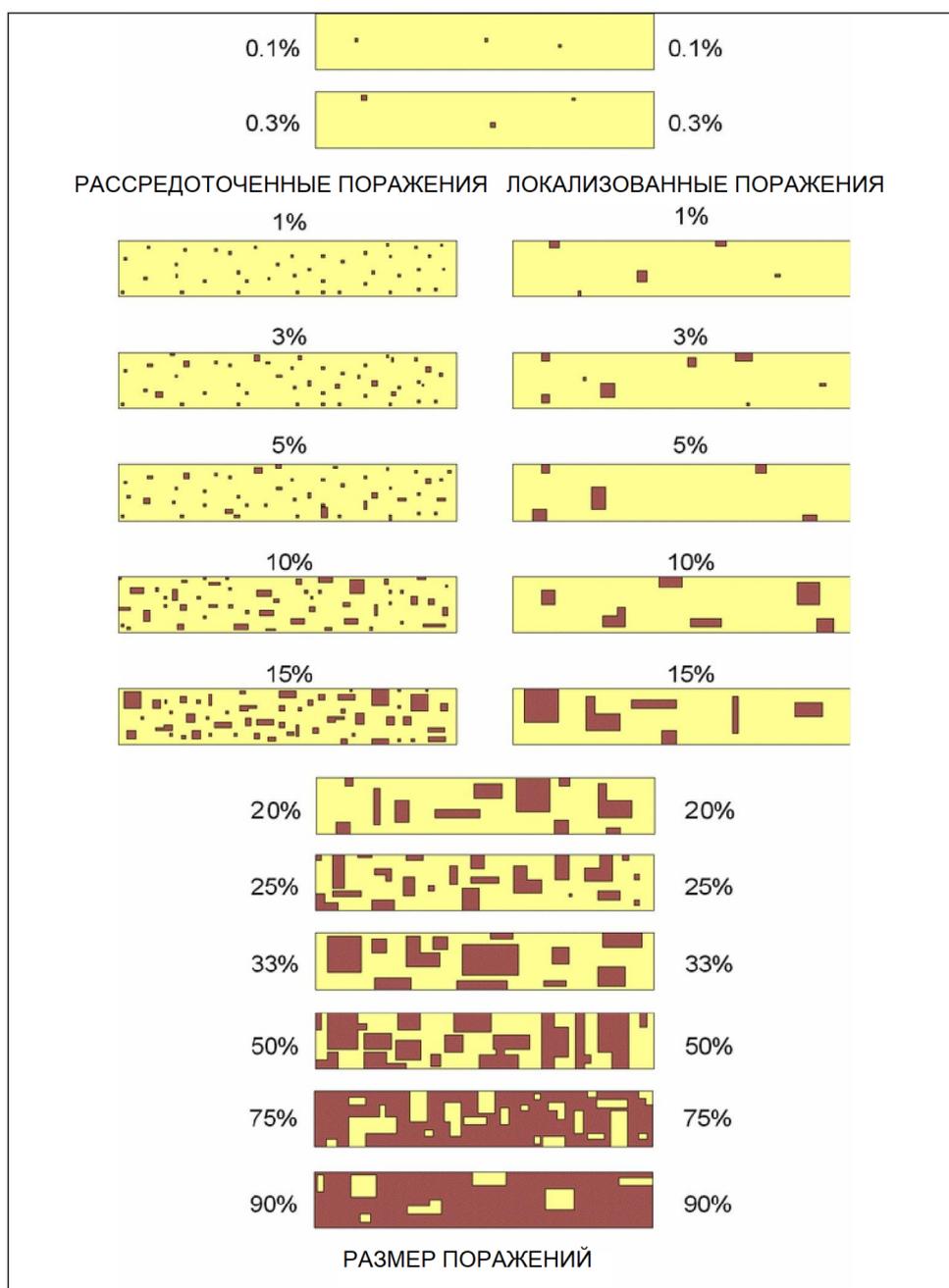


Рис. 21. Шкала для оценки степени повреждения защитного покрытия

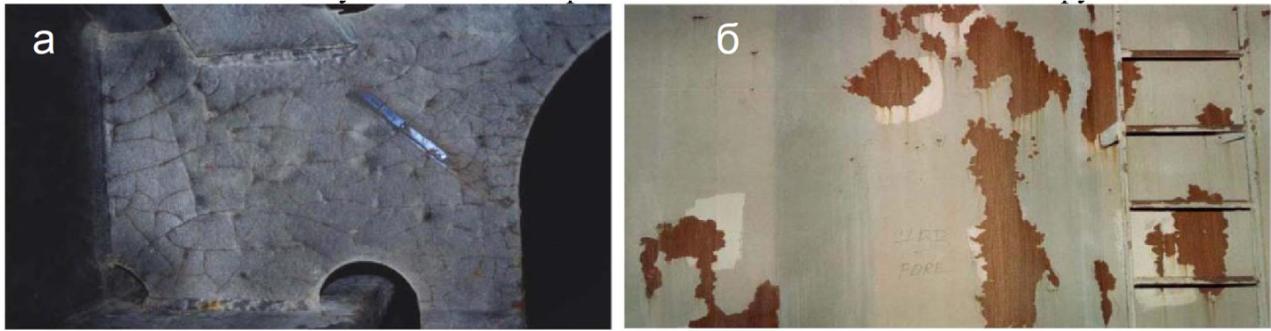


Рис. 22: а - растрескивание и б - отслоение покрытия

Отслоение (потеря адгезии) заключается в отслаивании краски от основной поверхности в виде хлопьев или чешуек (рис. 22, б). Причинами потери адгезии могут быть следующие:

- неудовлетворительная подготовка поверхности;
- несовместимость с нижележащим слоем;
- загрязнение между слоями; и
- превышение времени отверждения между слоями.



Рис.23. Блистеринг

Блистеринг. На поверхности лакокрасочного покрытия образуются пузырьки диаметром от 3-4 мм до 20-30 мм (рис. 23). Пузырьки содержат жидкость, пар или газ. Образование пузырей - это локальная потеря адгезии и отслоение пленки, обычно возникающее в результате осмоса по одной из следующих причин:

- скопление растворителя;
- неправильное нанесение покрытия; и
- загрязнение лакокрасочного покрытия растворимыми солями из-за недостаточной очистки поверхности.

Следует отметить, что в большинстве случаев неповрежденные пузыри не вызывают коррозии и, если их не трогать, защита может быть обеспечена на долгие годы. Часто на-

блюдаются вздутия из-за обильного перекрытия слоев и плохого растирания. Иногда вздутия наблюдаются на плоских деталях и часто на участках, с которыми трудно работать, например, на торцах выступов.

Учитывая, что на разных участках танка наблюдается разный характер разрушения покрытия и коррозии, следует разделить плоские границы танка для оценки состояния покрытия на участки, достаточные по размеру, чтобы их можно было легко осмотреть и оценить инспектором. Однако разделяемые участки не должны быть настолько малы, чтобы быть структурно незначительными, или слишком многочисленными, чтобы по ним можно было практически составить отчет. О состоянии покрытия в каждой зоне следует сообщать, используя существующую практику и терминологию (номера шпангоутов, номера продольных связей и/или поясьев и т.д.). Состояние каждого участка оценивается как **ХОРОШЕЕ**, **УДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНОЕ** или **НЕУДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНОЕ** и оценка танка не должна быть выше, чем оценка рассматриваемой площади, имеющей низшую оценку.

Особое внимание следует уделять покрытию в критических конструктивных зонах, которые чувствительны к растрескиванию, деформация или коррозия, которые могли бы нарушить структурную целостность судна". Каждая критическая зона также оценивается как **ХОРОШАЯ**, **УДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНАЯ** или **НЕУДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНАЯ**, и рейтинг каждого рассматриваемого района не должен быть выше, чем рейтинг критической структурной зоны (если они присутствуют), имеющей самый низкий рейтинг.

Технологические рекомендации по техническому обслуживанию приведены в разделе 4.1 приложения. Требования к некоторым элементам (например, к загрязнению солью), предъявляемые при техническом обслуживании, менее жесткие, чем при ремонте.

При техническом обслуживании необходимо учитывать факторы, приведенные ниже.

Безопасность. Необходимо ознакомиться с рекомендациями по входу в закрытые помещения на борту судов (резолюция А.1050(27)). Обязательным требованием является соблюдение всех правил безопасности на судне и при входе в танки. Кроме того, настоятельно рекомендуется, чтобы все члены бригады по обслуживанию покрытий перед отправкой на судно прошли обучение безопасному обращению со всем оборудованием и инструментами, которые будут использоваться на борту.

Загрязнение солью приведет к ускоренному ухудшению состояния покрытия, если ее не удалить при техническом обслуживании перед нанесением покрытия. Рекомендуемая процедура для уменьшения загрязнения солью заключается в удалении отложений ржавчины с последующей, по возможности, тщательной промывкой пресной водой. Это должно стать отправной точкой в любом процессе подготовки поверхности в балластных танках на борту судов.

Окалина, которая не удаляется перед нанесением покрытия, может привести к преждевременному выходу покрытия из строя. Отслоившуюся верхнюю окалину легко удалить, однако внутренняя (черная) твердая окалина гораздо более стойкая. При нанесении избыточного покрытия она вскоре отделяется от окалины, при этом покрытие, как правило, хорошо держится на поверхности. Если удалить затвердевшую окалину невозможно, ожидаемый срок службы покрытия составляет от 1 до 2 лет, независимо от используемого покрытия.

Точечная коррозия является распространенной проблемой в балластных танках, которые в течение некоторого времени подвергались воздействию морской воды. В углублениях могут присутствовать растворимые соли, и их необходимо удалить перед нанесением покрытия промывкой пресной водой. В противном случае внутри углублений с покрытием вскоре начнется коррозия, что повлияет на срок службы.

Температура является критическим параметром, который необходимо учитывать. При плавании в холодных водах будет сложно защитить внутренние поверхности танка от кон-

денсата и своевременного отверждения покрытия. По возможности следует планировать техническое обслуживание в периоды или в местах в более теплых водах.

На борту судов всегда существует опасность образования конденсата. Рекомендуется, чтобы экипаж хорошо понимал относительную влажность воздуха и ее связь с температурой субстрата и точкой росы. Нанесение краски на поверхность, температура которой находится на уровне точки росы или ниже нее, или которая будет находиться на уровне точки росы или ниже нее, пока покрытие влажное, неэффективно. В идеале температура должна быть как минимум на 3° C выше точки росы.

Вентиляция является жизненно важным фактором. Это один из элементов, который, несомненно, обеспечивает как качество нанесения, так и безопасность эксплуатации. Вентиляцию должна охватывать самые нижние и отдаленные места, чтобы обеспечить быстрое и эффективное удаление опасных растворителей. Использование систем нанесения покрытий, не содержащих растворителей, не означает, что вентиляция не требуется.

Совместимость систем покрытия имеет первостепенное значение для получения хорошего конечного результата. Для обеспечения совместимости систем покрытия рекомендуется использовать ту же систему покрытия, которая использовалась изначально. Если это невозможно, следует следовать рекомендациям производителя краски. При подкрашивании неповрежденный слой рядом с поврежденным участком следует растереть для обеспечения хорошей адгезии.

Процесс обслуживания включает:

- удаление ржавчины;
- промывку пресной водой;
- сушку;
- подготовку поверхности;
- при необходимости анодная защита (защита изделий без покрытия) и
- нанесение покрытия.

В таблице 3 приведены рекомендации по техническому обслуживанию для поддержания хорошего или удовлетворительного состояния покрытия.

Таблица 3. Рекомендуемое техническое обслуживание

Цели	Подготовка	Система покрытия	Толщина сухой пленки (DFT)
Уход за поврежденным участком ОТ ХОРОШЕГО к ХОРОШЕМУ От УДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНОГО к УДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНОМУ	Удаление грязи, масла, смазки и т.д. Промывка пресной водой из шланга Сушка St 3 ⁵ или эквивалент в соответствии с рекомендациями производителя Проверьте условия окружающей сре-	Система на основе эпоксидной смолы Используйте ту же систему покрытия, которая использовалась изначально, или в соответствии с рекомендациями производителя	В соответствии с рекомендациями производителя

При надлежащем техническом обслуживании именно экипаж должен своевременно обнаружить и устранить назревающие проблемы в балластных отсеках судна, но для этого ему часто не хватает экспертных знаний. В связи с этим необходимо включить в программу повышения квалификации судовых специалистов вопросы борьбы с коррозией, а также контроля и эксплуатации защитных покрытий.

Список литературы

1. Googan Ch. Marine Corrosion and Cathodic Protection: London: CRC Press – 2022 - 560 p.
2. Дринберг А.С., Калинин Т.В., Уденко И.А. Технология судовых покрытий. М.: ЛКМ Пресс – 2016 – 672 с.
3. Report of the Enquiry into the Sinking of the ERIKA off the Coasts of Brittany on 12 December 1999 [Электронный ресурс]// Bureau – enquêtes-accidents. – Режим доступа: https://www.bea-mer.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/RET_ERIKA_En_Site.pdf (дата обращения 08.04.2025).
4. Report of the investigation into the loss of the Bahamian registered tanker “Prestige” off the northwest coast of Spain on 19th November 2002 [Электронный ресурс]// The Bahamas Marine Authorities. – Режим доступа: <https://www.bahamasmaritime.com/wp-content/uploads/2020/10/BMA-Investigation-Report-Hull-failure-and-loss-of-the-Prestige.pdf> (дата обращения 09.04.2025).
5. Мотрич, В.Н. Аварийность морского флота : - Текст : непосредственный // Морские вести России. - 2024. - №11. - с. 10-11.
6. Федеральная служба по надзору в сфере транспорта. Сборник характерных аварий судов на море и на внутренних водных путях Российской Федерации, произошедших в 2024 году [электронный ресурс] – Режим доступа: <https://rostransnadzor.gov.ru/storage//2024.pdf> (дата обращения 10.05.2025).
7. Эксплуатационные требования к защитному покрытию специально предназначенных для забортной воды балластных танков на судах всех типов и помещений между двойной обшивкой борта навалочных судов: Сборник № 33 резолюций ИМО. – Спб.: ЗАО ЦНИИМФ, 2007. – 304 с.

Поступила в редакцию 16 июня 2025 г.

О некоторых особенностях интеллектуальной модернизации морских портов Китая

Баранникова Анастасия Олеговна, к.и.н., aobarannikova@gmail.com

Морской государственный университет имени адмирала Г.И. Невельского, г. Владивосток

Цифровая трансформация морской отрасли Китая представляет интерес с точки зрения как темпов внедрения новых технологий, так и своей масштабности. В данной статье рассмотрены некоторые особенности интеллектуальной модернизации морских портов Китая, этапы внедрения умных технологий в порты Нинбо-Чжоушань, Шанхай и Тяньцзинь и предпринята попытка объяснить эффективность интеллектуальной модернизации морских портов по «китайскому образцу».

Ключевые слова: Китай, интеллектуальный порт, цифровизация, автоматизация.

On some features of intelligent modernization of China's seaports

Anastasia Barannikova O., Ph.D., aobarannikova@gmail.com

Maritime State University named after Admiral G.I. Nevelskoy, Vladivostok

The digital transformation of China's maritime industry is of interest both in terms of the pace of implementation of new technologies and its scale. This article examines some features of the intelligent modernization of China's seaports, the stages of implementing smart technologies in the ports of Ningbo-Zhoushan, Shanghai and Tianjin, and attempts to explain the effectiveness of the intelligent modernization of seaports according to the "Chinese model".

Keywords: China, smart port, digitalization, automation.

Китай по праву считается мировым лидером по масштабам автоматизации и цифровизации морских портов. По данным Министерства транспорта КНР, в стране насчитывается 52 автоматизированных контейнерных терминала и терминала для сыпучих грузов, что является крупнейшим показателем автоматизации портов в мире [1]. В стране активно разрабатываются решения по созданию интеллектуальных портов, и некоторые из них уже нашли применение за пределами Китая, например, в странах Латинской Америки и Ближнего Востока [4; 8].

Интеллектуальная модернизация китайских портов повысила эффективность портовых операций и качество услуг. Например, в порту Циндао (провинция Шаньдун) за счет автоматизации кранов на 15% выросла пропускная способность. Порт уже в 12-й раз обновил мировой рекорд по эффективности погрузочно-разгрузочных работ, обрабатывая в среднем 60,9 контейнера в час на один кран. Грузооборот порта Нинбо-Чжоушань за 11 месяцев 2024 года

достиг 1,26 млрд тонн, что на 3,27% больше по сравнению с аналогичным периодом прошлого года. Объем контейнерных перевозок вырос на 10,2% и составил 36,14 млн TEU. За январь-ноябрь 2024 года грузооборот всех китайских портов достиг 16,04 млрд тонн, увеличившись на 3,4% по сравнению с аналогичным периодом прошлого года. Контейнерооборот превысил 300 млн TEU, что на 7,3% больше по сравнению с тем же периодом прошлого года. Это, в свою очередь, способствовало росту внешней торговли на 4,9% [5].

Опыт Китая представляет интерес с точки зрения как темпов перехода портов на «интеллектуальные» рельсы, так и специфических технологий. В данной статье будут рассмотрены некоторые особенности интеллектуальной модернизации морских портов Китая.

Процесс цифровизации морских портов Китая необходимо рассматривать как неотъемлемую часть стратегии китайского правительства по цифровой трансформации всей страны под лозунгом «Ускорить цифровое развитие и построить цифровой Китай». Данная стратегия подразумевает цифровизацию всех сфер жизни страны - экономики и промышленности, сельского хозяйства, медицины, транспорта, создание "умных" городов и т.д. В 2006 г. правительством был принят «Государственный средне- и долгосрочный план развития науки и технологий» на период до 2020 года». По мере выполнения задач плана было разработано множество новых документов, определяющих цифровое развитие страны: План социально-экономического развития на 14-ю пятилетку (2021-2025 гг.), стратегия «Сделано в Китае 2025», «Интернет +», и т.д.

Развитию морских портов отведено особое место в правительственных планах, так как Китай является крупнейшим экспортером и участником международной торговли, и 90 процентов его внешней торговли осуществляется морским транспортом. В периоды 10-й и 11-й пятилеток национальная политика постепенно развивалась в сторону интенсификации строительства портов, расширения пропускной способности портов и создания и улучшения современной транспортной системы. В 12-й и 13-й пятилетние периоды Китай повышал уровень модернизации своих портов. Наконец, в «Плане на 14-ю пятилетку...» (2021–2025 гг.) были определены цели развития интеллектуальных портов, отмечена необходимость построения современной интегрированной транспортной системы и ускорения строительства портов мирового класса. Планом предусмотрено развитие портов Далянь, Тяньцзинь, Циндао, Шанхай, Нинбо Чжоушань, Сямынь, Шэньчжэнь и Гуанчжоу, интеллектуальная трансформация существующих контейнерных терминалов и ускорение строительства автоматизированных терминалов нового поколения [11]. При этом особый акцент в планах делается на использование собственных научно-технических разработок, что отражает стремление Китая к достижению технологического суверенитета.

Рассмотрим опыт модернизации некоторых из крупнейших китайских портов.

Нинбо-Чжоушань

Китайский порт Нинбо-Чжоушань является важным контейнерным морским магистральным портом в материковой части Китая и крупнейшей базой перевалки железной руды и сырой нефти в Китае. Порт является одним из крупнейших в мире по контейнерообороту в течение последних девяти лет подряд, обслуживает более 300 морских контейнерных линий, включая более 250 международных маршрутов, которые соединяют свыше 600 портов в более чем 200 странах и регионах мира. В 2024 году порт Нинбо-Чжоушань достиг исторического грузооборота в 1,37 млрд тонн, заняв первое место в мире. Его контейнерооборот достиг 39,3 млн TEU, что на 11,3% больше, чем в предыдущем году. Порт Нинбо-Чжоушань является одним из основных портовых хабов в рамках инициативы «Один пояс, один путь». Он обслуживает 130 маршрутов инициативы Пояса и Пути, выполнил 5600 рейсов в 2023 году и обработал более 14 миллионов стандартных контейнеров [6].

Интеллектуальная модернизация порта началась в 2018 году, когда между Zhejiang Seaport (государственное предприятие, управляющее активами группы Нинбо-Чжоушань), China Mobile Zhejiang, China Mobile Ningbo и Zhenhua Heavy Industries был подписан ряд соглашений о создании интеллектуального порта 5G в терминале Мэйшань. Следует отметить, что к этому моменту грузооборот порта уже достигал 1 млрд тонн в год [7].

В 2019 году на причале № 4 международного контейнерного терминала Мэйшань в порту Нинбо-Чжоушань было осуществлено первое успешное применение инновационных беспроводных технологий, таких как передача видеосигналов на базе 5G и управление эксплуатацией портовых кранов. Это стало первым пробным применением технологий умного порта с действующей сетью 5G в Китае, а также успешной реализацией приоритетной программы развертывания сетей 5G, разработанной China Mobile Ningbo, научно-исследовательским институтом China Mobile и компанией Huawei. После этого решения 5G стали внедряться в портах вдоль юго-восточных прибрежных районов Китая. [5]

В мае 2020 года было запущено производство козловых кранов с дистанционным управлением, работающих на 5G. В том же году China Mobile Ningbo развернула опорные станции Beidou и на основе технологий 5G, V2X и высокоточного позиционирования и оснастила контейнеровозы в терминале Мэйшань технологиями беспилотного вождения.

В порту была построена интегрированная сеть, охватывающая контейнеровозы, мобильное портовое оборудование и дороги для автоматизированных транспортных средств (AGV). Массовое развертывание AGV привело к росту эффективности более чем на 40% и позволило снизить затраты на рабочую силу более чем на 50%. Совместно с China Mobile Ningbo и Huawei в порту применяется технология платунинга контейнеровозов, в т.ч. и гибридного (когда группа состоит из AGV и обычных контейнеровозов). Осуществляется передача HD-видео с портовых кранов в режиме реального времени с использованием технологий 5G, искусственного интеллекта и облачных вычислений для автоматической идентификации номера и выявления возможных повреждений контейнеров с точностью идентификации контейнеров до 95% [6].

В порту Нинбо-Чжоушань активно применяются решения на основе искусственного интеллекта. В систему автоматического контроля грузов интегрирован DeepSeek. ИИ способен распознавать более 80% уникальных номеров контейнерных пломб, что значительно сокращает время на проверку. DeepSeek также помогает быстрее реагировать на технические неисправности — время обработки ошибок теперь не превышает 30 минут. Кроме того, порт тестирует применение ИИ в круглосуточной службе поддержки клиентов. В частности, задействуется модель Tongyi Qianwen от Alibaba. В будущем цифрового помощника планируется использовать и для управления кранами и системами безопасности [3].

Шанхай

Наряду с портом Нинбо-Чжоушань является крупнейшим портом в портовом кластере дельты реки Янцзы и важным звеном Пояса и Пути. Порт имеет 125 причалов, которые способны принимать более 2 000 контейнерных судов ежемесячно. Одной из самых технологичных частей комплекса является глубоководный порт Яншань, в котором сосредоточена наибольшая часть обработки грузов благодаря использованию автоматизированных терминалов и роботизированных кранов. Порт активно использует искусственный интеллект и аналитические алгоритмы для оптимизации загрузки контейнеров, прогнозирования заторов и планирования маршрутов. Это существенно снижает время обработки грузов и логистические затраты.

В 2024 году контейнерооборот порта Шанхай составил 51,506 млн TEU, что стало новым мировым рекордом в истории контейнерных перевозок в порту. В настоящее время порт Шанхай обслуживает около 350 международных судоходных сервисов, соединяя более 700

портов в более чем 200 странах и регионах. В 2024 году объем международной перевалки порта Шанхай вырос более чем на 20% в годовом исчислении, а годовой объем перевалки превысил 7 млн TEU [9].

С 2016 года Отдел стратегических исследований порта начал проводить научно-исследовательскую работу по направлению «Умный порт» в сотрудничестве с внешними организациями. Параллельно проводилась автоматизация терминалов шанхайского порта Яншань (очереди I, II и III) и создание интеллектуальной системы управления операциями. Было осуществлено внедрение программного обеспечения для интеллектуального анализа деятельности порта, спроектированного и разработанного внутри страны группой Shanghai Harbor e-Logistics Software в сотрудничестве с Cisco HyperFlex. В результате Яншань был автоматизирован, а его возможность по обработке контейнеров достигла четырех миллионов единиц. Внедрение нового программного обеспечения для автоматизации порта и ИИ позволило увеличить производительность вычислительной и складской инфраструктуры порта и повысить скорость обработки грузов на 30 процентов, что позволило сэкономить 10 часов при разгрузке груза для самого большого контейнеровоза. Кроме того, за счет внедрения новых технологий в порту было достигнуто 10-процентное снижение выбросов углерода [10].

В декабре 2017 года в тестовом режиме был открыт терминал Яншань IV очереди, который стал крупнейшим и самым автоматизированным контейнерным терминалом в мире. На этот раз были задействованы китайские технологии - операционная система для подключения основных информационных платформ порта и автоматизации планирования производства в основных бизнес-звеньях терминала и специальный компьютерный процессор. Система программного обеспечения состоит из интеллектуальной системы управления и контроля ITOS, разработанной SIPG (оператор порта Шанхай), а также системы программного обеспечения ECS (системы управления оборудованием), разработанной компанией Zhenhua Heavy Industries и являющейся «мозгом» всего терминала. Система ITOS связана с морскими судами, дорожным транспортом, портовой администрацией, системой внутреннего контроля, и измерительными блоками оборудования, охватывая весь процесс операций в терминале, и является «мозгом» автоматизированного контейнерного терминала [2]. Техника, задействованная в работе терминала Яншань, также произведена китайской компанией Zhenhua Heavy Industries.

7 августа 2024 года была официально открыта первая очередь порта Лоцзин в порту Шанхая. Расположенный на южном берегу устья реки Янцзы, полностью автоматизированный контейнерный терминал Лоцзин стал примером первого в Китае проекта реновации порта с перепрофилированием с традиционной переработки угля и руды на контейнерные операции. Первый этап проекта включает создание одного причала для контейнеров на 100 тыс. тонн и четырех причалов на 10 тыс. тонн с годовой проектной пропускной способностью 2,6 млн TEU.

Управление контейнерного терминала Лоцзин осуществляется на базе NEO-TOS, китайской интеллектуальной системы управления операциями. Используя такие технологии, как автоматизация, большие данные и искусственный интеллект, система обеспечивает интеллектуальную работу причальных кранов, автоматизированных рельсовых козловых кранов (ARMG) и автоматизированных интеллектуальных транспортных средств (AIV). В настоящее время в порту Лоцзин насчитывается 14 автоматизированных контейнерных кранов, 31 ARMG и 90 AIV. Наряду с Яншань IV контейнерный терминал Лоцзин считается очередной важной вехой в развитии «зеленых» и интеллектуальных терминалов [10].



Рисунок. Контейнерный терминал первой очереди в районе порта Лоцзин Шанхайского порта начал работу [Фото/Синьхуа]

Тяньцзинь

Порт Тяньцзинь является морскими воротами в Пекин, Тяньцзинь, Хэбэй и регион «Три Севера», важным узлом экономического коридора Нового континентального моста Азия-Европа и составляющей Пояса и Пути. Порт известен своими успехами в развитии низкоуглеродной экономики и строительстве интеллектуальных терминалов. 213 причалов порта обрабатывают широкий спектр грузов — от контейнеров и сырьевых материалов до нефти и автомобилей. По данным 2024 года порт обслуживает 145 контейнерных маршрутов, поддерживая торговлю с более чем 500 портами в более чем 180 странах и регионах по всему миру. В 2024 году грузооборот порта составил 453 млн тонн, контейнерооборот - 20,48 млн TEU [15].

17 января 2019 года генеральный секретарь Си Цзиньпин лично посетил порт Тяньцзинь и дал указание построить интеллектуальный и «зеленый» порт мирового класса в рамках скоординированного развития Пекин-Тяньцзинь-Хэбэй и совместного строительства «Пояса и пути», что предопределило направление развития порта Тяньцзинь [14]. К этому времени годовой грузооборот порта достигал 428,66 млн тонн, а контейнерооборот - 15,97 млн TEU [13].

Tianjin Port Group, управляющая активами порта, провела работу по созданию интеллектуальной инфраструктуры, цифровизации производственных операций и торговой логистики. Была проведена модернизация и энергетической системы порта. Был построен ветряной парк, который полностью обеспечивает потребности порта в энергии.

В 2022 году Tianjin Port Group и Huawei разработали и построили новый «умный» терминал, сделав Тяньцзинь одним из самых технологически продвинутых портов Китая. В контейнерном терминале секции С порта Тяньцзинь была проведена автоматизация всех причальных кранов и внедрены технологии автономного вождения 5G и 4L. Одной из ключевых инновационных технологий, внедренных в работу интеллектуального терминала, является горизонтальная транспортная система на основе искусственного интеллекта Huawei. Эта система является первым в мире крупномасштабным коммерческим использованием технологии беспилотного управления Ultra-L4, а также первой интеграцией «5G+BeiDou» в сфере

«зеленой» энергетики и нулевых выбросов углерода [16].

В 2024 году была введена в эксплуатацию автоматизированная система управления контейнерным терминалом JTOS, разработанная в Китае. Были разработаны интеллектуальная платформа таможни и порта и сеть электронной коммерции порта Тяньцзинь, которые упростили таможенные процедуры в порту и позволили перейти на «полностью безбумажный» документооборот [14].

На данный момент интеллектуальная инфраструктура порта включает базовые станции 5G и наземные сети Beidou нового поколения в портовых зонах. Интеллектуальный центр управления и контроля порта обеспечивает мониторинг и управление в режиме реального времени портовыми операциями, безопасностью, защитой окружающей среды и т. д. посредством анализа больших данных и использования «цифрового двойника» порта. Облачный центр обработки данных порта обеспечивает интеграцию и обмен большими данными портов и судоходных компаний, поддерживает стабильную работу основной прикладной системы предприятия. Платформа управления большими данными делает возможной интеграцию портовых и трансграничных ресурсов данных, сбор информации по всему процессу логистики и торговых операций, представляет собой единую, открытую, полную, безопасную и эффективную платформу управления большими данными, их хранения, добычи, анализа и использования [14].

Заключение

На основе рассмотренных выше особенностей цифровой модернизации отдельных китайских портов можно отметить, что все порты к моменту внедрения интеллектуальных технологий отличались высокой плотностью маршрутов и стабильно высоким (зачастую рекордным) грузооборотом. Это с одной стороны, обусловило потребность в автоматизации и цифровизации для более быстрой и точной обработки грузов, с другой стороны, сделало цифровизацию целесообразной и гарантировало ее окупаемость.

Начав с заимствования опыта и технологий других стран, Китай постепенно перешел к применению систем собственной разработки для создания интеллектуальных портов. Это обеспечило непрерывный доступ к технологиям даже в условиях геополитической нестабильности и позволило экспортировать собственные разработки в другие страны. Хотя порты (группы портов) применяют базовые технологии вроде 5G, Beidou, цифровых помощников на основе DeepSeek, каждый из них выделяет как минимум одно уникальное цифровое решение.

Цифровизация каждого отдельно взятого порта (группы портов) подчиняется и осуществляется в рамках национальной стратегии по цифровизации всей страны. Кроме того, всем вышеперечисленным портам отводится важная роль в стратегической инициативе «Один пояс - Один Путь». Данные факторы способствуют слаженности и скоординированности работы власти, портовых администраций и бизнеса. Здоровая конкуренция между китайскими портами за звание «эталона» интеллектуального порта стимулирует ускоренную разработку цифровых продуктов, координация власти и бизнеса способствует ускоренному внедрению этих продуктов в портово-логистические процессы. При этом цифровизация отдельного порта или группы портов не осуществляется обособленно, а увязывается с развитием прилегающих территорий и созданием «умных» городов и транспортной инфраструктуры - железнодорожной, автомобильной и т. д., что в конечном итоге обеспечивает связность территорий страны и их включение в единое цифровое пространство.

Список литературы:

1. Китай лидирует в мире по автоматизации морских портов // Жэньминь жибао. 07.01.2025. URL: <https://russian.people.com.cn/n3/2025/0107/c31518-20262905.html>
2. Семенова Н. К. На пути к углеродной нейтральности: «умные» порты и «зеленые» корабли Китая // Восточная аналитика. 2023. №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/na-puti-k-uglerodnoy-neytralnosti-umnye-porty-i-zelenye-korabli-kitaya>
3. Carol Yang. China's ports adopt DeepSeek AI model to streamline operations, protect data // South China Morning Post. 20.02.2025. URL: https://www.scmp.com/economy/china-economy/article/3299449/chinas-ports-adopt-deepseek-ai-model-streamline-operations-protect-data?module=top_story&pgtype=section
4. Chinese technologies power up intelligent port in South America// Hellenic Shipping News Worldwide. 02.01.2025. URL: <https://www.hellenicshippingnews.com/chinese-technologies-power-up-intelligent-port-in-south-america/>
5. Magic Ports Powered by Huawei 5G // Huawei Official Website. URL: <https://carrier.huawei.com/en/success-stories/Industries-5G/Wharfs>
6. Ningbo Zhoushan Port official website. URL: <https://www.nbport.com.cn/gfww/>
7. Ningbo-Zhoushan Record Highlights China's Growth // The Maritime Executive. 24.01.2018. URL: <https://maritime-executive.com/article/ningbo-zhoushan-record-highlights-china-s-growth>
8. Pablo Valerio. New Era of Automated Ports Led by China // EE Times. 06.25.2024. URL: <https://www.eetimes.com/new-era-of-automated-ports-led-by-china/>
9. Shanghai Port official website. URL: <https://en.portshanghai.com.cn/>
10. The first phase of the Luojing Container Port Area of the Shanghai International Shipping Center has been opened // China Institute of Navigation website. 13.10.2024. URL: https://www.cinnet.cn/en/news_e/9439-first-phase-luojing-container-port-area-shanghai-international-shipping-center-has-been-opened-and-old-dock-has-been-transformed-green-and-intelligent-port-area.htm
11. Takahiro Tsuchiya, Akinobu Ogawa. China's Smart Port Initiative in the Guangdong–Hong Kong–Macao Greater Bay Area. MPRA Paper 121687. URL: https://mpra.ub.uni-muenchen.de/121687/2/MPRA_paper_121687.pdf
12. The World's Busiest Shipping Port Just Got Smarter. Case study Shanghai International Port Group // CISCO. 2019. URL: https://www.cisco.com/c/dam/en_us/about/case-studies-customer-success-stories/port-of-shanghai-case-study.pdf
13. Tianjin Port announces 2018 results // Port News. 28.03.2019. URL: <https://en.portnews.ru/news/print/274544/>
14. Tianjin Port official website. URL: <https://www.ptacn.com/>
15. China's Tianjin Port sees record high container throughput in January // China Daily. 09.02.2024. URL: <https://www.chinadaily.com.cn/a/202402/09/WS65c58211a3104efcbdaea8bd.html>
16. 5G-ready Tianjin Port digitalises processes to build resiliency // Port Technology International. 7.11.2022. URL: <https://www.porttechnology.org/news/5g-ready-tianjin-port-digitalises-processes-to-build-resiliency/>

Поступила в редакцию 4 июля 2025 г.

Функции и технологические особенности южнокорейских портов на примере порта Пусан

Переславцев Николай Иванович, email: pereslavytsev@msun.ru

Морской государственный университет имени адмирала Г.И. Невельского, г. Владивосток

На примере крупнейшего южнокорейского порта Пусан автор рассматривает в статье особенности экономики портов Республики Корея. Еще в 1960-х гг. правительство в Сеуле осознало роль судостроения и судоремонта как важнейших источников пополнения бюджета, с учетом этого обеспечение эффективности функционирования портовой среды (port environment) стало задачей государственной важности, направленной на экономическое развитие народного хозяйства РК в целом. Эффективность, в свою очередь, достигается путем регулярного внедрения различных технологических решений и инноваций. Автор указывает на возможность использования на Дальнем Востоке опыта соседей по региону, и, с учетом этого, выделяет из южнокорейских инноваций те, которые в близком или отдаленном будущем могут быть внедрены в российских портах.

Ключевые слова: цифровизация, краны, портовые операции, Пусан, LTE технология, Владивосток, грузопоток, обработка грузов.

Functions and technological peculiar features of South Korean ports on the example of the port of Busan

Nikolai I. Pereslavytsev, email: pereslavytsev@msun.ru

Maritime State University named after Admiral G.I. Nevelskoi, Vladivostok

Using the largest South Korean port of Busan as an example the author analyzes the distinctive features of the port economy in this country. As early as the 1960s, the Seoul government recognized the significance of shipbuilding and ship repair as key contributors to budget revenues. Accordingly, improving the efficiency of the port infrastructure has become a national priority aimed at stimulating the overall economic development in the Republic of Korea. Efficiency, in its turn, is achieved through the regular implementations of various technological solutions and innovations. The author emphasizes the importance to learn from other countries' experience and suggests that some South Korean innovations could be adopted for the use in Russian ports.

Keywords: digitalization, cranes, port operations, Busan, LTE technology, Vladivostok, cargo flow, cargo handling.

Порты Республики Корея играют ключевую роль в экономике страны и в международной торговле. Старт их быстрого развития приходится на 1960-е гг. Государственная власть того времени определила судостроение, судоремонт и портовое хозяйство как основы для ро-

ста южнокорейской экономики в целом, начала вкладывать в отрасль значительные средства, чем определила стратегическую необходимость и широкие масштабы их модернизации с опорой на последние достижения научных технологий.

На сегодняшний день, каждый из крупнейших южнокорейских портов, по сути своей, это развитый логистический центр с современной инфраструктурой. В сочетании они не только обеспечивают стабильность внешнеторговых операций. Они также способствуют развитию инновационных технологий (прежде всего «автоматизации» и «цифровизации») в морской отрасли тем, что в своей работе нацелены на внедрение этих технологий в производственные процессы, что позволяет, одновременно с повышением эффективности портового хозяйства, гарантированно выявлять и исправлять слабые места инноваций, расширять их востребованность и воздействие. Внедрение автоматизированных систем управления грузопотоками, использование беспилотных транспортных средств и развитие информационных технологий – все это помогает повысить производительность и сократить время обработки грузов. Автоматизация и цифровизация процессов являются ключевыми факторами, поддерживающими высокую конкурентоспособность на мировой арене. Технологический прогресс также включает развитие интеллектуальных транспортных систем, которые обеспечивают более эффективное управление трафиком и логистикой. Применение искусственного интеллекта и больших данных для анализа и оптимизации грузовых операций позволяет оперативно реагировать на меняющиеся требования и условия рынка, обеспечивая высокий уровень обслуживания и оперативности.

Нижеперечисленные ключевые технологические решения, уже успешно применяемые в южнокорейских портах, можно рассмотреть для использования в российских портах на Дальнем Востоке [4].

а) *Автоматизированные системы управления грузопотоком – внедрение систем автоматического планирования, оптимизации и контроля погрузочно-разгрузочных работ;*

Включает в себя:

– Установка автоматических кранов, порталных и мобильных роботов. Таким образом повышаются скорость и безопасность операций;

– Использование автоматизированных транспортных средств (AGV – Automated Guided Vehicles) для перемещения грузов внутри порта;

– Использование систем управления складскими запасами и транспортными средствами.

б) *Автоматизированные системы навигации, позиционирования, наблюдения, управления судами;*

Включает в себя:

– Использование систем автоматического позиционирования, мониторинга и управления судами (AIS – Automatic Identification System), ECDIS (Electronic Chart Display and Information System) с целью повышения безопасности и эффективности.

в) *Внедрение технологий ATS (Applicant Tracking System – программное обеспечение для автоматизации подбора и найма сотрудников). Основная цель ATS — упростить и ускорить процесс подбора персонала, обеспечивая при этом высокое качество найма [5];*

Процессы, которые автоматизирует ATS:

* Публикация комплекта вакансий на нескольких площадках одновременно

* Сбор и хранение резюме в единой базе

- * Автоматическая сортировка и фильтрация кандидатов
- * Коммуникация (общение) с кандидатами в рамках системы
- * Формирование аналитических отчетов

г) *Интеллектуальные системы логистики и отслеживания грузов* – внедрение IoT устройств (IoT, Internet of Things — объединение физических устройств с доступом к Интернету, которые без участия человека собирают, анализируют данные и обмениваются ими между собой) [6];

д) *Автоматизированные системы безопасности и видеонаблюдения*

Включает в себя:

- Расстановка камер с аналитикой и системами контроля доступа

е) *Автоматизация таможенного оформления документов и сертификации грузов путем взаимодействия с таможенными службами*

Включает в себя:

- Внедрение платформ для электронного обмена документами

ж) *задействование аналитической службы на базе современных интегрированных платформ для анализа данных и прогнозирования загрузки*

Включает в себя:

- Использование масс данных и машинного обучения персонала для оптимизации грузовых операций

з) *Экологическая автоматизация*

Включает в себя:

- внедрение систем мониторинга выбросов и автоматического управления экологическими аспектами. Эти решения позволяют повысить эффективность и безопасность портовых операций, снизить издержки и время обработки грузов.

В качестве примера рассмотрим крупнейший в Южной Корее порт Пусан.



Рис. 1 Порт Пусан на карте

Пусан

Порт Пусан доступен для судов водоизмещением до 50 000 тыс. т, длиной до 330 м и осадкой до 15 м. Длина причального фронта — более 10 км; во внутренней гавани организовано 10 якорных стоянок, во внешней — 17. Общее количество причалов – более 40, включая глубоководные (17). Одновременно может быть принято до 90 судов, включая ультракрупные контейнеровозы.

В порту имеется система радиолокационной проводки судов, межтерминальных перевозок между районами порта, сеть по переработке вторичных ресурсов (современные устройства, автоматически сортирующие и очищающие ПЭТ-пластик). Среди современного оборудования, используемого для вторичной переработки пластика, а также других твердых материалов (металла, древесины и др.), активно используются гидравлические прессы, shreddеры, экструдеры, грануляторы и другая техника.



Рис. 2. Общая панорама одного из районов порта Пусан

Порт располагает передовыми современными технологиями, системой слежения, складирования, перемещения, прибытия и отправки грузов (система безопасности и контроля U-порт). Данная система применяется в портах для более четкой организации и проведения работ. Непосредственная связь осуществляется при помощи информационных и телекоммуникационных технологий, включая RFID (Radio-Frequency Identification), GPS (Global Position System) и USN (Ubiquitous Sensor Network).

Имеются также следующие инновационные решения:

- *Электронно-навигационные приборы.* Позволяют операторам отслеживать дрейф судна, его скорость и направление и заранее предупреждать судно об опасности.
- *Компьютерные программы,* разработанные специально для порта Пусан, для швартовных операций с судами разного размера и водоизмещения.
- *Система оповещения о чрезвычайных ситуациях.* Использует технологию LTE для автоматической передачи местоположения тех, кто столкнулся с чрезвычайными ситуациями. Например, если человек падает в воду, система срабатывает от открытия спасательного жилета и отправляет уведомление на наземную базу на расстоянии до 100 км.
- *Технология мониторинга безопасности укладки контейнеров.* Использует интеллектуальные камеры видеонаблюдения и лидарные датчики для записи угла наклона верх-

них и нижних контейнеров. Методы искусственного интеллекта, такие как глубокое обучение, используются для автоматической классификации и уведомления о состоянии безопасности: нормальном (зелёном), опасном (жёлтом) и очень опасном (красном).

Годовой грузооборот — 450 млн тонн (нефть, нефтепродукты, уголь, стройматериалы (цемент, песок), контейнеры, зерно, металлолом, железная руда). Логистический «хаб» (40% морского грузооборота РК), контейнерные перевозки (80%), генеральные, «ро-ро», сыпучие, накатные грузы. На 2023 г. - 22,75 млн. TEU. Ближайшая цель - 30 млн. TEU.

Порт состоит из семи районов. Район № 1 расположен в Северной внутренней гавани, районы № 2 и 3 — в Северной внешней гавани, район № 4 — в Южной внешней гавани, район № 5 — в бухте Камнэпхо, район № 6 — в бухте — Тадэпхо, а район № 7 — в западной части бухты Суёнман [11]. Районы также различаются по названиям.

Северный порт (Северная гавань) – пассажирский трафик (здесь находится Морской вокзал), контейнерные и генеральные грузы;

Южный порт – пропускает через себя 30% общей добычи морепродуктов в стране, а также сыпучие грузы (уголь, зерно, железная руда). 1 млн. т. морепродуктов год. В порту огромный рыбный рынок, продается 250-350 т. рыбы в день [11].

Камчхон – используется при необходимости наличия добавочных обрабатывающих мощностей при больших объемах. Дополняет основные функции Северного порта. Обслуживание судов океанического рыболовства, перевалка цемента, судоремонт. Зерновой терминал со 104 элеваторами более чем на 100 тыс. т. зерна, находится на причале №5. Одновременно может обслуживать 1 судно. Основной ассортимент — пшеница и кукуруза из США, Канады и Австралии (т. е. продовольственный импорт)

Тадэпхо – прибрежные перевозки и рыболовство грузовые операции меньшего объема;

Новый порт (Busan Newport). Оборудован для обработки крупных контейнеровозов, включая суда вместимостью до 20,000 TEU. Имеет для этого современный контейнерный терминал с автоматизированным оборудованием (включая AGV-роботов), открытый в 2024 г. AGV – роботы, мобильные устройства, применяемые в качестве горизонтального пространства для перемещения грузов, оснащенные системой ориентирования в пространстве. Ожидается, что автоматизированная передача грузов с судов (для этого применяются *дистанционно управляемые краны собственного производства*) повысит производительность порта на 20% по сравнению с другими терминалами и значительно снизит риск инцидентов, связанных с безопасностью [11].

Возможности *дистанционно управляемого оборудования (краны)* разрабатываются, в частности, при поддержке компании LG U+ (сетевой мобильный оператор, входит в корпорацию LG).

Компания LG U+ установила систему дистанционного управления кранами в порту Пусана и нацелена на коммерциализацию сетевых решений 5G для автоматизированного управления инфраструктурой морского порта. Видеосигналы высокого разрешения с датчиков и камер на кране передаются в диспетчерскую через сеть 5G. Принимает сигналы оператор, которые с их помощью задействует систему управления. Решение позволяет дистанционно управлять кранами для загрузки и разгрузки контейнеров с грузовых судов, наблюдая за экранами из диспетчерской в другом месте порта.

Также компания LG U+ в настоящее время установила станции сети 5G в порту Пусана для удаленного управления кранами. Компания пояснила, что сеть 5G необходима для снижения задержки до низкого уровня и для того, чтобы операторы могли отслеживать и контро-

лизовать работу крана в режиме реального времени. Компания заявила, что эта технология может также повысить эффективность работы. В то время как для управления одним краном требовалось задействовать от четырех до пяти рабочих, новое решение телекоммуникационной компании позволяет одному оператору контролировать сразу четыре крана из диспетчерской. Эта технология также может снизить риски безопасности и затраты крановщиков, которые работают в кабине наверху каждого крана, что приводит к высоким затратам на рабочую силу и страховым взносам. Дистанционное управление крана на базе 5G сокращает время, необходимое рабочим, чтобы привыкнуть к управлению кранами. В LG U+ заявили, что для того, чтобы работник мог управлять кранами из удаленного офиса, требуется всего месяц обучения, тогда как раньше работникам могло потребоваться три года, чтобы полностью привыкнуть к своей работе. LG U+ заявила, что продолжит инвестировать в развертывание других решений, которые позволят автоматизировать портовую инфраструктуру, включая беспилотные терминальные тракторы (портовые тягачи), беспилотные вилочные погрузчики и дроны, которые контролируют перемещение груза в порту [10].

Все районы Пусанского порта в комплексе являются компонентами Свободной экономической зоны «Пусан-Чинхэ», Помимо собственно портовой инфраструктуры СЭЗ «Пусан-Чинхэ», как и другие аналогичные локации в РК, предусматривают включение в свои пределы индустриального производственного комплекса, научно-промышленного комплекса, морского центра логистики, научного центра развития и бизнес-центра. Каждый из этих элементов вносит свой вклад в эффективную экономическую деятельность регионального «узла» и народного хозяйства РК в целом.

В связи со всем вышеизложенным, вплоть до начала 2020-х гг. Пусан привлекал многих российских капитанов и судовладельцев.

Преимущества Пусана по сравнению с Владивостоком.

– Более выгодные условия для оптового сбыта улова, бункеровки, ремонта. Хотя портовые сборы в Южной Корее выше, разница в цене компенсировалась экономией времени: суда обрабатывались быстрее и простаивали в порту гораздо меньше, чем в России: в порту слаженно работают все структуры. Так, было подсчитано (данные 2020 г.) , что среднее общее время на приход и отход судна в России - 80 часов, в Пусане - 30. Бункеровка судна в российских дальневосточных портах - в среднем 6 часов, в Пусане — 4. [2;11]

– Наличие в Пусане высокоавтоматизированного оборудования, например холодильников для рыбы большого объема, в которых рыба, к тому же, была рассортирована по 12 наименованиям. У каждого холодильника своя служба маркетинга: рыбаку сразу предлагали готовые варианты для сбыта продукции.

Далее, в связи с последовавшими затем объективными обстоятельствами ситуация несколько изменилась и требует отдельного исследования и анализа.

Ситуация по другим южнокорейским портам – Инчхон, Ульсан, Кваньян, Тонхэ и т.д. может различаться в деталях, в зависимости от их специализации. Однако, общие с Пусаном черты и характеристики в любом случае присутствуют [9].

А. Технологическая оснащенность и высокие стандарты обслуживания

- контейнерные терминалы с возможностью обработки судов любого размера;
- мультимодальные перевозки, с быстрой перегрузкой с морского транспорта на железные дороги и автотранспорт;
- современные краны STS (краны-перегрузчики на контейнерных терминалах), авто-

материзованные складские системы, и цифровые технологии управления грузопотоком.

Б. Объем грузопотока

Специализированные сервисы позволяют эффективно управлять логистическими цепочками, минимизируя время стоянки. При этом активно используются технологии AIS (автоматической идентификационной системы) для мониторинга движения судов и координации операций

В. Услуги и инфраструктура

- терминальная обработка грузов;
- таможенные процедуры и складские услуги;
- услуги по фрахту судов и организации мультимодальных перевозок;
- специализированные терминалы для химической продукции, нефти и газа.

В целом, мы имеем вне-конкурентную скорость обработки грузов, благодаря автоматизации, а также минимальный риск простоев за счет высоких стандартов логистики.

Список литературы:

1. Цифровизация процесса перевозок по Севморпути – Морские вести России, URL: <https://morvesti.ru/themes/1698/105322/>
2. И.В. Павлова. Пусан: морские ворота Южной Кореи, URL: https://geo.1sept.ru/view_article.php?ID=200902314
3. Sea freight in Busan port, URL: <https://logisticiran.comen/blog/show/109/sea-freight-in-busan-port>
4. Как технологические инновации революционизируют операции в морских портах и логистике, URL: <https://portsinfo.ru/ports-news/innovatsii/170811-kak-tekhnologicheskie-innovatsii-revoljutsioniziruyut-operacii-v-morskikh-portakh-i-logistike>
5. ATS (Applicant Tracking System): что это и как работает, URL: <https://sky.pro/wiki/profession/ats-applicant-tracking-system-cto-eto-i-kak-rabotaet/>
6. Интернет вещей: как умные устройства меняют наш быт, URL: <https://skillbox.ru/media/code/internet-veschey-kak-umnye-ustroystva-menyayut-nash-byt/>
7. Запуск «сухого порта» в Приморье» состоится на Восточном экономическом форуме, 23.05.2026, URL: <https://primamedia.ru/news/hashtag/2194/>
8. Порт Пусан, Южная Корея, 01.01.2024, Kruiz.ru – веб-портал, URL: <https://kruiz.ru/blog/kruizu/port-pusan-yuzhnaya-koreya/>
9. Логистика и инфраструктура портов Южной Кореи: карта и возможности, 2024, URL: <https://portsinfo.ru/porty-yuzhnoj-korei>
10. LG U+ запускает решения на базе 5G для морских портов, 02.05.2021, URL: <https://dzen.ru/a/YI55cP4QbVkiidwO>
11. Пусан: морские ворота Южной Кореи, URL: https://studwood.net/710357/ekonomika/rajonu_porta_pusan

Поступила в редакцию 3 июля 2025 г.

**ВЕСТНИК
МОРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА**

Выпуск 99/ 2025

Дата выхода в свет – 14 июля 2025 г.

Выходит четыре раза в год.

Зарегистрировано Федеральной службой по надзору
в сфере связи и массовых коммуникаций.
Свидетельство о регистрации Эл № ФС77-82589 от 30.12.2021.

Учредитель и издатель – Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования «Морской государственный университет
имени адмирала Г.И. Невельского».

Адрес учредителя, издателя и редакции: 690003, Россия, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50а.
Электронная почта редакции: vestnik@msun.ru; телефон редакции: +7 (423) 251-76-36.