

ВЕСТНИК

**МОРСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО
УНИВЕРСИТЕТА**

Выпуск 90 / 2023

В38 Вестник Морского государственного университета. Вып. 90 / 2023 / Морской государственный университет им. адм. Г. И. Невельского. — Владивосток: Мор. гос. ун-т, 2023. — 72 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 судоходства 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.

УДК 656.61(06)

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

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

Научный редактор – Лентарев Александр Андреевич, доктор технических наук, доцент.

Выпускающий редактор – Сикорская Оксана Геннадьевна, начальник отдела электронных изданий.

Ответственный секретарь – Косяченко Оксана Викторовна, аналитик управления научно-исследовательской и инновационной деятельности.

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.

СОДЕРЖАНИЕ

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА, ВОДНЫЕ ПУТИ СООБЩЕНИЯ И ГИДРОГРАФИЯ

Вороненко А. А., Вороненко А. К., Смирнов С. М. Современные тенденции развития технологий портовой логистики	4
Черняева С. Н. Разработка алгоритма контурного анализа для определения границ морских объектов	11
Царик Р. С., Григорьев В. Е., Муляр В. В. Количественная оценка дистанции чрезмерного сближения при расхождении судов	17

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ

Пастухов С. В. Обзор эволюции обучающего оборудования как устройств, моделирующих работу сложных инженерных систем.....	23
Рак А. Н. Особенности устройства трехфазных сетей на морских судах зарубежной постройки.....	35
Рак А. Н. О перспективах развития судовых гребных электрических установок.....	45

ЛОГИСТИЧЕСКИЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ

Салюк А. А., Лазарев В. А. Сравнительная оценка эффективности ричстакера и крана RTG при работе со штабелем контейнеров	58
Терентьева Л. В. О проблемах перевалки экспортного угля в морских портах Приморья	66

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА, ВОДНЫЕ ПУТИ СООБЩЕНИЯ И ГИДРОГРАФИЯ

УДК 656.073.235

Современные тенденции развития технологий портовой логистики

Вороненко Антон Александрович, аспирант, avoronenko@gmail.com
Вороненко Анна Константиновна, аналитик НОЦ морского транспорта
и пространственной логистики, voronenko@msun.ru
Смирнов Сергей Маратович, канд. техн. наук, старший научный сотрудник
научной лаборатории пространственной логистики, ssmirnov@msun.ru

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

В статье проведен анализ современных способов, методов и технологий, применяемых и внедряемых в последние годы на ведущих морских терминалах мира. Особое внимание уделяется тенденциям в области профилирования морских терминалов, наращиванию контейнерооборота в портах, применению экологически чистых видов топлива для портовой техники и возобновляемых источников энергии на портовых терминалах, цифровизации и переходу на использование автономных транспортных средств. Не все технологии, относящиеся к «Индустрии 4.0», сегодня доступны для внедрения в российских портах, однако следует понимать, что постепенное планомерное движение в данном направлении является ключом к успеху в развитии и повышении конкурентоспособности морских портов РФ.

Ключевые слова: порт, технология грузовых работ, контейнеры, транспортная логистика, цифровизация, зеленые технологии, контейнеры, контейнерный терминал, безлюдные технологии, автоматизация.

Modern Trends in Seaport Logistics Technologies

Voronenko Anton, avoronenko@gmail.com
Voronenko Anna, voronenko@msun.ru
Smirnov Sergei, ssmirnov@msun.ru

MSU named after adm. G.I. Nevelskoy, Vladivostok

The article analyzes modern methods and technologies implemented in recent years at the world's key seaport terminals. Particular attention is paid to trends in the field of profiling marine terminals, increasing container turnover in seaports, the use of environmentally friendly fuels for port equipment and renewable energy sources at port terminals, digitalization and the transition to the use of autonomous vehicles. Not all of the 4IR technologies are currently available for implementation in Russian ports. However, a gradual systematic progress in this field is the key to success in developing and increasing the competitiveness of Russian seaports.

Key words: seaport, cargo handling technology, containers, transport logistics, digitalization, green technologies, container terminal, manless technologies, automation.

Введение

Современные технологии, используемые в морских портах, значительным образом влияют на сроки и качество транспортировки, как в транспортных цепочках отдельных грузов, так и в работе всей транспортной системы в целом, поскольку связь и совместная работа с другими видами транспорта является неотъемлемой частью процесса.

Среди ключевых современных тенденций можно отметить следующие направления в портовой логистике:

- изменяющиеся алгоритмы перевозок и структура транспортного флота особенно заметно оказывают влияние на наращивание и диверсификацию портовых мощностей в России и развивающихся странах;
- продолжающееся изменение технологий работы с грузами с целью интенсификации работ и внедрения «безлюдных» технологий: автоматизация, роботизация и др.;
- общая «экологизация» как отрасли в целом, так и портов – использование техники, работающей на альтернативных видах топлива, электрических механизмов, техники и технологий, снижающих влияние на окружающую среду непосредственно от обрабатываемых грузов;
- цифровизация, повсеместное использование электронных документов [1];
- организация противоэпидемических мероприятий (с учетом опыта работы отрасли в условиях пандемии COVID-19), снижение уровня взаимодействия человека с непосредственно товарами и грузами при транспортировке.

В данной работе приведен краткий обзор указанных направлений.

Наращивание и диверсификация портовых мощностей

Традиционные портовые услуги – это, в первую очередь, услуги портовой перевалки, а также сопутствующие услуги. Безусловно, с ростом мировой торговли, смещением основных точек происхождения и поглощения грузовой базы, меняются точки роста портовых мощностей.

90 % всех товаров и грузов в мире перевозятся по морю. Существуют тысячи логистических маршрутов, по которым грузовые суда курсируют между 800 портами, расположенными на всех обитаемых континентах. Из них около 50 портов являются хабами.

Из 49 крупнейших контейнерных портов мира 33 порта расположены на побережье Восточно-Китайского моря, причем половина из них принадлежит Китайской Народной Республике. Таким образом, торговый рынок Восточной Азии является доминирующим, несмотря на то что Европа и Ближний Восток географически и исторически являются наиболее интенсивными торговыми маршрутами. Это неудивительно, поскольку в последнее десятилетие Китай превратился в экономического гиганта с самой мощной производственной базой. Что касается объемов, то в год через контейнерные порты проходит более 34 миллионов контейнеров различных размеров, перевозящих миллиарды тонн ценных грузов [2].

Крупнейшие порты мира и краткий анализ их работы в мировой транспортной системе представлены в работе [3] на базе международного обзора ЮНКТАД¹.

Рост контейнерооборота в странах АТР, судя по публикуемым новостям, не останавливается. Предполагается расширение и строительство как контейнерных, так и сырьевых (нефть, СПГ, аммиак, метанол и др.) портовых терминалов. Так, проект создания терминала по импорту СПГ в Ниихама был оформлен в 2018 г. и запущен в 2021 г. Терминал находится на территории завода Sumitomo Chemical в Эхимэ, западная Япония [4]. Другой пример – порт

¹ Конференция ООН по торговле и развитию (ЮНКТАД) является ключевым органом Генеральной Ассамблеи по вопросам в области торговли и развития. Ей поручено ускорение торгового и экономического развития, в особенности развивающихся стран. ЮНКТАД играет в системе ООН роль координационного центра по проблемам развития и смежным вопросам торговли, финансов, технологий, инвестиций и устойчивого развития. Ее главная цель состоит в содействии интегрированию развивающихся стран и стран с переходной экономикой в мировую экономику и развитию посредством торговли и инвестиций. Добиваясь достижения своих целей, ЮНКТАД проводит исследования и анализ политики, межправительственные совещания, осуществляет техническое сотрудничество и взаимодействие с гражданским обществом и предпринимательским сектором. Источник: <https://www.un.org/ru/ga/unctad/>

Шэньчжэнь – планирует выйти на уровень 33 млн TEU к 2025 г. Приоритетными направлениями развития контейнерооборота в порту Шэньчжэнь будут портовые районы Яньтянь, Наньшань и бухта Дачань. В частности, будут расширен контейнерный терминал в Восточном районе Яньтянь, введена вторая очередь терминала в бухте Дачань и реализован проект судоходного фарватера в западном районе порта Шэньчжэня [5].

В России с ростом международной торговли увеличивается грузооборот портов в разных регионах. Пятерка крупнейших портов по итогам 2021 года: Мурманск с показателем в 54,54 млн тонн (-3 % к объему 2020 г.), Большой порт Санкт-Петербург с результатом в 62,03 млн тонн за год (+3,6 %), порт Восточный, переваливший 77,69 млн тонн (+0,4 %), порт Усть-Луга с оборотом 109,22 млн тонн (+6,5 %) и порт Новороссийск, где в 2021 г. обработали 142,78 млн тонн грузов (+0,7 %). Доля перевалки в этих пяти портах составила 17 % совокупного грузооборота морских портов России [6].

Изменение технологий работы с грузами с целью интенсификации работ и внедрения «безлюдных» технологий

ЮНКТАД в своих отчетах акцентирует внимание на процессе глобализации, где порты выступают драйверами, а распространение цифровых технологий – одним из способов достижения конечного успеха [3].

Примером использования беспилотных (безлюдных, автономных и др.) технологий может послужить недавний эксперимент с началом эксплуатации беспилотных тягачей в порту Тяньзинь. Демонстрационная зона для эксперимента по началу беспилотного автомобильного движения будет создана в порту в кратчайшее время. По сообщению администрации порта Тяньзинь, будет использовано 50 автономных автомобилей, разработаны унифицированные процедуры безопасности и созданы единая диспетчерская и платформа управления движением. Постепенно демонстрационная зона выйдет на коммерчески рентабельный полностью автоматизированный транспортно-логистический режим функционирования.

Переход к массовому использованию беспилотных транспортных средств в порту стал возможным благодаря накопленному опыту работы с технологиями 4IR («Индустрии 4.0»). Так, в октябре 2020 г. в порту Тяньзинь завершилась модернизация системы управления контейнерным терминалом, которая стала полностью автоматизированной на базе «Интернета вещей», технологий 5G и искусственного интеллекта [7].

Беспилотные технологии также запускают порты Антверпен, Гамбург и другие. Порт Антверпена расширяет испытания автономных беспилотных летательных аппаратов для мониторинга деятельности и поддержания безопасности на всей территории портового комплекса [8].

В 2018 г. компания Hamburger Hafen und Logistik AG (HHLA) запустила в порту Гамбурга систему перевозки контейнеров на полностью беспилотных электрических автомобилях – контейнеровозах Konescranes Gottwald AGV Li-Ion. Контейнеровоз весом 26,5 тонн получает энергию от литий-ионной аккумуляторной батареи.

Консольные краны, установленные на терминале Maasvlakte II в Роттердаме (Нидерланды), с 2015 г. работают в полностью беспилотном режиме. Все подъемно-транспортное оборудование терминала работает на электричестве, что позволяет компании АРМ Terminal добиться высокой производительности оборудования и экономического эффекта от его использования, обеспечить более высокий уровень безопасности и нулевое количество выбросов углекислого газа в атмосферу при работе терминального оборудования.

В порту Брисбен (Австралия) в течение нескольких лет эксплуатируются беспилотные бесконсольные контейнерные краны на пневмоходу, произведенные специально для данного проекта компанией Kalmar.

Существуют также реализованные проекты Kalmar в портовых терминалах London Gateway (Великобритания), TraPac (США), Malta Freeport (Мальта), а также реализованный проект на железнодорожном контейнерном и мультимодальном терминале ÖBB Container Terminal Wels (Австрия) [9].

Общая «экологизация» портов и портовой логистики

Одним из самых популярных трендов текущего десятилетия является повышение экологической ориентированности на всех видах транспорта и общий тренд на внимательное отношение к окружающей среде. Для этого применяются различные меры, в первую очередь – закупка нового или модернизация существующего портового оборудования для сокращения или полного прекращения вредных выбросов в окружающую воздушную и морскую среду. Вторым ключевым трендом является использование в портах альтернативных видов энергии.

Так, портовая группа Тяньцзинь (КНР) планирует построить первый в мире терминал с нулевым карбоновым выбросом на основе технологий искусственного интеллекта. Чтобы достичь этой цели, терминал С в порту Тяньцзинь будет оснащен экологичным энергопитанием на основе комбинации ветровой и солнечной электрогенерации и интегрированной системы накопления энергии. Об этих планах Группа сообщила во время конференции Green and Safe Port Conference – 2021, организованной Ассоциацией портов и гаваней Китая.

Все перегрузочные устройства, наземные транспортные средства и вспомогательное оборудование на терминале будут работать от электричества. Здесь также будет применена усовершенствованная система мониторинга энергопотребления, работающая в реальном масштабе времени, чтобы полностью исключить выбросы CO₂. В итоге общее энергопотребление на терминале сократится на 17 %. На первом этапе реализации проекта планируется установить на терминале две ветрогенерирующие турбины и смонтировать солнечные панели на крыше технического здания. В следующем году по мере наращивания пропускной способности терминала еще две ветрогенерирующие турбины будут установлены и подключены к системе «зеленого» электропитания [10].

Другим примером является терминал Такома (США), где планируется ввод в строй полностью электрифицированное оборудование (Южный интермодальный терминал). Он станет первым объектом Северо-Западного альянса морских портов, в котором будет применяться исключительно электрифицированное оборудование для перевалки грузов [11].

Японские компании также проводят исследования по использованию оборудования на водородном топливе: компания Mitsui O.S.K. Lines, Ltd. (MOL) приобретает крановую технику для работы в порту Кобэ – Near Zero Emission Transtainer RTG crane (NZE RTG) [12].

В России основные аспекты в области экологии рассматриваются прежде всего применительно к работе угольных терминалов. С ростом экспорта угля по разным направлениям и в том числе через порты ДВ РФ, с учетом особенностей исторического развития ведущих портов в непосредственной близости к жилым кварталам городов, остро встают вопросы пылеподавления. К сожалению, в текущих условиях лишь часть портов, например, терминал ЗАО «Дальтрансуголь» в Восточном порту или специализированный морской порт Посъет, увеличивают «степень покрытия поверхностей пыления угля», параллельно используя и внедряя современную технику пылеподавления. Остальные терминалы предпочитают оплачивать штрафы за вред экологии, но не вкладываться в современное дорогостоящее перевалочное оборудование. Безусловно, барьером к развитию в этом направлении является отсутствие жесткой законодательной базы и системы штрафов, сопоставимых с прибылями экспортеров угля.

Цифровизация, повсеместное использование электронных документов

Среди наиболее заметных разработок последнего времени можно отметить платформу TradeLens – это глобальная цифровая торговая платформа, находящаяся в совместном владении IBM и A.P. Moller-Maersk A/S в лице его дочернего предприятия Maersk GTD Inc. Maersk GTD Inc. является подрядчиком IBM в отношении предоставления ресурсов для облачных сервисов и управления ими [13].

По состоянию на октябрь 2022 г. участниками системы, по данным Maersk, являлись более 300 организаций, в том числе более 10 морских судоходных линий. TradeLens аккумулирует данные по событиям в цепочках поставок через более чем 600 портов и терминалов. На тот момент в системе было отслежено свыше 35 млн перевозок, почти 2 млрд событий и около 16 млн документов. С 2021 г. платформа работала и в Китае [14].

Однако 30.11.2022 консорциум TradeLens объявил о прекращении поддержки платформы к концу первого квартала 2023 г. Неудача проекта TradeLens объясняется недоверием между игроками на рынке грузоперевозок, особенно когда речь идет об обмене данными, многие из которых считаются конфиденциальными [15]. Аналитики, тем не менее, считают, что приложения на основе блокчейна не утратили актуальности. Базирующаяся в Гонконге сеть Global Shipping Business Network, поддерживаемая перевозчиками COSCO и Hapag-Lloyd, а также портовыми операторами Hutchison Ports, SPG Qingdao Port, PSA International и Шанхайской международной портовой группой, стала крупнейшим игроком на этом рынке.

Одним из перспективных направлений в этой области является мегапроект «Умный порт» – полностью автоматизированный морской порт, где используются технологии искусственного интеллекта (AI), больших данных (big data), блокчейн (blockchain), интернет вещей (IoT). Объединенные в рамках централизованной системы, они помогают осуществлять мониторинг, сбор и анализ данных, оптимизацию процессов, оперативное принятие решений. Благодаря этому повышается производительность, безопасность и экологичность портовых операций. Такие технологические решения сводят к минимуму возможные ошибки из-за человеческого фактора. Первые полноценные «умные порты» уже действуют в Китае. Один из них – контейнерный терминал Ocean Gate в Сямыне, который вмещает до 200 тыс. т грузов. Это первый полностью автоматизированный портовый терминал, оснащенный системой связи и обмена информацией 5G. В ближайшем будущем регистрация иностранных судов тоже будет происходить автоматически, в режиме онлайн. Второй «умный» порт находится в городе Шэньчжэнь. Следующим станет порт в Гуанчжоу. К 2025 году там планируют создать единую интеллектуальную систему, связывающую все морские порты страны. Грузы в порту будут перевозиться при помощи беспилотных автомобилей – контейнеровозов [16].

В России одним из первых подобные технологии внедряет ПАО «ВМТП». В 2020 г. стивидор интегрировал свою информационную систему в работу контейнерного терминала, внедрив электронную обработку документов непосредственно на причалах. Благодаря активному использованию программного продукта «CFS-Склад» стала возможной работа с грузами небольших объемов [16, 17].

Прочие технологии 4IR пока для России остаются в основном виртуальными.

Организации противоэпидемических (постпандемийных) мероприятий, снижение уровня взаимодействия человека с непосредственно товарами и грузами при транспортировке

Столкновение с новой реальностью на фоне последствий COVID-19 заставило инженеров и разработчиков скоординировать свои усилия, а транспортные предприятия – начать внедрять как можно скорее перспективные разработки для более четкого соблюдения карантинных мер. Конечно, вопросы бесконтактной доставки, беспилотное такси или другие нововведения кажутся не совсем актуальными в контексте портовой логистики, если не взглянуть на каждый сегмент отдельно.

Кроме массовых партий грузов, таких как уголь, лес, нефть и подобное, часто основной грузовую базу могут составлять товарные партии, формируемые на припортовых, в том числе промышленных зонах, сбой в работе которых могут также задерживать продвижение товара по цепочкам поставок. В этом контексте технология полностью автоматизированного склада становится чрезвычайно актуальной для формирования и упаковки партий грузов, почтовых отправок, партий LCL [18].

Заключение

В работе приведена краткая характеристика ключевых, по мнению авторов, тенденций в области портовой логистики, с акцентом в первую очередь на их доступность и применимость в портовой индустрии России. Перечисленный перечень не является исчерпывающим.

Потенциальными объектами исследования по применению новых технологий являются также системы СУДС, эксплуатация подводных и подземных хранилищ различных «зеленых» видов топлива, новые системы бункеровки и автоматической швартовки и многое другое.

Как указывается в [1], в эпоху «Индустрии 4.0» происходит постоянное внедрение и апробация новых методов и технологий из других областей, таких как использование современных электронных технологий, 3D-печати, IoT еще кажутся не слишком применимыми в области деятельности портов. Не так давно казалось, что и технология блокчейн не слишком применима к данной отрасли, однако кейс Tradelens, пусть даже и не вполне удачный, говорит об обратном. Безусловно, эти процессы можно будет наблюдать и в будущем.

Список литературы:

1. Pustokhina I. Modern Trends in Logistics Development (Современные тенденции развития логистики) // Russian Journal of Entrepreneurship. – 18(3):339, February 2017 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/313792717_Sovremennye_tendencii_razvitiia_logistiki (дата обращения: 25.09.2022).
2. Топ 49 самых крупных и загруженных контейнерных портов в 2022 году (*World Biggest and Most Busy Seaports: Top 49 in 2022*) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://moverdb.com/ru/top-49-container-ports/> (дата обращения: 25.09.2022).
3. Перспективы развития морских портов (*Prospects for Seaport Development*) // Морские вести России [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.morvesti.ru/anali-tika/1688/89829/> (дата обращения: 25.09.2022).
4. Japanese Niihama LNG terminal starts ops in March (*Терминал СПГ Ниихама в Японии начинает работу в марте*) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.offshore-energy.biz/japanese-niihama-lng-terminal-starts-ops-in%02march/?utm_source=offshore-energy&utm_medium=email&utm_campaign=newslet%02ter_2022-03-04 (дата обращения: 25.01.2022).
5. Shenzhen aims for 33m teu container volume by 2025 (*Шэньчжэнь поставил целью переработать 33 млн контейнеров в 2025 г.*) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.seatrade-maritime.com/ports-logistics/shenzhen-aims-33m-teu-container-volume-2025/> (дата обращения: 25.01.2022).
6. Топ-5 портов-лидеров грузооборота в России (*Top Five Russian Seaports - Leaders in Cargo Turnover*) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.morvesti.ru/news/1679/93578/> (дата обращения: 25.09.2022).
7. Autonomous driving to be introduced in Tianjin Port (*Беспилотное автомобильное движение появится в порту Тяньцзинь*) // CHINA.ORG, 19.12.2020 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.china.org.cn/business/2020-12/19/content_77029512.htm (дата обращения: 25.01.2022).
8. Антверпен тестирует автономные беспилотные летательные аппараты для мониторинга и обеспечения безопасности портов (*Antwerp Tests Drones for Monitoring and Port Security*) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://vk.com/@trans.unmanned-antwerpen-testiruet-avtonomnye-bespilotnye-letatelnye-appara> (дата обращения: 25.09.2022).
9. Беспилотные технологии (*Manless Technologies*) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://mintrans.org/ru/o-nih/tehnologii/bespilotnye-tehnologii/> (дата обращения: 25.09.2022).
10. Tianjin Port Group to Build World-First AI Emission-Free Terminal (*В порту Тяньцзинь построят первый в мире управляемый искусственным интеллектом терминал, не загрязняющий окружающую среду*). [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.porttechnology.org/news/tianjin-port-group-to-build-world-first-ai-emissionfree-terminal> (дата обращения: 25.09.2022).
11. First All-Electric Cargo Equipment implemented at Tacoma's South Intermodal Yard (*Терминал South Intermodal в порту Такома оснащен полностью электрифицированным портovým оборудованием*) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.porttechnology.org/news/first-all-electric-cargo-equipment-implemented-at-tacomass-south-intermodal-yard> (дата обращения: 25.01.2022).
12. MOL Group and MITSUI E&S Machinery to commerce Joint study to introduce hydrogen fuel port cargo handling machinery (*MOL и MITSUI E&S Machinery изучают возможность*

- внедрения грузоперерабатывающего оборудования, работающего на водородном топливе) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.mol.co.jp/en/pr/2021/21038.html>, https://www.mes.co.jp/press/2021/0215_001565.html, <https://seanews.ru/2021/05/14/ru-mol-vnedrjaet-rtg-na-vodorode> (дата обращения: 25.01.2022).
13. Описание Услуги TradeLens (*TradeLense Service Description*) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www-40.ibm.com/software/sla/sladb.nsf/8bd55c6b9fa8039c86256c6800578854/52a484b0bec48fe786258360005d5d5c/\\$FILE/i126-8178-02_12-2018_ru_RU.pdf](https://www-40.ibm.com/software/sla/sladb.nsf/8bd55c6b9fa8039c86256c6800578854/52a484b0bec48fe786258360005d5d5c/$FILE/i126-8178-02_12-2018_ru_RU.pdf) (дата обращения: 25.09.2022).
 14. TradeLens будет работать в Китае (*TradeLens Will Operate in China*) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://seanews.ru/2021/05/12/ru-tradelens-budet-rabotat-v-kitae/> (дата обращения: 25.09.2022).
 15. Maersk and IBM прекращают поддержку блокчейн-платформы TradeLens (*Maersk and IBM Abandon Blockchain TradeLens Platform*) // THE MARITIME EXECUTIVE, 30.11.2022 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://maritime-executive.com/article/maersk-and-ibm-abandon-blockchain-tradelens-platform> (дата обращения: 02.12.2022).
 16. Как устроен «умный» порт и когда он появится в России (*How the Smart Port Works and When It Will Appear in Russia*) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://trends.rbc.ru/trends/industry/61fb933e9a794754d972873b> (дата обращения: 25.09.2022).
 17. Итоги года: ВМТП выдвигается на лидирующие позиции в России (*Yearly Results: VMCP Elevates to Top Position in Russia*) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://primamedia.ru/news/1042491> (дата обращения: 25.09.2022).
 18. Логистические тренды 2020-2021 года: влияние пандемии COVID-19 на перевозки (*2020-2021 Logistics Trends: COVID-19 Influence on Transportation*) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.retail.ru/articles/logisticheskie-trendy-2020-2021-goda-vliyanie-pandemii-covid-19-na-perevozki/> (дата обращения: 25.09.2022).

Поступила в редакцию 10.03.2023.

Разработка алгоритма контурного анализа для определения границ морских объектов

Черняева Светлана Николаевна, к. ф.-м. н., доцент, chern_sv@mail.ru

Воронежский филиал ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова», Воронеж

Разработан алгоритм и построенный на его базе программный продукт, который позволяет выполнять оконтуривание изображений эффективнее, чем используемые ранее алгоритмы. Созданный алгоритм основывается на применении фильтра Рашида Дириха вместо популярного метода сглаживания Гаусса.

Ключевые слова: контурный анализ, обработка изображений, алгоритм выделения контура.

Development of a contour analysis algorithm for determining the boundaries of marine objects

Chernyaeva Svetlana Nikolaevna, Ph.D. PhD, Associate Professor, chern_sv@mail.ru

Voronezh branch of FSBEI HE «SUMRF named after Admiral S.O. Makarov», Voronezh

An algorithm has been developed and a software product built on its basis, which allows you to perform image contouring more efficiently than previously used algorithms. The created algorithm is based on the use of the Rashid Dirich filter instead of the popular Gaussian smoothing method.

Keywords: contour analysis, image processing, contour detection algorithm.

Методы контурного анализа [1-3] применяются в случаях, когда необходимо извлечь информацию о форме объекта на основе его графического представления. Основной целью является решение задачи выделения отдельных контуров изображения и определение фактов вложенности их друг в друга. Контурные объекты мало зависимы от цветов и яркости и являются областями с повышенной концентрацией информации. Контурный анализ является объединением методов детектирования, хранения и модификации контуров изображений и определения зрительных образов.

Классическое применение контурного анализа заключается в получении внешних контуров объектов, которые находятся на изображении, и записи координат каждой из точек такого контура. Известны три подхода к выделению границ объектов:

- аппроксимация кривых;
- прослеживание контура;
- связывание точек градиента.

При выделении контуров сталкиваются со следующими проблемами:

- разрывы контурной линии в местах, где градиент яркости изменяется недостаточно интенсивно;
- наличие фиктивных контуров вследствие шума на изображении;
- широкие контурные линии из-за размытости контура или шума.

В большинстве методов контурного анализа контур шифруется последовательностью комплексных чисел. На контуре определяется точка, которую обозначают как начальную. За-

тем контур проходится (например, по направлению движения часовой стрелки), и каждый вектор смещения записывается в память как комплексное число $a + ib$, в котором a — смещение точки по оси x ; b — аналогичное по оси y . Смещение производится относительно предыдущей исследуемой точки.

Созданный алгоритм основывается на применении фильтра Рашида Дириха вместо популярного метода сглаживания Гаусса. Работа выполнялась на базе библиотеки компьютерного зрения с открытым исходным кодом OpenCV. Одной из целей работы является решение задачи выделения отдельных контуров изображения и определение фактов вложенности их друг в друга. Для достижения цели был применен метод Сатоши Сузуки, представляющий собой модификацию метода прослеживания контуров, который был программно реализован.

В программной реализации введены параметры h_next , и h_prev — ссылки на дальнейший и предшествующий элементы списка контуров. Если используются только эти два параметра, то формируется одноуровневый список контуров. В дополнение к этим параметрам применяются ещё два, позволяющие расширить функциональность: v_next и v_prev — параметры, хранящие ссылки на элемент, находящийся выше, и на элемент, находящийся ниже, в вертикальной структуре. Иными словами, эти параметры являются ссылками на родительские и дочерние контуры. В результате на основе этой системы указателей формируется структура, напоминающая дерево.

На рис. 1 представлена диаграмма, иллюстрирующая подобное дерево.

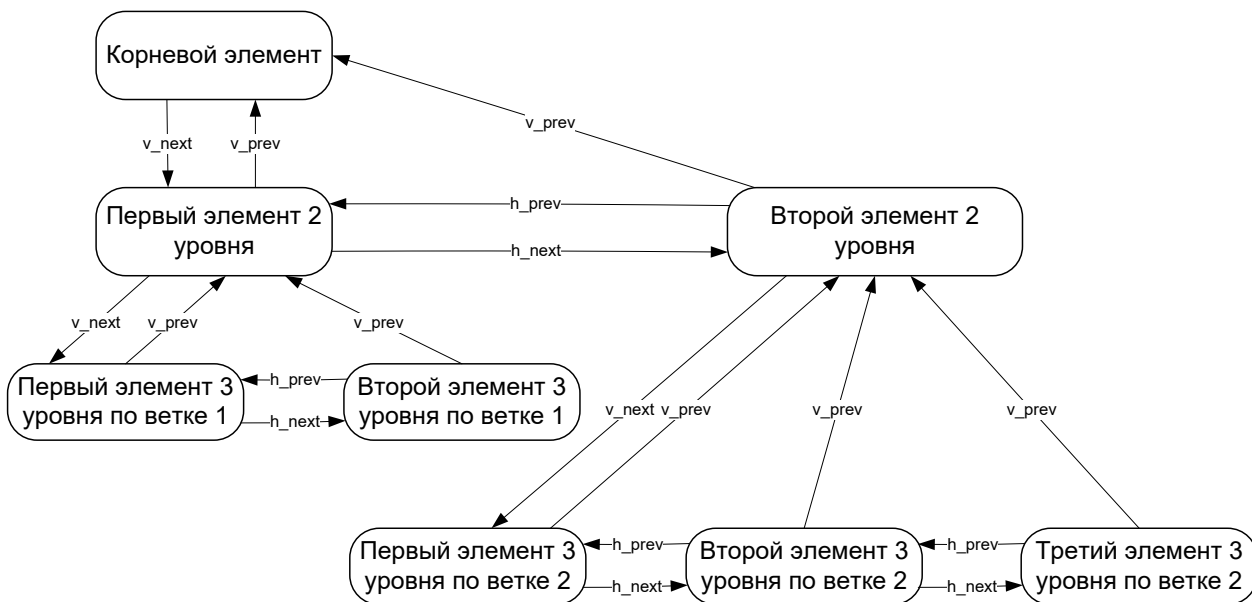


Рисунок 1 — Диаграмма связанного списка

На рис. 1 отражено, что элемент имеет ссылку только на первый дочерний элемент (за исключением тех контуров, которые не имеют дочернего контура), но зато у каждого имеющего родителя контура есть ссылка на своего родителя. Естественно, это правило не относится к корневому элементу, поскольку он не может иметь родителя. Также элементы содержат ссылки на соседние с ними элементы — контуры одного уровня вложенности. Нужно запомнить, что место элемента строго определено, и контуры одного уровня по разным веткам не имеют наложений в структуре.

Нужно заострить внимание на том, что список этот не кольцевой — у третьего элемента на третьем уровне ветки 2 отсутствует связка с первым элементом одного уровня. Это означает, что в его параметре h_next хранится указатель на $null$. И параметр h_prev у первого элемента этого уровня в ветке по аналогии указывает на $null$. Но переменные инициализированы, следовательно, пользователь может задавать их самостоятельно.

Результатом разработок стал алгоритм обработки изображений, выделяющий контуры и их иерархию. На диаграмме (рис. 2) представлен алгоритм в общем виде.

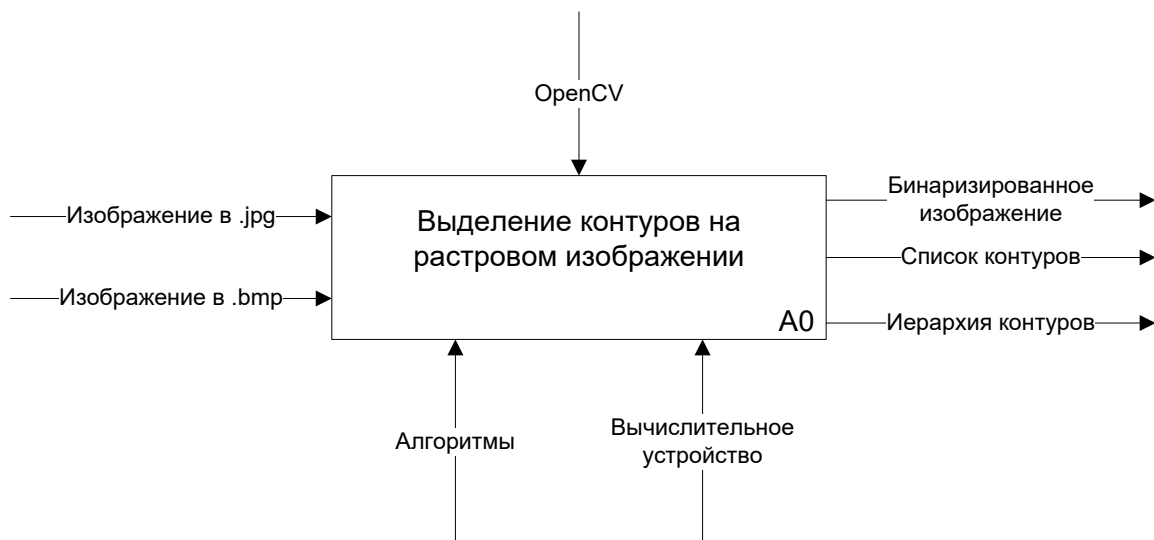


Рисунок 2 — Контекстная диаграмма работы алгоритма

На рис. 3 представлена детализация работы алгоритма. На нем отображены этапы обработки изображения с применяемыми на них методами, условиями.

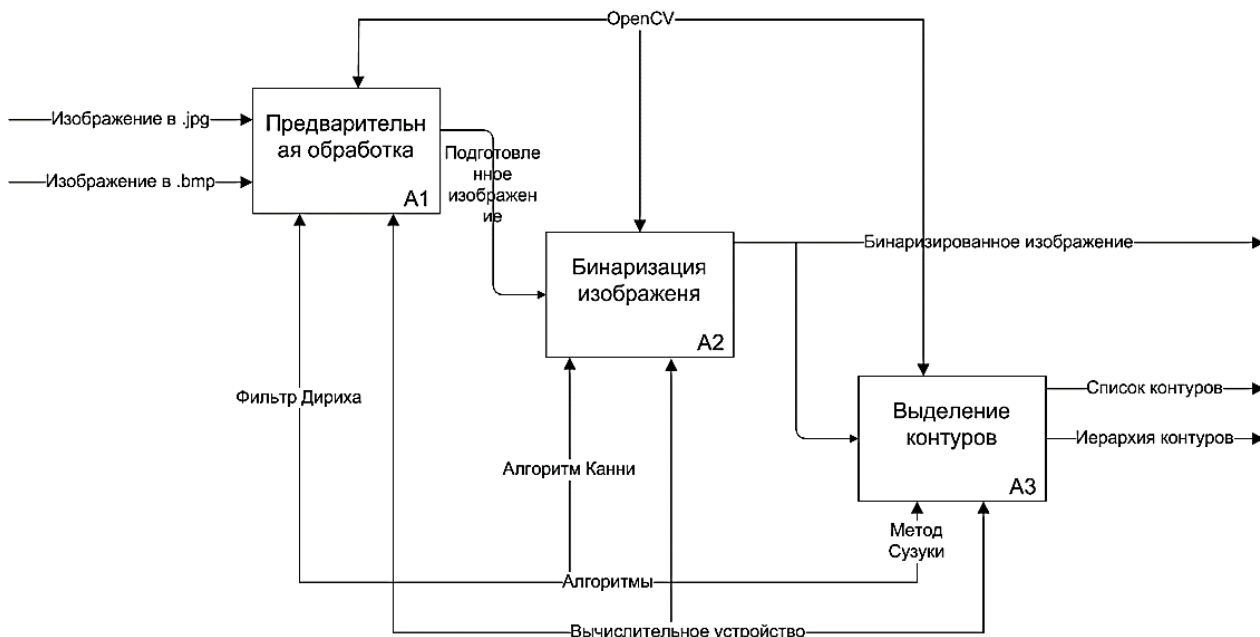


Рисунок 3 — Функциональная диаграмма модели алгоритма

Приведённая выше диаграмма даёт понимание о структуре программы. Далее представлена блок-схема самого процесса обработки.

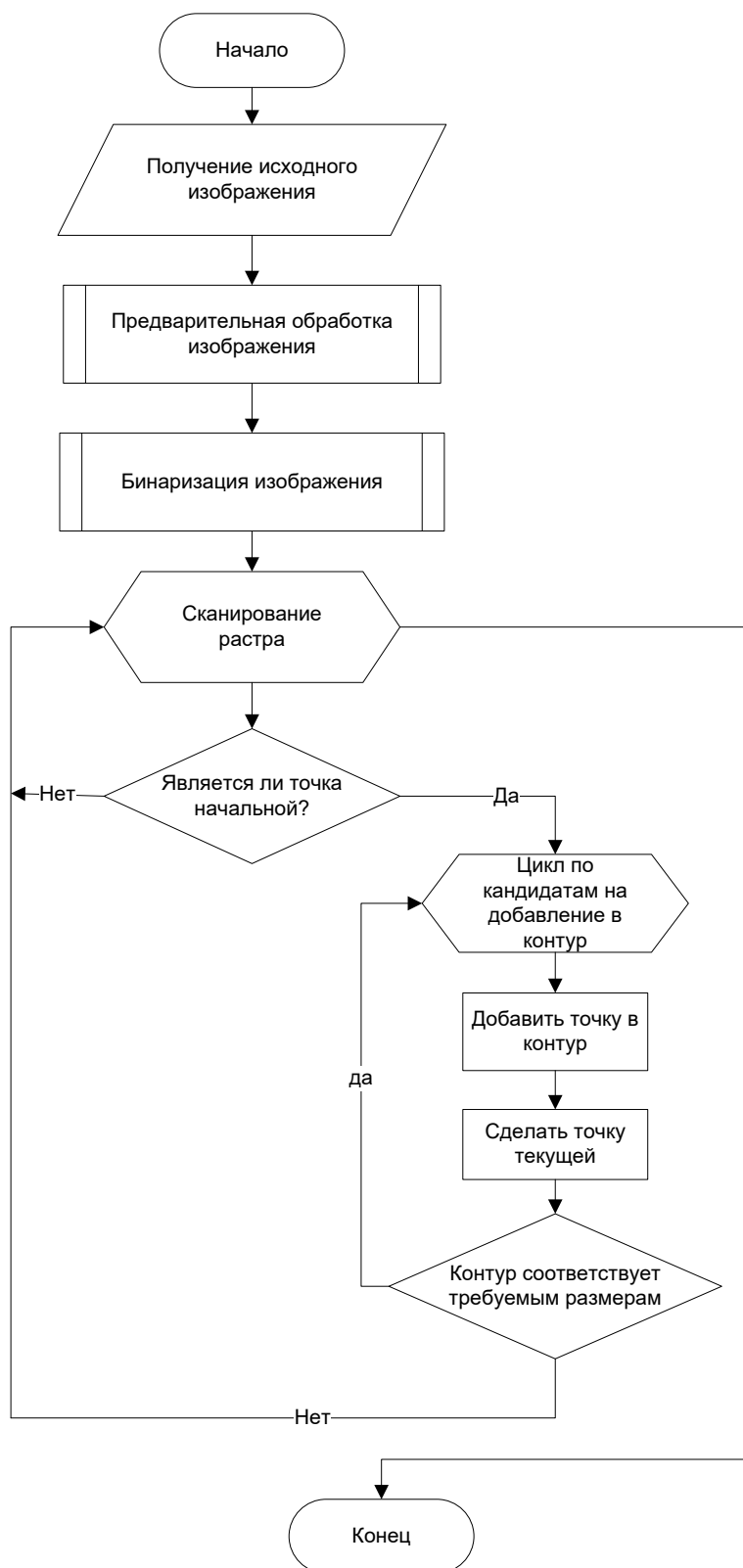


Рисунок 4 — Блок-схема обработки изображения

После получения изображение проходит предварительную обработку с помощью фильтра Рашида Дириха. Эта операция позволяет повысить контрастность изображения и значительно уменьшить его зашумлённость. Следующей ступенью в обработке изображения является его бинаризация. В разработанном алгоритме для этого используется метод порогового преобразования. На этом этапе изображение приобретает однотонный фон и высококонтрастные к фону очертания изображенных объектов, именуемые контурами.

После того, как было получено бинарное изображение, по условиям задачи требуется выделить из этого изображения отдельные контуры. Для этого применяется метод, разработанный Сатоши Сузуки. Этот метод создан на базе классического алгоритма прослеживания контуров. В его основе лежит растровый сканер – цикл по всем пикселям изображения из левого верхнего угла слева направо. Обследуя точку изображения, алгоритм проверяет, является ли она фоном или принадлежит контуру. Именно для определённости на данном этапе требуется преобразование картинка в бинарную форму. Отличие алгоритма Сузуки состоит в том, что при обследовании точки контура алгоритм помечает точки не просто как пройденные, но как принадлежащие конкретному контуру. Благодаря этому становится возможным определить отношения между контурами и сформировать однозначную иерархию. Получение из изображения системы отношений между контурами и самого списка контуров как собрания отдельных объектов является частью основной цели исследования, и применение алгоритма Сатоши Сузуки позволяет её достигнуть.

Перед началом работы были получены изображения, подобные тем, на которых предполагается использовать выработанную методику. На рисунке 5 приведено одно из этих изображений.

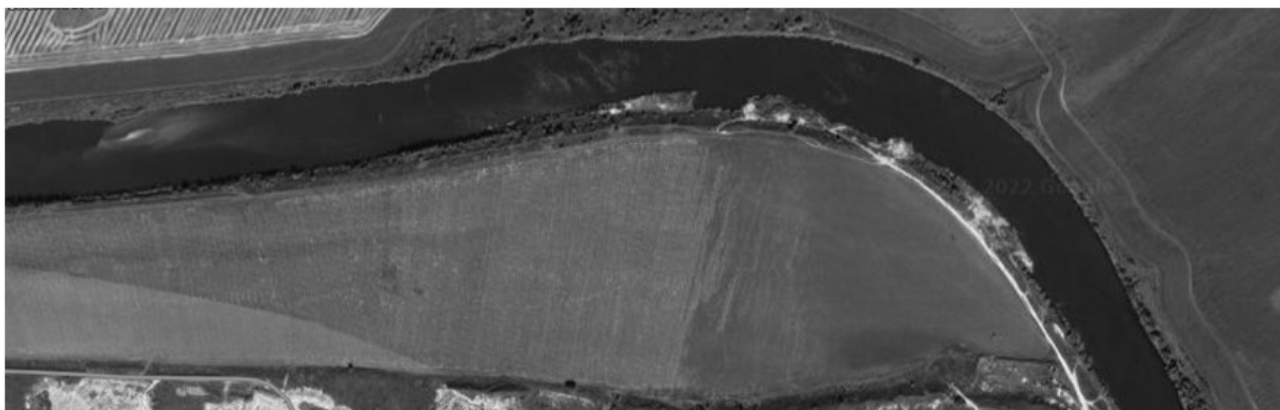


Рисунок 5 — Пример исследуемого изображения

На этом изображении нет объекта интереса исследователя. Тем не менее в качестве первого образца оно выполняет свои функции. Поскольку следующие изображения получены с того же устройства с той же точки, опираясь на данный кадр, можно прослеживать, как изменяется результат работы алгоритма в зависимости от объекта на изображении. Далее приведены результаты получения оконтуренного изображения с использованием методов сглаживания с помощью фильтра Дириха (рис. 6) и размытия по Гауссу (рис. 7).

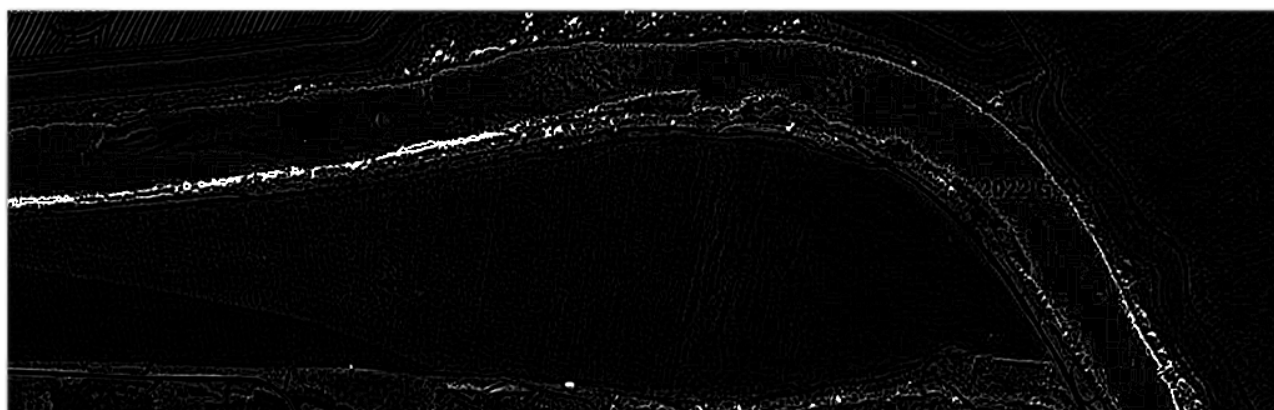


Рисунок 6 — Изображение, оконтуренное с фильтром Дириха

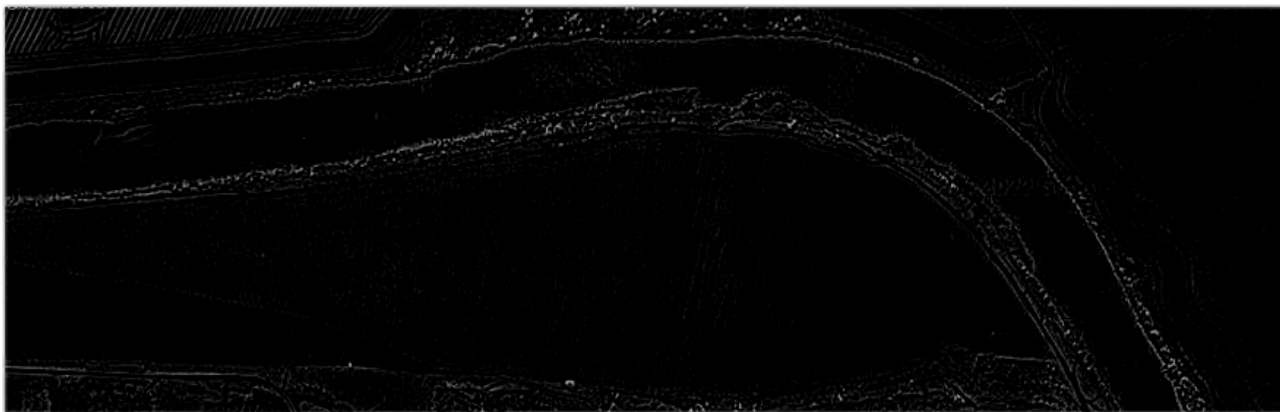


Рисунок 7 — Изображение, оконтуренное со сглаживанием по Гауссу

Как явно видно на изображениях, обработка с фильтром Рашида Дириха гораздо продуктивнее и даёт большее количество контуров.

В результате разработки алгоритма была решена задача выделения отдельных контуров изображения и определения фактов вложенности их друг в друга. Для достижения этой цели был применён метод Сатоши Сузуки, представляющий собой модификацию метода прослеживания контуров. Разработанный алгоритм может применяться для обработки эхолотических изображений, фотосъемки объектов водного транспорта. Кроме того, предлагаемый алгоритм может быть использован для анализа результатов гидрографических съёмок и радиолокационных изображений ледяных полей в арктических регионах.

Список литературы

1. Крыловецкий, А. А. Алгоритмы анализа изображений в системах стереозрения реального времени / А. А. Крыловецкий, С. И. Протасов. // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии, 2010. – № 2. – С. 9-18.
2. Гонсалес, Р. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс. – М. : Техносфера, 2005. – 1072 с.
3. Senthilkumar N., Rajesh R. Edge detection techniques for image segmentation – a survey of soft computing approaches // International journal of recent trends in engineering. Vol. 1, No. 2, May 2009.

Поступила в редакцию 11.01.2023.

Количественная оценка дистанции чрезмерного сближения при расхождении судов

Царик Руслан Станиславович, канд. техн. наук, tsarik@msun.ru
Григорьев Вадим Евгеньевич, totnestronline6@gmail.com
Муляр Владислав Валерьевич, mulyar.vlad@inbox.ru

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

В статье исследуется понятие «чрезмерное сближение» в контексте столкновений судов и неспособности правил МППСС-72 надлежащим образом решить эту проблему. В статье рассматриваются недостатки качественных характеристик ситуации чрезмерного сближения и необходимость их количественной оценки. Представлен экспертный метод, предложенный капитаном А. Н. Кокрофтом и капитаном Дж. Н. Ламейером, который включает количественные зоны близости для оценки ситуаций чрезмерного сближения. В статье предложен способ количественной оценки дистанции чрезмерного сближения и его реализации на практике с целью обеспечения безопасного расхождения судов.

Ключевые слова: чрезмерное сближение, столкновение судов, МППСС-72, количественная оценка, безопасное расстояние, зоны близости, экспертный метод.

Quantitative assessment of the close-quarters distance for passing of the ships

Tsarik Ruslan, Ph.D., tsarik@msun.ru
Grigorev Vadim, totnestronline6@gmail.com
Mulyar Vladislav, mulyar.vlad@inbox.ru

MSU named after adm. G.I. Nevelskoy, Vladivostok

This article explores the concept of “close-quarters situation” in the context of ship collisions and the inability of the COLREG-72 to properly address this problem. The article discusses the shortcomings of the qualitative characteristics of the close-quarters situation and the need of their quantitative assessment. The expert method proposed by Captain A. N. Cockcroft and Captain J. N. Lameyer is presented, which includes quantitative proximity zones for assessing close-quarters situation. The article proposes a method for quantifying the close-quarters distance and its implementation in practice in order to ensure the safe passing of the ships.

Keywords: close-quarters situation, maritime collisions, COLREG-72, quantitative assessment, safe distance, proximity zones, expert method.

Чрезмерное сближение в судоходстве относится к ситуации, когда два или более судна приближаются друг к другу на такое близкое расстояние, что возникает опасность столкновения, и маневрирование, предпринятое любым из этих судов, может оказаться недостаточным, чтобы избежать его. Этот термин неоднократно упоминается в Международных правилах предотвращения столкновений судов в море 1972 г. (МППСС-72), но никогда не определялся

количественно. Неспособность МППСС-72 обеспечить четкие правила чрезмерного сближения привела к многочисленным авариям и потребовала разработки предложений по его количественной оценке.

Когда в 1976 году вступили в силу МППСС-72, стало очевидно, что в регламенте есть многочисленные недостатки, которые необходимо устранить. Были внесены предложения прояснить некоторые расплывчатые термины, в том числе «чрезмерное сближение», «заблаговременные действия» и другие, которые подпадают под термин «хорошая морская практика». «Чрезмерное сближение», которое несколько раз упоминается в правилах, не раскрывается ни качественно, ни количественно, что приводит к различным толкованиям.

Разными экспертами предпринимались и предпринимаются попытки количественного определения понятия «чрезмерное сближение». В большинстве сформулированных ими предложений говорится о необходимости установить конкретное расстояние, которое будет соответствовать термину «чрезмерная близость». Однако делегаты конференции 1972 года не приняли эти предложения, сославшись на слишком много факторов, которые мореплаватели должны учитывать при оценке ситуации расхождения судов. Это решение было пагубным, поскольку количество столкновений судов продолжало расти.

Для решения вопроса специалисты, такие как английский капитан А. Н. Кокрофт и капитан Дж. Н. Ламейер предложили выраженные в милях зоны сближения для оценки ситуации чрезмерного сближения. Эксперты предположили, что ситуация чрезмерного сближения возникает на расстоянии по меньшей мере 2 мили в диапазоне от направления прямо по носу до траверза, являющимся типичным диапазоном слышимости звукового сигнала большого судна в спокойных условиях. Минимальное расстояние 3 мили иногда предлагается принимать при определении, развивается ли ситуация чрезмерного сближения, учитывая возможные ошибки радиолокационных наблюдений, особенно на больших дистанциях. Однако расстояния менее 2 мили можно считать достаточными при следовании пониженным ходом в стесненных водах, в ситуации обгона или когда ожидается проход судна по корме.

Основываясь на этих цифрах, эксперты предложили выраженные в милях зоны сближения для открытого моря, чтобы оценить ситуацию чрезмерного сближения. На рисунке 1 представлена схема этих зон.



Рисунок 1 — Зоны действий при сближении с другим судном

На расстоянии свыше 12 миль суда еще не связаны Правилами и могут свободно маневрировать в соответствии с их планом перехода. На таком расстоянии любой маневр каждого из судов не расценивается как маневр предотвращения столкновения.

Зона от 12 миль до 8 миль является зоной оценки ситуации сближения. Суда не должны маневрировать, не сблизившись более, чем на 8 миль. Однако они уже вошли в зону, когда дальнейшее опасное сближение вынуждает их выполнять маневр расхождения.

Зона действия, т.е. начала маневра для предупреждения столкновения. Маневр должен быть сделан до сокращения дистанции между судами 4 мили. При расстоянии между сближающимися судами от 8 миль до 4 миль судно, обязанное уступить дорогу, должно обязательно произвести маневр, а другое судно ожидает, что этот маневр будет произведен. Такой маневр будет считаться своевременным и соответствующим требованиям Правил.

В отечественной морской литературе обсуждается необходимость использования количественных характеристик при применении МППСС-72 и предлагаются разработки в этой области. При этом, на практике считается, что зона чрезмерного сближения начинается не менее чем за 2 мили перед траверзом судна в открытом море, так как это соответствует нормальной дальности слышимости звуковых сигналов крупных судов при спокойной погоде. Предлагается также рассматривать чрезмерным сближение на расстоянии до 3 миль.

Однако даже при таких расстояниях сближения могут возникать опасности столкновения, особенно если встречное судно движется со значительной скоростью. Если радиолокационное наблюдение затруднено или невозможно, чрезмерным следует считать сближение до зоны помех. В то же время, если скорость сближения невелика и ситуация может быть оценена всесторонне, то сближение на 2 мили может не считаться чрезмерным.

Понятие «чрезмерное сближение» означает ситуацию, когда два или более судна приближаются друг к другу на такое близкое расстояние, что возникает опасность столкновения, и маневрирование, предпринятое любым из судов, может оказаться недостаточным, чтобы избежать его. Установление границы зоны маневрирования в 4 мили (рисунок 2) связано с тем, что после маневра необходимо иметь достаточно пространства и времени для оценки его последствий и принятия дополнительных мер, если маневр оказался неэффективным. Рекомендуется также стремиться к тому, чтобы маневрирование заканчивалось до вхождения судна в зону чрезмерного сближения.

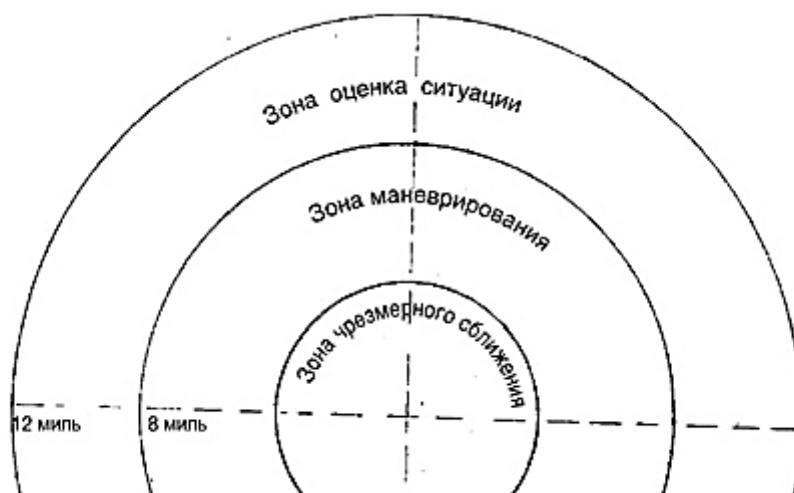


Рисунок 2 — Примерные зоны действий для оценки ситуации чрезмерного сближения

Следует учитывать, что для маневра (поворот на 30-60°) современного крупнотоннажного судна требуется от 2 до 5 минут, а расстояние, проходимое таким судном за время маневра, составляет от 5 до 12 км при скорости 15 узлов. Примерно такое же расстояние пройдет и встречное судно за указанное время маневра.

Функционально и количественно зоны на рис. 2 соответствуют зонам на рис. 1. Зоны своевременного маневра (зона своевременного действия) указаны одинаковыми в комментариях. Однако на рис. 2 показана зона (дистанция от 4 и менее миль) чрезмерного сближения, которая не соответствует ее словесному описанию. Фактически эта зона составляет 2-3 мили вокруг судна.

Представляется целесообразным составить формулу, учитывающую основные факторы, влияющие на безопасное расстояние между судами, такие как размер и маневренность судов, погодные условия и видимость. Однако важно отметить, что такая формула не может учесть все возможные сценарии и условия, и ее следует применять как инструмент для предварительной оценки ситуации и планирования безопасного расхождения с другими судами.

В основе формулы лежит так называемый домен безопасности судна, под которым подразумевается некая минимальная зона вокруг судна, в которую ни при каких обстоятельствах, за исключением, возможно, только плавания в акватории порта и узких фарватерах, не должно входить другое судно. Здесь радиус домена безопасности принят как $1,5L$, где L – длина нашего судна. Поскольку при расхождении судов может возникнуть ситуация, при которой нашему судну потребуется лечь на циркуляцию, следует добавить тактический диаметр циркуляции судна, который регламентирован резолюцией MSC.137(76)

Стандарты маневренности судов не должны превышать $5L$. Далее следует учесть необходимость проведения расчетов и анализа элементов движения другого судна. На это целесообразно выделить 10 минут, из которых, например, 6 минут необходимы для построения векторного скоростного треугольника на маневренном планшете. Расстояние, которое наше судно пройдет за это время, является следующим слагаемым в определении безопасного расстояния для расхождения и определяется умножением скорости судна на 10 минут в часовом выражении. Также необходимо применить коэффициент безопасности, который увеличит искомое безопасное расстояние в зависимости от специфики условий плавания: видимость, гидрометеорологические условия, интенсивность судоходства и т. п. Схематическое изображение всех описанных выше зон представлено на рисунке 3.

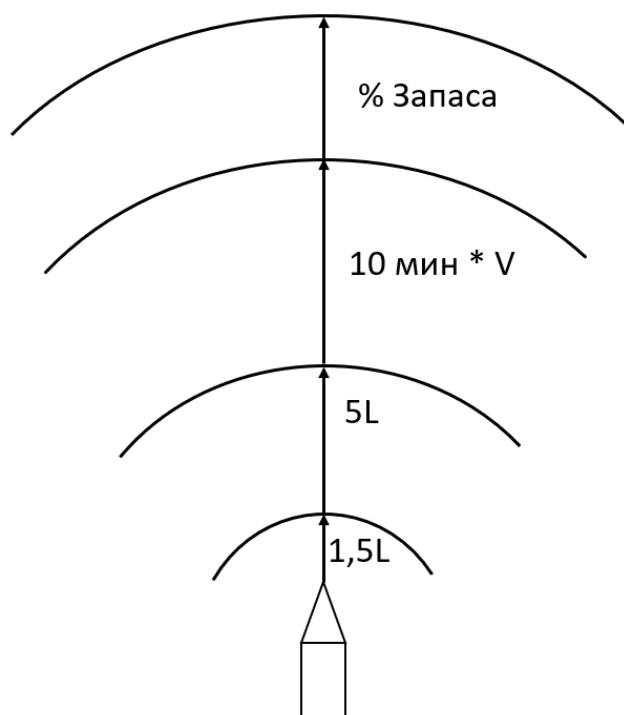


Рисунок 3 — Схематическое изображение зон безопасности

В итоге получим формулу (1)

$$S = f * \left(1,5L + 5L + \frac{10}{60} * V \right), \quad (1)$$

где S – безопасное расстояние между двумя судами;

f – коэффициент безопасности;

L – длина судна;

V – скорость судна.

После преобразования формула может быть представлена в следующем виде:

$$S = f * \left(\frac{6,5L}{1852} + \frac{V}{6} \right). \quad (2)$$

Коэффициент f является неким «запасом прочности» на случай непредвиденных обстоятельств, связанных с неблагоприятными внешними факторами. В нормальных условиях он может быть равен 1,1 и при необходимости быть увеличен до 1,2 или до 1,3 в зависимости от фактической ситуации плавания. Важно отметить, что эти коэффициенты являются лишь общими рекомендациями и должны использоваться в сочетании с суждениями и опытом экипажа судна.

Пример расчета безопасной дистанции для судна длиной 250 м, следующего скоростью 15 узлов и с коэффициентом $f = 1,1$, по формуле (2) представлен ниже:

$$S = 1,1 * \left(\frac{6,5 * 250}{1852} + \frac{15}{6} \right) = 3,7 \text{ м. миль.}$$

В результате получена безопасная дистанция вокруг судна, которая почти совпадает с зоной чрезмерного сближения предложенной капитаном А. Н. Кокрофтом и капитаном Дж. Н. Ламейером. Но в приведенном варианте учитываются особенности конкретного судна, что позволяет получать более точное, соответствующее конкретным условиям плавания, значение.

Очевидно, что в представленном варианте определения безопасной дистанции учтены не все факторы, которые могут влиять на ее значение. Однако сам принцип определения безопасной для расхождения дистанции, в зависимости от параметров нашего судна, представляется в большей степени отвечающим требованиям безопасности.

Хотя формула может быть полезным инструментом для определения безопасного расстояния между судами, на нее не следует полагаться как на единственное средство обеспечения безопасности мореплавания. Экипаж должен всегда сохранять бдительность и принимать все необходимые меры предосторожности, чтобы избежать столкновения.

В реальных условиях плавания выполнение расчетов может быть затруднительным и отвлекать судоводителя от непосредственного управления судном. В этой связи представляется целесообразным включение расчетного алгоритма предложенной формулы в работу судовых средств САРП и ЭКНИС, которые в автоматическом режиме и с учетом конкретных параметров судна и окружающей обстановки могли бы определять безопасное расстояние для расхождения и сообщать об этом судоводителю. Это может быть реализовано в виде графических данных, например, круговой охранной зоны на экране соответствующего оборудования. Сейчас такие зоны определяются и устанавливаются судоводителем в ручном режиме. Автоматизация этого процесса позволит облегчить работу судоводителя и повысить безопасность мореплавания.

Список литературы:

1. Найденов, Е. В. МППСС-72 не имеют права на существование / Е. В. Найденов // Морские вести России. – 2016. – № 12 (2015).

2. Найденов, Е. В. Проект Новых МППСС / Е. В. Найденов // Морские вести России. – 2020. – № 14 (2020).
3. Яскевич, А. П. Комментарии к МППСС-72 / А. П. Яскевич, Ю. Г. Зурабов. – М.: Транспорт, 1990. – 479 с.
4. Коккрофт, А. Н. Толкование МППСС-72 / А. Н. Коккрофт, Д. Н. Ламейер / пер. с англ. – М.: Транспорт, 1981. – 279 с.
5. Preventing Collision at Sea, 1972. – М.: RosKonsult, 2001. – 84 p.
6. IMO Resolution A.209(VII) adopted on 12 October 1971 “Recommendation on information to be included in the manoeuvring booklets”. – URL: [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/AssemblyDocuments/A.209\(7\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/AssemblyDocuments/A.209(7).pdf)
7. Овчинникова, Е. А. Особенности маневрирования судна в штормовых условиях / Овчинникова Е. А., Скороходов Д. А. // Интеллектуальные системы управления. – 2016. – С. 185.

Поступила в редакцию 20.03.2023.

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ

УДК 629.5.03

Обзор эволюции обучающего оборудования как устройств, моделирующих работу сложных инженерных систем

Пастухов Сергей Витальевич, доцент, pastukhov@msun.ru

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

Новые подходы к обучению – начало физического моделирования сложных технических объектов – начало создания тренажерной техники. Назначение первых моделей сложных технических объектов – обучение конструкции и принципу работы. Показаны особенности демонстрационных и действующих моделей и различие между ними. Пример действующей модели – морская паровая машина тройного расширения. Описан один из первых морских тренажеров – модель танкера Esso France в масштабе 1:25, оборудованный ключевыми элементами, как на любом мостике, включая штурвал, указатель угла поворота руля, компас, анемометр, телеграф управления двигателем, устройства фиксации скорости и пройденного расстояния. Места для капитанов и рулевого также имеются. Проект реализован в учебном центре, известном штурманам всего мира как одно из лучших мест для обучения под названием Порт-Ревель.

Оценивая временной интервал от начала XX века примерно до середины 1980-х годов, можно уверенно сказать, что все морские тренажеры были механическими, разной степени сложности. Как правило, они либо имитировали настоящее судовое оборудование, либо представляли собой настоящие механизмы с судов, соответствующим образом доработанные для учебных целей. Обучение на настоящем оборудовании, бесспорно, было эффективно, но судовое оборудование производилось многими компаниями в мире. Иметь всё это разнообразие в каждом морском училище было невозможно. Приходилось выбирать доступные решения, охватывающие ключевые вопросы морского образования.

Цель статьи – показать эволюцию тренажерной техники для обучения инженеров.

Ключевые слова: физическое моделирование, механические тренажеры, функциональность.

Training equipment evolution overview as devices simulated the operation of complex engineering systems

Pastukhov Sergey, associate professor, pastukhov@msun.ru

MSU named after adm. G.I. Nevelskoy, Vladivostok

New approaches to training – the beginning of physical modeling of complex technical objects – the beginning of the creation of simulator equipment. The purpose of the first models of complex technical objects is to teach the design and the principle of operation. The features of demonstration and operating models and the difference between them are shown. An example of a working model is a triple expansion marine steam engine. One of the first marine simulators is described - a model of the Esso France tanker on a scale of 1:25, equipped with key elements, as on any bridge, including the steering wheel, rudder angle indicator, compass, anemometer, engine control telegraph, speed

and distance fixing devices. Places for captains and helmsmen are also available. The project was implemented in a training center known to navigators around the world as one of the best places for training called Port Revel.

Assessing the time interval from the beginning of the twentieth century to about the mid-1980s, we can confidently say that all marine simulators were mechanical, of varying degrees of complexity. As a rule, they either imitated real ship equipment, or were real mechanisms from ships, suitably modified for training purposes. Training on real equipment was undeniably effective, but shipboard equipment was manufactured by many companies around the world. It was impossible to have all this diversity in every naval school. We had to choose affordable solutions, covering key issues of maritime education.

The purpose of the article is to show the evolution of simulation equipment for training engineers.

Key words: physical modeling, mechanical simulators, functionality.

Сейчас невозможно определить, кто был первым человеком, придумавшим использовать упрощенную имитацию сложного механизма для изучения механических, технологических возможностей именно этого устройства, а может быть и для предварительного моделирования возможностей здания или агрегата, который ещё не был построен. Кроме того, подобные решения были вполне применимы для обучения своих учеников. Кем бы ни был этот мастер, но он был гениален.

И совершенно точно ясно, что первые шаги в данном направлении были сделаны достаточно давно. Первооткрывателями подобного подхода к работе, скорее всего, были архитекторы. Посмотрите внимательно на модель здания, изображенного на рисунке 1. Возраст этого керамического изделия более шести с половиной тысяч лет. Сейчас трудно уверенно утверждать, использовалась ли это изделие именно для проектирования и для обучения древних строителей. Может быть, это игрушка для сына местного царя или предмет культа для помещения в чью-то гробницу? К сожалению, у нас нет машины времени, чтобы заглянуть в прошлое и выведать у мастера, для чего же именно он создал это изделие. Но, несомненно, эта необычная модель из обожженной глины, обнаруженная в долине Дуная, считается созданной людьми, опередившими свое время как в художественном, так и в технологическом плане. Потенциально она вполне могла использоваться для всех вышеописанных целей.



Рисунок 1 — Архитектурная модель, найденная в Гумельнице (ныне Болгария), 4600 г. до н. э. (фото из открытых источников [8])

А вот что касается рисунка 2, это уже полноценная физическая модель, с помощью которой архитектор Филиппо Брунеллески ещё в XV веке мог легко направлять своих мастеров при строительстве купола Флорентийского собора «Санта-Мария-дель-Фьоре». На его создание потратили 15 лет (1420-1434). Красный (кирпичный!) купол стал символом Флоренции, его видно практически с любой точки города. Причём модель купола преднамеренно оставлена незавершенной, чтобы обеспечить контроль во время его постройки.

Многие модели, построенные для Флорентийского собора, были предназначены для проверки конструкции, контроля строительства и предварительного тестирования прочности, чтобы заранее убедиться – то, что должно было быть построено, выдержит должны нагрузки и прослужит долго. Как видим, средневековым мастерам всё удалось. Собор и купол стоят уже 600 лет.



Рисунок 2 — Купол Флорентийского собора, модель, XV век (фото из открытых источников [8])

Те не менее, можно не сомневаться, что вторыми, или, по крайней мере, третьими мастерами, использовавшими предварительное моделирование, были кораблестроители. Причем, флот был ещё весельно-парусным, а до паровых машин оставалась примерно две тысячи лет. Но на самом деле первоначальные методики масштабного моделирования сложных устройств, среди них и морских судов, в том числе с целью отработки особенностей конструкции, обучению младших мастеров, а также для рекламной демонстрации будущего объекта заказчику, были проработаны уже давным-давно.

Время шло, наступил XIX век. Активное развитие паровых машин и активное их применение в морском и речном судоходстве потребовали совершенно новых знаний от моряков. Соответственно, сформировалась необходимость в обучении новых специалистов, причём достаточно быстро, поскольку пароходы и паровозы, а также паровые промышленные машины быстро завоевывали мир.

Новое время потребовало новых подходов в обучении. Позволить себе иметь дорогостоящую, полноразмерную судовую паровую машину, а тем более «учебный пароход» могли очень немногие. Организовать полноценное обучение для всех курсантов того времени на «настоящем железе» было достаточно дорого, а также сложно в организационном плане.

Гораздо проще оказалось изготовить масштабные модели такого сложного оборудования, как котлы, насосы, паровые машины и обеспечить ими всех заинтересованных, в том числе и учебные центры для моряков-механиков, как бы они ни назывались. Модели были двух типов.

1. Демонстрационные – с помощью таких моделей можно было легко показать и объяснить конструкцию оборудования, а также обучить работе с ним. Их можно было легко разобрать и собирать, отрабатывая технологические и практические навыки. Стоимость таких моделей была не очень высокой.

2. Действующие – полностью и детально повторяющие настоящие паровые машины известных производителей. Это были достаточно сложные, но уменьшенные копии реально существовавшего оборудования. На них уже можно было обучать не только конструкции оборудования, но и его эксплуатации, поскольку подобные модели работали на настоящем пару, они запускались и останавливались, можно было реверсировать двигатель – всё, как на настоящем судне. Такие устройства стоили недешево, поэтому их изготавливали преимущественно по заказам. Иногда подобные модели выполнялись с таким мастерством, что сейчас некоторые из них хранятся в частных коллекциях и музеях, но уже не как «старый тренажёр», а как винтажный арт-объект.

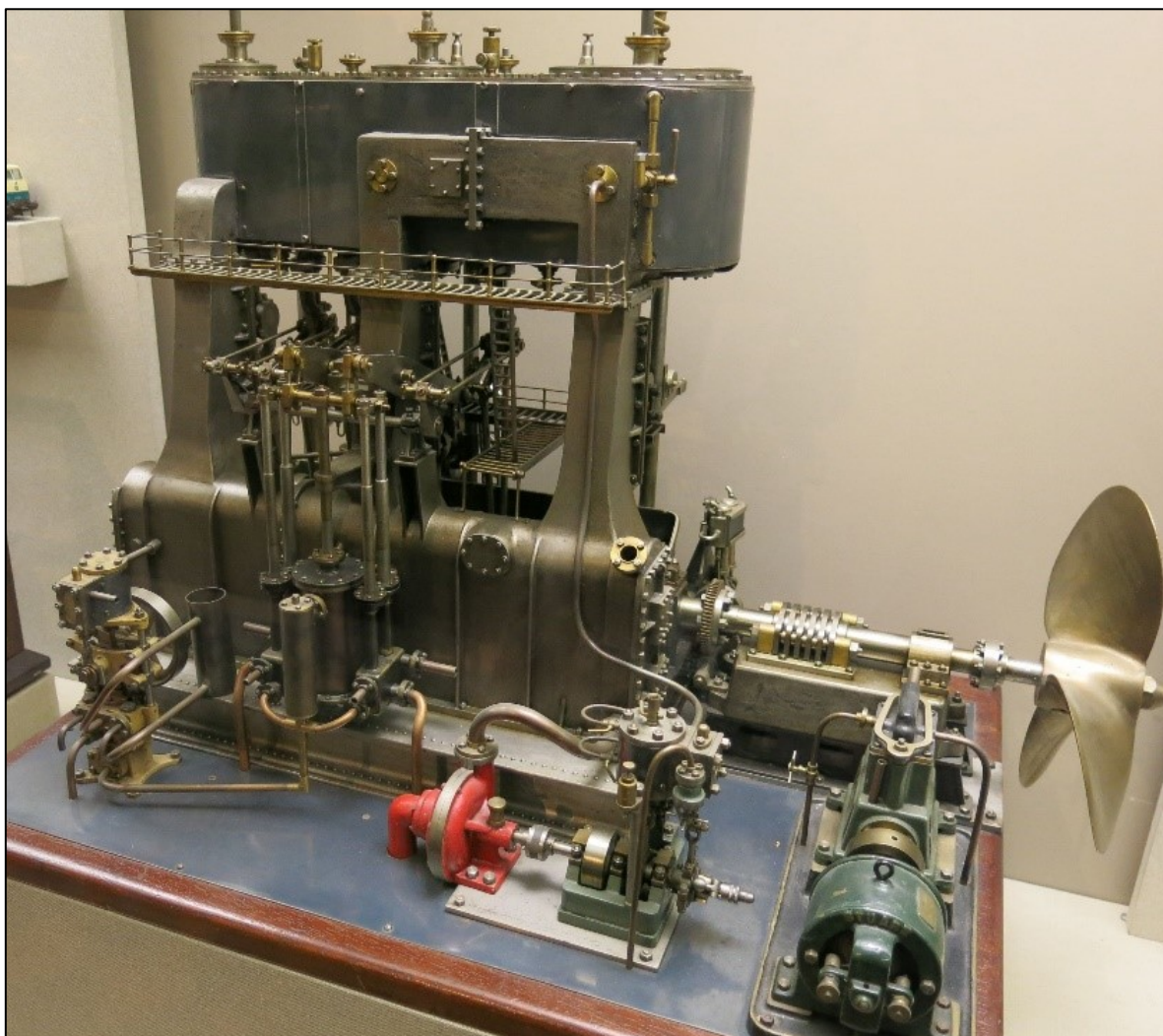


Рисунок 3 — Модель судовой паровой машины, начало XX века (фото из открытых источников [9])

Обратите внимание на рисунок 3. На фотографии показана действующая модель морской паровой машины тройного расширения. Подобные двигатели были самыми популярными и эффективными паровыми двигателями с конца XIX века и широко использовались на судах вплоть до 1950-х годов. Данный вид двигателей имел три цилиндра и три поршня, пар проходит последовательно от самого маленького цилиндра к самому большому, приводя в движение каждый по очереди.

На сайте Морского государственного университета размещена фотография (см. рис. 4), опубликованная 14 ноября 2022 года в статье, посвященной 132-й годовщине основания МГУ им. адм. Г.И. Невельского. На переднем плане слева внизу неплохо видна как раз подобная модель паровой машины.



Рисунок 4 — Курсанты и преподаватели Владивостокского Александровского мореходного училища, выпуск 1908 года (фото из открытых источников [10])

Как видите, в начале XX века подобное оборудование, которое ещё пока нельзя назвать «тренажерным», а всего лишь «моделирующим», имелось и использовалось во Владивостоке для морского образования.

Данные методики постоянно развивались, и с появлением дизелей на флоте модели паровых машин постепенно пропали из образовательных процессов, зато появились не менее примечательные модели дизелей. Из-за более сложной конструкции дизеля, по сравнению с паровой машиной, подобные модели не делались в «действующих» вариантах. На рисунке 5 приведена масштабная модель главного двигателя типа 674 VT2BF-160 от датской фирмы *Vulmeister & Wain*. Аналогичные дизели выпускались в СССР по лицензии на Брянском машиностроительном заводе. Советское название двигателя – 6 ДКРН 74/160-2, очень неплохой для своего времени и широко распространённый дизель. Он выпускался во многих странах в разных вариациях с начала 1960-х и до середины 1970-х годов прошлого столетия. Соответственно, на флоте подобные дизели дослужили до начала XXI века. Как видите, на модели двигателя сделаны специальные технологические вырезы для демонстрации движения поршня, вращения коленчатого и распределительного валов, имитация вращения производилась с помощью электродвигателя. Подобное оборудование очень понятно демонстрировало все особенности конструкции дизеля. Скрупулёзность в деталях и точность изготовления компонентов поражают. Рабочие процессы, к сожалению, имитировались скромно – пуск, остановка, реверсирование, имитация воспламенения в цилиндре с помощью электрической лампочки. Тем не менее, для своего времени это был ценный инструмент в деле обучения молодых механиков.

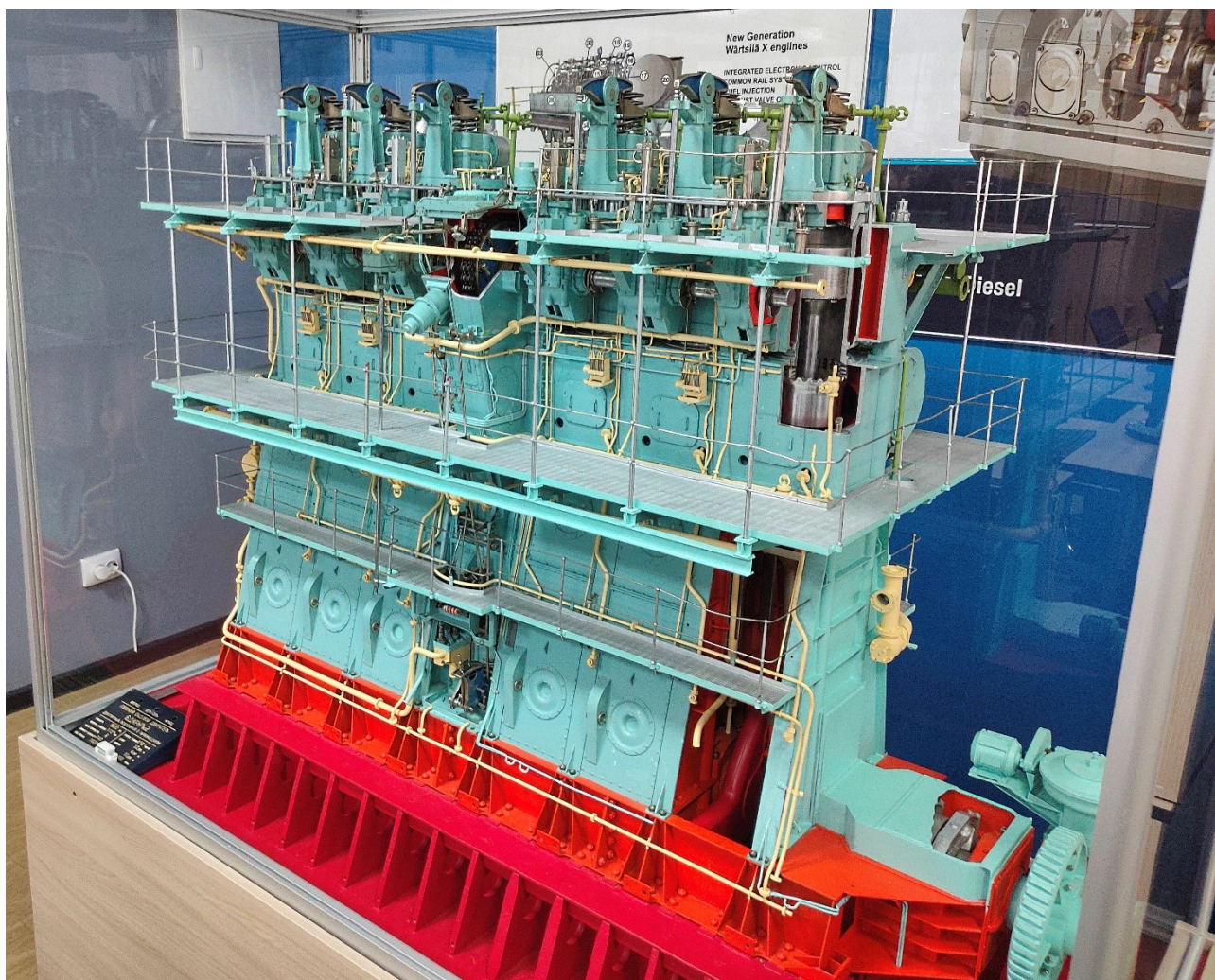


Рисунок 5 — Модель судового главного двигателя 6 ДКРН 74/160-2 (674 VT2BF-160).
Фото автора

Следует отметить, что подобное оборудование позволяло, прежде всего, уяснить принцип работы и особенности работы агрегатов и давало наглядное представление о конструкции и взаимосвязи узлов и отдельных деталей в конструкции агрегатов. Но они не могли решать задачу всестороннего обучения управлению этими агрегатами. Отработка навыков управления сложными агрегатами и машинами отводилась на реальных конструкциях в реальной эксплуатации. Развитие более сложной и дорогой техники настоятельно ставило задачу соответствующей подготовки обслуживающего персонала на стадии обучения.

Необходимо отметить, что новый, очень заметный толчок в развитии и применении тренажерных технологий уже в начале XX века принадлежит авиаторам. Причём, лётчики были вынуждены и принялись развивать не столько «механическое», сколько «управляющее» направление тренажерной подготовки. Ещё на заре авиации стало ясно – безопаснее, да к тому же ещё и заметно дешевле, значительную часть предварительной подготовки лётчиков производить на различных имитирующих устройствах, чем на реальных самолетах. В 1927 году в США был построен первый действующий тренажёр, представлявший собой упрощённый макет одноместного самолёта с кабиной, закреплённой на универсальном шарнире.

Примерно с 30-х годов прошлого столетия методики и подходы к тренажерной подготовке авиаторов и моряков стали сближаться, иногда даже переплетаться и взаимно дополнять друг друга.

Следующим, на наш взгляд, знаковым для морского флота стало действие, инициированное в 1952 году. Нефтяная компания Esso обратилась за консультацией к французской компании Sogreah. В то время Esso рассматривала возможность строительства более крупных нефтяных танкеров для маршрута из Персидского залива в Средиземное море через Суэцкий канал, но ей нужно было заранее знать, какое влияние суда нового поколения окажут на судоходные операции и на берега канала.

Команда Sogreah предложила проверить свои расчеты, используя масштабную модель корабля в лабораторных условиях. Они построили модель предполагаемого 30000-тонного танкера в масштабе 1:25, которая была максимально точной во всех важных деталях, включая форму корпуса, водоизмещение и гребной винт. Первые испытания предполагаемого судна проводились с помощью буксировки модели в бассейне. Но на этом разработчики не остановились, позднее они сделали модель самоходной, добавив электродвигатель, масштабированный по той же методике, что и основной корпус. В итоге самоходная модель вела себя почти так же, как полноразмерное судно, которое она представляла.

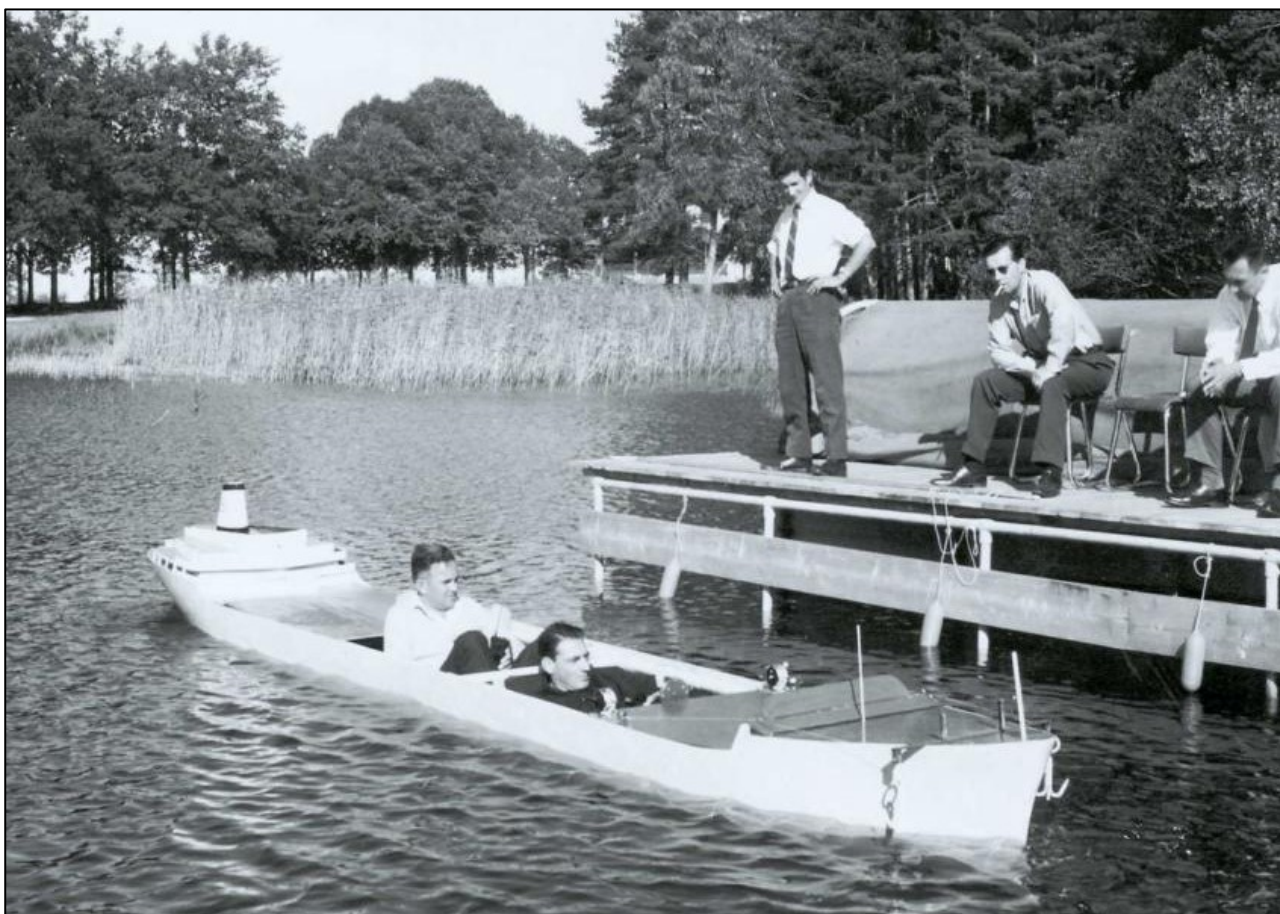


Рисунок 6 — Порт-Ревель, одно из первых испытаний
(фото из открытых источников, [12])

Через два года, в 1954 году, проектировщики пошли ещё дальше, реализовав простое, но гениальное решение. Команда разработала модель танкера Esso France в масштабе 1:25 с сиденьями для капитана и рулевого, разместив их на модели так, что глаза операторов судна оказались на высоте мостика, аналогично судну-прототипу. Перед ними были такие же ключевые элементы, как на любом мостике, включая штурвал, указатель угла поворота руля, компас, анемометр, телеграф управления двигателем, устройства фиксации скорости и пройденного расстояния. Получилась, казалось, игрушка, но в виде полноценной, масштабной модели судна. При испытаниях разработчики и заказчики очень быстро поняли, насколько полезной

будет эта техника для обучения экипажей и капитанов в условиях, максимально приближенных к реальным. Но пока все испытания проводились в бассейне. Стало ясно, что здесь уже тесновато для полноценного инженерного обучения капитанов и вахтенных помощников. Esso и Sogreah начали искать место, где они могли бы разместить свой растущий флот масштабных моделей. Они нарисовали круг радиусом 100 км с центром в Гренобле, а затем наложили карту ветров. В Сен-Пьер-де-Брессье они нашли частное озеро площадью два гектара, где воздействие ветра было минимальным. В 1966 году партнеры осушили озеро и начали изменять форму его русла, чтобы максимально точно смоделировать Суэцкий канал и подходы к избранным портам и гаваням. Идея заключалась в том, чтобы воспроизвести локальные донные эффекты и познакомить слушателей как с эффектами, так и с реакцией их судна. Другие функции добавлялись постепенно.

Таким образом, в предгорьях французских Альп, покрытых орешником, где свободно бродят косули, очень далеко от моря появился Порт-Ревель, учебный центр, известный штурманам всего мира как одно из лучших мест для обучения (рис. 7).



Рисунок 7 — Порт-Ревель, современная тренажерная подготовка по прохождению канала (фото из открытых источников [12])

Здесь нет ничего виртуального, все физическое. Используются настоящие суда на реальной воде на реальном морском дне, в реальных, но моделируемых погодных условиях. Генератор волн производит волновые пакеты с контролируемой амплитудой и частотой. Огромные вентиляторы имитируют ветер до 30 узлов. Реалистично выстроены пирсы, причалы и краны. Учитывая, что основной причиной аварий на море остается человеческий фактор, подобное обучение по-прежнему имеет жизненно важное значение. Этот подход работает уже почти 60 лет.

Благодаря флоту масштабных моделей обучающиеся получают неплохие знания как швартоваться, ставить якоря, входить в шлюзы Панамы и Суэца, и это еще не все возможные варианты.

Работу учебного центра в Порт-Ревель можно признать творческой и инженерной одновременно. Удачное воплощение простых идей позволяло и позволяет до сих пор успешно обучать моряков со всего мира.

Параллельно развитию навигационных тренажёров, примерно в то же время развивались методики и способы симуляторов для машинной команды. В этом направлении локомотивом, пожалуй, была компания Norcontrol из Норвегии.

Norcontrol – это компания с непростой историей, она неоднократно переименовывалась, перепродавалась, была близка к банкротству и, в конце концов, была поглощена другой норвежской компанией Kongsberg Maritime [4]. Так как Norcontrol изначально была технологической компанией, разработчиком и поставщиком систем навигации и автоматизации судов, то, в отличие от французов из Sogreah, норвежцы стали развивать именно компьютерные технологии применительно к морскому бизнесу. И это началось в 60-х годах прошлого столетия. Не стоит забывать, что компьютеры тогда были немногим мощнее нынешних калькуляторов.

В рамках концепции по сокращению дежурства персонала в машинном отделении специалисты из Norcontrol разработали новаторскую систему сигнализации и мониторинга. Им удалось создать и внедрить на судах сначала системы автоматизации уровня А1 и затем А0 (безвахтенное обслуживание). Первое судно по стандартам А0 было оборудовано ими в 1968-м году. По мере более широкого использования передовых технологий на флоте возникла острая потребность в обучении персонала новым стандартам. Norcontrol заранее организовал свой учебный центр, чтобы иметь возможность проводить обучение по использованию поставленных систем, но быстро стало понятно, что качественное, но не очень длительное по срокам обучение должно быть основано на тренажерах, имеющих возможность воспроизвести реальные реакции главного двигателя и механизмов машинного отделения на действия операторов.

Тут необходимо отметить творческий и инженерный подходы к решению поставленных перед Norcontrol задач. Разработчикам пришлось оцифровать ключевые аспекты работы судового оборудования, создать математические алгоритмы и модели различных процессов, происходящих на настоящем судне. Проверка виртуальных моделей производилась на действующих судах-прототипах. В результате формировалась комплексная тренажерная учебная модель судна либо целиком, либо разделенная на блоки, например, мостик и машинное отделение. В итоге тренажерная подготовка стала важным видом деятельности компании Norcontrol, фактически трансформировавшись в новые, собственные продукты. Эти тренажеры были предложены морским школам, и первый комплект (симулятор радара DataBridge-2) был передан в школу мореплавания в Тёнсберге в 1974 году. Первый тренажер машинного отделения получил название DieselSim и был поставлен в морскую школу Тронхейма в 1978 году. Работа на тренажерах быстро стала важной частью бизнеса компании Norcontrol. Позднее её продолжила компания Kongsberg Digital, которая поглотила Norcontrol. В настоящее время именно она поставляет и развивает аналогичные, современные продукты.

В конце 1980-х годов тренажеры из очень современной на тот момент линейки DieselSim были поставлены и запущены в нескольких учебных заведениях бывшего СССР, в том числе два комплекта (супертанкер и двухдвигательный траулер) были установлены во Владивостоке, в ДВВИМУ, сейчас – Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского (рисунки 8 и 9).

Необходимо отметить тщательную проработку математических моделей, интегрированных в эти тренажеры. Компания Norcontrol относилась очень серьёзно к информации, получаемой от судовладельцев, на ее основе исправлялись ошибки и совершенствовались тренажеры. Качество оборудования высокое, один из этих тренажеров можно запустить даже сейчас и что-то на нём продемонстрировать.



Рисунок 8 — Тренажёр DieselSim – супертанкер (фото автора)

Это оборудование, конечно, устарело и его место сейчас в специализированном музее. Суда-прототипы уже списаны или дорабатывают свои последние рейсы. Но интеллектуальный потенциал, заложенный в эти тренажеры более 40 лет назад, до сих пор очень высок.

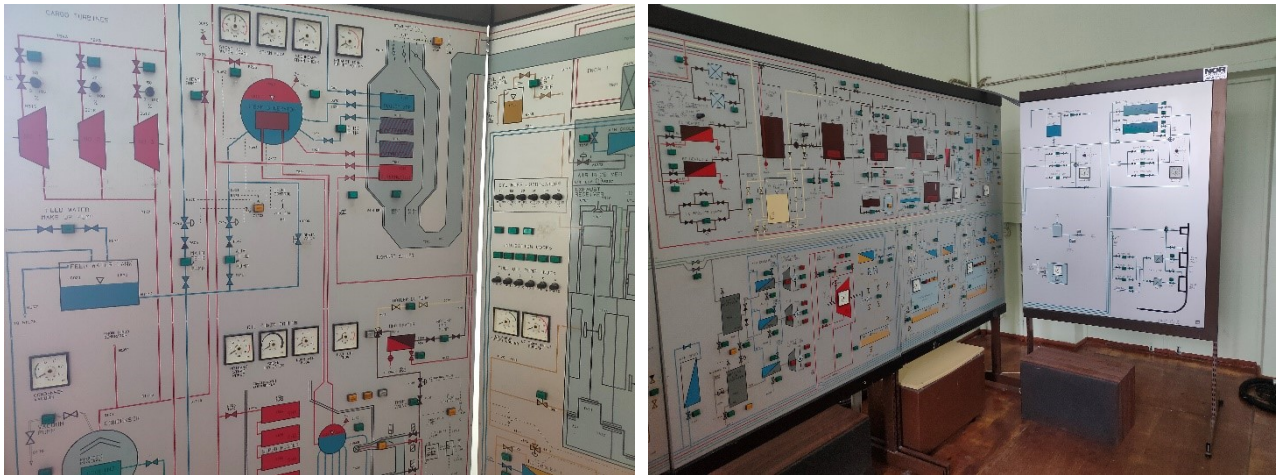


Рисунок 9 — Мнемосхемы тренажёра DieselSim – Супертанкер (фото автора)

Следует сказать, что в реальном образовательном процессе не всегда требуются такие сложные комплексные тренажеры. Для небольших задач находили применение и успешно использовались более простые, менее дорогие, но достаточно наглядные тренажерные решения. Например, тренажерные стенды, аналогичные фотографии ниже (рис. 7). Это стенд, сделанный в 1976-м году учебно-производственной мастерской Ленинградского арктического училища. Здесь очень понятно изображена система управления двигателя типа RD-76 от фирмы

Sulzer. Ключевые элементы станда подвижны, их перемещение в точности имитирует работу настоящего оборудования на реальном судне.

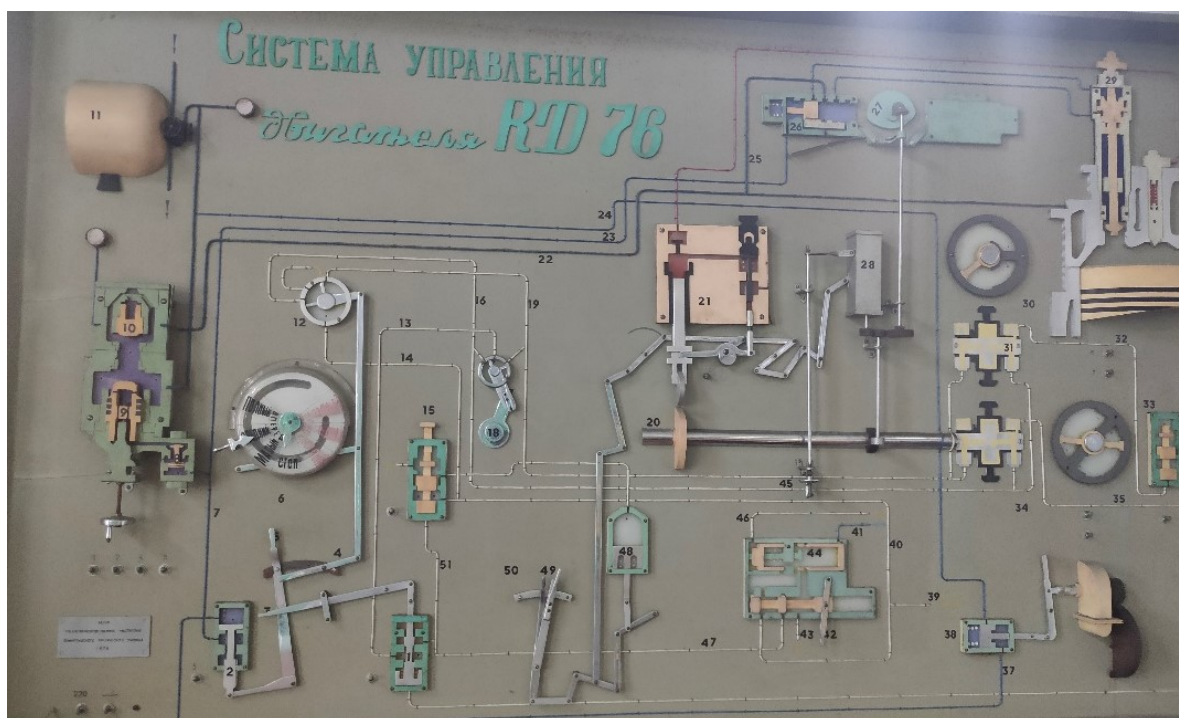


Рисунок 10 — Система управления дизеля фирмы Sulzer RD 76 (фото автора)

Оценивая временной интервал от начала XX века примерно до середины 1980-х годов, можно уверенно сказать, что все морские тренажеры были изначально механическими, позднее – электромеханическими, разной степени сложности. Как правило, они имитировали настоящее судовое оборудование либо представляли собой настоящие механизмы с судов, соответствующим образом доработанные для учебных целей. Обучение на настоящем оборудовании, бесспорно, было эффективно, но судовое оборудование производилось многими компаниями в мире. Иметь всё это разнообразие в каждом морском училище было невозможно. Приходилось выбирать доступные решения, охватывающие ключевые вопросы морского образования. При выборе тренажеров необходимо было учитывать ряд следующих показателей:

- реалистичность;
- функциональность;
- надежность;
- способность обеспечивать качество обучения;
- доступность по цене.

С активным развитием компьютерных технологий, примерно с начала 1990-х годов, стало появляться множество различных решений по тренажерной подготовке. Это тема для отдельного, не менее интересного разговора, и мы попытаемся раскрыть все эти нюансы в следующей статье, посвященной современному оборудованию и технологиям, применяемым в настоящее время.

Список литературы:

1. Соболенко, А. Н. Обобщение опыта эксплуатации тренажеров машинного отделения морского судна / А. Н. Соболенко, Ю. А. Корнейчук, Д. К. Глазюк // Вестник АГТУ. Сер.: Морская техника и технология. – 2016. – № 2. – С. 59-69.
2. Соболенко, А. Н. Повышение эффективности и безаварийности работы СЭУ посредством тренажерной подготовки её операторов / А. Н. Соболенко, Д. К. Глазюк // Рыбное хозяйство. – 2014. – № 1. – С.12-14.

3. Kongsberg Digital, K-Sim maritime simulation systems [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://kongsbergdigital.com/products/k-sim/>
4. Vagabov I. I., Sobolenko A. N., Korneychuk Y. A. Diesel Simulator as Unique Means for Bringing of Marine Engineers' Competence in Conformity with the Requirements of the STCW 95 Convention / I. I. Vagabov, A.N. Sobolenko, Y.A. Korneychuk // Proceedings of 5th International Conference on Engine Room Simulators. – Singapore, 25-26 June 2001.
5. Компания Транзас – «Тренажерные решения» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://transas.ru/products_category/trenazhernye-sistemy/
6. Международная конвенция о подготовке и дипломировании моряков и несении вахты 1978 года (ПДНВ-78) с поправками. – СПб.: ЦНИИМФ, 2021. – 858 с.
7. Международный кодекс по управлению безопасностью (МКУБ) и руководства по его выполнению. – СПб.: ЦНИИМФ, 2018. – 192 с.
8. Architectural Review [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.architectural-review.com/essays/architects-do-it-with-models-the-history-of-architecture-in-16-models>
9. Powehouse Collection from Museum of Applied Arts and Sciences. Австралия [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://collection.maas.museum/object/215004>
10. Поздравление ректора с 132-й годовщиной со дня основания МГУ им. адм. Г.И. Невельского. Новость от 14 ноября 2022 г. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.msun.ru>
11. Par Vincent Groizeleau // Mer et Marine [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.meretmarine.com/fr/marine-marchande/model-ships-work-not-play>

Поступила в редакцию 16.03.2023.

Особенности устройства трехфазных сетей на морских судах зарубежной постройки

Рак Александр Николаевич, канд. техн. наук, доцент, lion15ua@rambler.ru

Камчатский государственный технический университет, г. Петропавловск-Камчатский

В работе рассмотрены особенности устройства трехфазных сетей на морских судах, построенных в соответствии с требованиями зарубежных классификационных обществ – Американского бюро судоходства (ABS) и японского Nippon Kaiji kyokai (ClassNK). Проанализированы вопросы, связанные с частотой питающей сети. Приведены основные расчетные соотношения, которые позволяют получить заданные величины рабочих напряжений с учетом их конструктивных особенностей. Рассмотрен вопрос, связанный с особенностями монтажных работ и обслуживания электроустановок.

Ключевые слова: трехфазная цепь, частота, трансформатор, схема соединения, рабочее напряжение.

Features of three-phase networks on foreign-built ships

Rak Alexandr N., PhD, Associated Professor, lion15ua@rambler.ru

Kamchatka State Technical University, Petropavlovsk-Kamchatsky

The paper considers peculiarities of three-phase network arrangement on sea-going ships built in accordance with requirements of American Bureau of Shipping (ABS) and Japanese Nippon Kaiji kyokai (ClassNK) classification societies. The issues related to frequency of power supply network are analyzed. The basic calculation ratios which allow to receive the specified values of operating voltages in view of their design features are resulted. Consideration is given to the specifics of installation and maintenance of electrical installations.

Keywords: three-phase circuit, frequency, transformer, connection diagram, operating voltage.

В настоящее время многие специалисты, связанные с эксплуатацией судового электро-механического оборудования, работают на иностранных судах, построенных в соответствии с требованиями различных зарубежных классификационных обществ, например, Регистр Ллойда (LR), Американское бюро судоходства (ABS), Nippon Kaiji kyokai (ClassNK) и др. Во время работы они часто сталкиваются с некоторыми особенностями построения трехфазных систем электроснабжения, в частности, с несоответствием частоты питающей сети отечественной величине напряжения.

Это обусловлено целым рядом причин объективного характера. За время существования СССР до 1991 г. часть морских судов строилась на отечественных судостроительных предприятиях или по заказу СССР в кооперации со странами СЭВ (Совета экономической взаимопомощи), а часть – закупалась на зарубежном первичном или вторичном рынках. При этом, электрооборудование судов, построенных в соответствии с требованиями Российского морского регистра судоходства, было унифицированным и соответствовало, в основном, требованиям стандартов СССР в части величин напряжений и частоты питающей сети.

После 1991 г. ситуация на отечественном флоте ухудшилась по известным историческим причинам, а на мировом флоте начали происходить некоторые изменения. Так, на судостроительных заводах ряда стран Европы стали преобладать стандарты DIN (ФРГ). Под их влиянием еще в мае 1987 г. в соответствии с нормами DIN IEC 60038 был определен всемирный переход трехфазных низковольтных контактных электрических сетей и сетей электроснабжения с напряжений 220/380 В и 240/415 В на единое напряжение 230/400 В, который завершился в январе 2003 г. К основным параметрам сети питания относятся, главным образом, номинальное напряжение и частота сети. Значения этих параметров закреплены международными соглашениями.

Так, в соответствии с требованиями DIN IEC 60038 на время переходного периода допускалось иметь различные отклонения от номинального напряжения, представленные в табл. 1.

Таблица 1 — Унификация уровней напряжений и допустимых отклонений от нормы в соответствии с требованиями IEC 60038

Годы	Номинальные напряжения	Допустимые отклонения
До 1987	220 В/380 В	-10 % ... +10 %
1988 – 2003	230 В/400 В	-10 % ... +6 %
После 2003	230 В/400 В	-10 % ... +10 %

Нормы Международной электротехнической комиссии (IEC) носят рекомендательный характер и должны быть подтверждены национальными стандартами. Если с требованиями IEC 60038 все понятно, то с особенностями построения систем электроснабжения в США и нормами ABS необходимо разобраться.

При изучении раздела «Трехфазные цепи переменного тока» в рамках курса «Теоретические основы электротехники» отмечается, что трехфазные цепи имеют целый ряд преимуществ перед однофазными, а именно: сокращение проводниковых материалов соединительных линий (воздушных (ВЛ) и кабельных (КЛ)); возможность присоединения к трехфазной сети однофазных приемников, что делает нецелесообразным создание на предприятиях обособленных однофазных систем электроснабжения; сравнительная простота устройств для создания синусоидальных ЭДС; возможность применения более надежных и дешевых асинхронных машин. Подчеркивается, что частота питающей сети в большинстве стран Европы и Азии – 50 Гц, а в США – 60 Гц. В учебных материалах рассматриваются основные схемы соединений трехфазных цепей – «звезда» и «треугольник», а также приводятся основные соотношения между линейными и фазными напряжениями (токами) для них. При этом, основное внимание уделяется именно отечественному опыту эксплуатации трехфазных цепей [1].

Цель данной статьи – показать особенности устройства трехфазных цепей в соответствии с требованиями ABS и ClassNK.

Во-первых, остановимся на вопросе частоты питающей сети. Здесь существует несколько точек зрения, и каждая из них имеет под собой серьезные теоретические обоснования. Частота тока в сети могла быть принята в пределах от 25 до 133 Гц. Исторически сложилось так, что первый стандарт для переменного тока был принят в США под влиянием Н. Тесла, который в то время был научным консультантом фирмы «Westinghouse» (конкурента фирмы Т. Эдисона). Н. Тесла настоял на 60 Гц, поскольку эту цифра вписывалась в систему определенных временных характеристик переменного тока, в частности, периода. В Европе частота 50 Гц была принята позднее по рекомендациям русского ученого М. О. Доливо-Добровольского – научного консультанта фирмы «Siemens». С тех пор между этими фирмами происходит негласное соревнование за пальму первенства и «законодательство мод» при внедрении know how в области электротехнологий.

На самом деле, это более или менее произвольное техническое решение. Никакой существенной разницы с точки зрения производства электрической энергии такое изменение частоты в диапазоне 50-60 Гц не дает. Однако при возрастании частоты несколько возрастают потери энергии в линии электропередач (ЛЭП), которые связаны с нагреванием и вихревыми

тока. Обычно они не велики, но при снижении частоты с 60 до 50 Гц происходит их уменьшение на 30 %. Дальнейшее снижение частоты нежелательно, поскольку начинают возрастать габариты некоторых электротехнических устройств, а при частоте 25-30 Гц становится заметным мигание ламп накаливания.

При увеличении частоты питающей сети необходимо усиливать конструкцию генераторов, но усиливать до бесконечности нельзя, поскольку все конструкционные материалы обладают пределом прочности. Например, при частоте 60 Гц износ подшипников турбин выше, а значит и выше вероятность аварии. Таким образом, частота 50-60 Гц – компромиссный вариант из множества технических ограничений.

Более высокие частоты, например, 400 Гц применяются, как правило, в бортовых сетях воздушных судов (самолетов). Так, с увеличением частоты уменьшаются массогабаритные показатели трансформаторов и исполнительных электродвигателей. В этом случае исполнительные двигатели, как правило, являются маломощными, а основные системы управления на воздушных судах являются электрогидравлическими. Их основная цель – обеспечение значительных усилий при незначительном электрическом сигнале.

Еще одним важным вопросом является электромагнитная совместимость. Например, в Японии исторически сложилось так, что в одной части страны частота питающей сети 50 Гц, а в другой – 60 Гц. После аварии на АЭС в г. Фукусима и отключения большинства соседних АЭС в стране возникли проблемы с электроснабжением пострадавших районов. Между сетями с различной частотой была установлена преобразовательная станция мощности, где происходило преобразование энергии, но ее мощность была рассчитана на баланс нагрузок в нормальном режиме, а не в аварийном.

Таким образом, выбор между 50 и 60 Гц является произвольным, но важно, чтобы частота питающей сети была одинаковой для большей части страны.

Необходимо обратить внимание, что несоответствие частоты сети для судов, построенных в соответствии с требованиями ABS и ClassNK, может сдерживать соблюдение норм конвенции MARPOL 73/78 в части сокращения выбросов с них, а именно, присоединение к береговым электрическим сетям при выполнении грузовых операций в портах. Для этого на причальных сооружениях должно быть установлено специальное электрооборудование для обеспечения электромагнитной совместимости.

Во-вторых, важным вопросом является величина рабочих напряжений в сети. В 1878 г. Т. Эдисон изобрел электрическую лампу накаливания с угольной нитью. Расчетным путем изобретатель определил оптимальное напряжение для ламп данного типа – 100 В. Еще 10 % он учел для покрытия потерь напряжения в соединительных проводах.

С тех пор как в СССР, так и в США длительное время применялось напряжение 100-127 В. Однако в середине 60-х годов XX в. при увеличении количества потребителей сеть не могла с этим справиться. Следует отметить, что при использовании более низкого напряжения в устройствах с одинаковой мощностью, потребляемый ток будет большим, что приведет к возрастанию потерь при передаче энергии в соответствии с законом Джоуля-Ленца. Так, потери энергии в сетях с более высоким напряжением будут в четыре раза ниже, нежели в сетях с 110 В. Поэтому для снижения потерь необходимо было или увеличивать сечение проводников, или повышать напряжение сети. Экономически целесообразным оказался вариант перехода к более высокому напряжению. Следующая глобальная электрификация страны привела к тому, что стандарт 220 В с частотой 50 Гц стал основным на территории бывшего СССР.

Почему тогда США, несмотря на всю очевидность преимуществ более высокого напряжения, не перешли на 220 В? Ответ скрывается в экономической невыгодности таких реформ, а именно:

- сеть 110-127 В – это возможность борьбы с импортом техники, т. к. американцы в своем большинстве используют электротехнические устройства собственного производства;
- поражение электрическим током при 110 В менее опасно, нежели при 220 В (во многом зависит от времени влияния тока);

– переход на новую сеть – миллиардные затраты на перестройку подстанций и другого электрооборудования.

Теперь перейдем непосредственно к конкретным схемам трехфазных цепей. Мы привыкли к тому, что в европейских и отечественных системах электроснабжения может быть три или четыре провода [1], но в США и Японии ситуация обстоит иначе.

Начнем с того, что в США напряжение сети может быть 120 В и 240 В. Почему так происходит? Как они получаются и почему одно из них вдвое выше другого? В 1880 г. Т. Эдисон запатентовал технологию передачи энергии *постоянного* тока с напряжением, для которого необходимо было три провода: *нулевой, положительный и отрицательный* для питания ламп накаливания.

Аналогичную технологию, но уже *переменного* тока начал первым продвигать Дж. Вестингауз, который указал на очень большие потери энергии в сетях постоянного тока. Эта система имеет два плеча одной фазы и заземленную среднюю точку (рис. 1). В настоящее время эта схема применяется в выпрямительных установках и известна под названием *однофазная двухполупериодная с нулевым выводом*. Относительно нулевой точки напряжения находятся в противофазе. В США фазы имеют специфическое название «Hot». Одна фаза вторичной обмотки понижающего трансформатора подключена к сети напряжением 120/240 В.

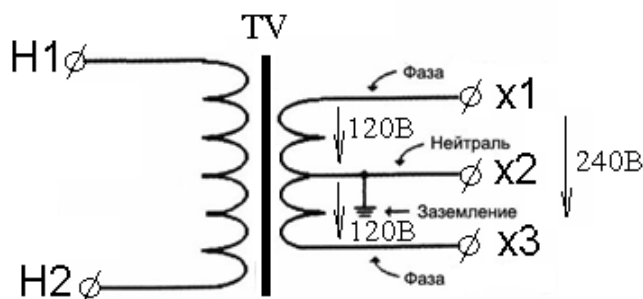


Рисунок 1 — Схема получения разных величин напряжения

В американской научно-технической литературе кроме системы 120/240 В можно встретить и другие системы, например, 120/208 В (Large residential buildings frequently have 120/208 V 3-phase power, with large appliances being connected between two of the phases, giving a voltage of 208 volts); 277/480 В. Фактически это напряжение составляет 127 В. Именно к нему идет привязка остальных основных напряжений. Пересчет выполняется следующим образом: $(127 + 127) \cdot 1,1 = 279$ В.

Для схемы соединения «звезда» (рис. 2) при известной величине фазного рабочего напряжения 120 В линейное напряжение составит: $120 \cdot 1,73 = 208$ В.

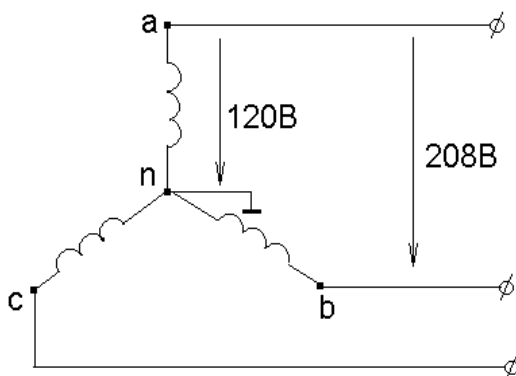


Рисунок 2 — Получение рабочих напряжений в схеме соединения «звезда»

При изучении раздела «Трехфазные цепи» всегда указывается, что в схеме соединения «треугольник» мы получаем одну величину рабочего напряжения $U_{\text{л}}=U_{\text{ф}}$, что является недостатком, в отличие от схемы соединения «звезда», где мы имеем две величины рабочего напряжения $U_{\text{л}}$ и $U_{\text{ф}}$, причем $U_{\text{л}}=\sqrt{3}U_{\text{ф}}$ [1]. Более детальное рассмотрение схемы соединения «треугольник», с учетом изложенного выше и схемы (рис. 1), позволяет сделать вывод, что для нее можно получить еще одну величину рабочего напряжения (рис. 3).

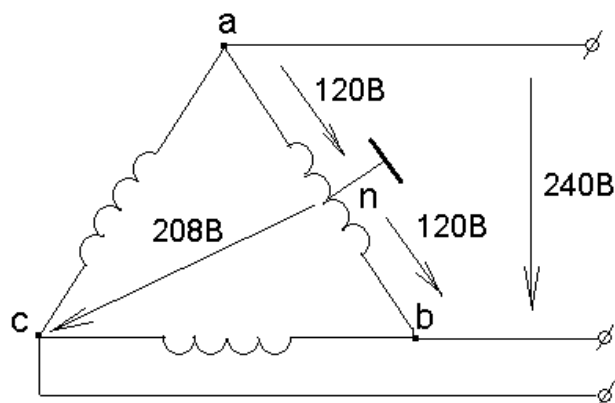


Рисунок 3 — Получение рабочих напряжений в схеме соединения «треугольник»

По известной из курса математики теореме косинусов из рис. 3 получаем:

$$U_{cn}^2 = U_{bc}^2 + U_{nb}^2 - 2U_{bc} \cdot U_{nb} \cdot \cos 60^\circ = 240^2 + 120^2 - 2 \cdot 240 \cdot 120 \cdot 0,5 = 43264, \quad (1)$$

откуда получаем $U_{cn} = 208$ В.

Теперь перейдем к судовым трехфазным системам. Для судовых систем в соответствии с требованиями ABS величина рабочих напряжений должна составлять 277/480 В 60 Гц. Пересчетом получаем: $480/1,73 = 277$ В. При этом, рабочей считается величина $440 \pm 10\%$ В.

Тогда для схемы соединения «треугольник» получаем величины рабочих напряжений (рис. 4). Несложно выполнить пересчет основных параметров и для схемы соединения «звезда».

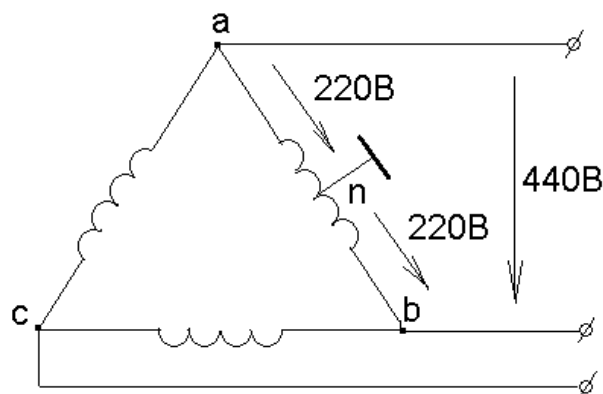


Рисунок 4 — Получение рабочих напряжений для схемы соединения «треугольник» на морских судах в соответствии с требованиями ABS

Подходы к построению трехфазных сетей в Японии сложились в основном под влиянием США. Конструктивно они ничем не отличаются. Отличие состоит только в величинах напряжений, см. табл. 2.

Выше мы немного касались особенностей электроэнергетической системы Японии, а теперь рассмотрим ее особенности. Японская национальная электрическая система является по своему уникальной и предназначена для питания не только трехфазных, но и однофазных потребителей.

Таблица 2 — Величина рабочих напряжений питающей сети в Японии

Преимущественное распространение	Частота, Гц	Низкое напряжение, В		Высокое напряжение, В
		200/100 (К) 100(L)	200/100 (Н) (К)	
Восточная Япония	50±0,2	200/100 (К) 100(L)	200/100 (Н) (К)	6,6кВ
Западная Япония	60±0,1	210/105 (К) 200/100 (К) 100(L)	210/105 (К) 200/100 (К) 100(L)	22кВ 6,6кВ

Трехфазное напряжение питания составляет 200 В при 50 Гц (Восточная Япония) и 200 В или 210 В при 60 Гц (Западная Япония). Трехфазное напряжение (L-L-L) 200 В будет иметь однофазное напряжение (L-N) 115 В, а трехфазное напряжение 210 В будет иметь однофазное напряжение 121 В.

Если для питания электрооборудования, соответствующего национальной системе распределения электроэнергии Японии, требуется генератор переменного тока, то конфигурация обмоток статора, соответствующая каждому из кодов Н, К или L, представлена на рис. 5.

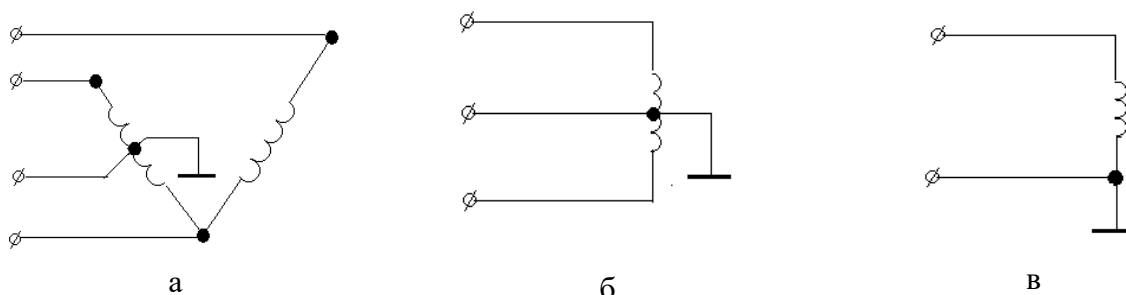


Рисунок 5 — Коды конфигураций соединений, принятых в Японии:

Н – открытый «треугольник»; трехфазная четырехпроводная с заземленной средней точкой (а), обмотки генератора также могут быть соединены на полный «треугольник»; К – однофазная трехпроводная с заземленной средней точкой (б); L – однофазная двухпроводная с одним заземленным проводом (в)

Схема получения требуемых значений напряжений в трехфазных цепях Японии представлена на рис. 6.

Номинальные напряжения обмоток статора следует выбирать из ассортимента продукции, характерной для национальной системы распределения электроэнергии Японии.

Восточная Япония – 200 В/100 В 50 Гц.

Генератор переменного тока на частоте 50 Гц, оснащенный стандартной обмоткой и подключенный по схеме «параллельная звезда», имеет номинальное рабочее трехфазное напряжение 200 В (L-L-L) с уровнем потока, эквивалентным номинальному напряжению 400 В, 50 Гц с более стандартным подключением по схеме «звезда». Диапазон напряжения обмотки при частоте 50 Гц при стандартном соединении «звезда» и дополнительном соединении «параллельная звезда» следующий:

- диапазон напряжений при соединении обмоток в «звезду» при 50 Гц: 380/220 В, 400/231 В, 415/240 В;
- диапазон напряжения при параллельном соединении в «звезду» при частоте 50 Гц: 190/110 В, 200/115 В, 208/120 В.

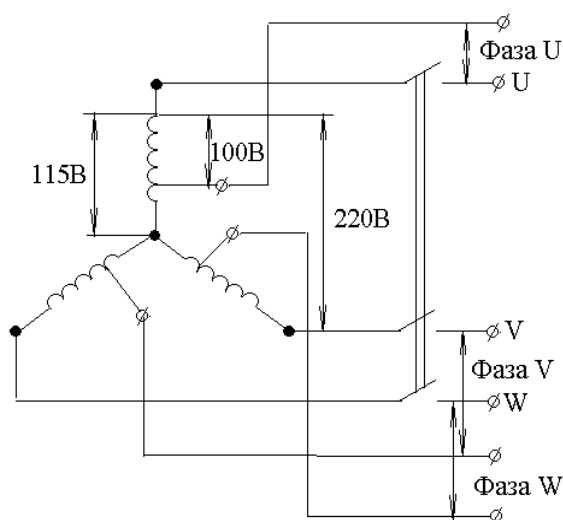


Рисунок 6 — Получение требуемых значений напряжений в трехфазных цепях Японии

Однако однофазное (L-N) напряжение будет 115 В, что слишком высоко, поскольку японское электрооборудование допускает $100 \text{ В} \pm 10\%$. Итак, необходимо установить компромисс, а именно: если однофазное (L-N) напряжение подается при $+8\% = 108 \text{ В}$, то трехфазное (L-L-L) напряжение будет 187 В. 187 В – это 200 В – 6,5%. Итак, напряжение в системе является компромиссным, но не приведет к каким-либо проблемам с подключенным оборудованием.

Западная Япония – 210/105 В и 200/100 В, 60 Гц.

Для областей Японии, которые снабжаются напряжением при частоте сети 60 Гц диапазон напряжений ориентирован на соответствие требованиям к напряжению 60 Гц во всем мире со стандартным соединением «звезда» и дополнительным соединением «параллельная звезда»:

- диапазон напряжений при соединении обмоток статора в «звезду» при 60 Гц: 416/240 В, 440/254 В, 480/277 В;
- диапазон напряжения при соединении в «параллельную звезду» при частоте 60 Гц: 208/120 В, 220/127 В, 240/138 В.

Обмотка может использоваться для питания трехфазным током минимум до 190/110 В, 60 Гц при подключении по схеме «параллельная звезда». Однако для этой работы с низким уровнем потока потребуется подходящее снижение скорости. Для достижения однофазного напряжения $105 \text{ В} \pm 10\%$ необходимо найти компромисс.

Если однофазное (L-N) напряжение подается при $+5\% = 110 \text{ В}$, то трехфазное (L-L-L) напряжение будет 190 В. 190 В – это 210 В – 9,5%. Итак, системное напряжение является компромиссным, но не приведет к каким-либо проблемам с подключенным оборудованием.

Кроме того, мы знаем, что обмотка, соединенная по схеме «параллельная звезда» и работающая при трехфазном напряжении 210 В, 60 Гц, имеет уровень магнитного потока примерно 85% от проектного, равного 100%. Для информации, идеальное напряжение подключения при соединении по схеме «звезда» составляет 498 В, 60 Гц для 100% потока.

Подчеркнем, что прием нагрузки при этих рабочих параметрах, даже при снижении номинальных характеристик, будет плохим, поскольку уровень магнитного потока слишком низок.

Для обеспечения заданных величин напряжений в практике эксплуатации трехфазных цепей в США широко применяются трехфазные трансформаторные группы. Их основные преимущества и недостатки представлены в [3, 4].

На судах с генерацией высоковольтного напряжения обеспечение заданных уровней напряжения осуществляется трансформированием энергии. При этом, в схеме используются несколько трансформаторов напряжением 0,44/0,22 кВ, например, три рабочих плюс один запасной. В случае неисправности трансформатора его заменяют запасным трансформатором. В случае выхода из строя двух трансформаторов оставшиеся трансформаторы соединяются в V-образный, или открытый, «треугольник». Эта схема представлена на рис. 7.

Отметим, что схема соединения «открытый треугольник» в силовых электроустановках редко используется, но в цепях измерения, учета и сложных релейных защит находит самое широкое применение.

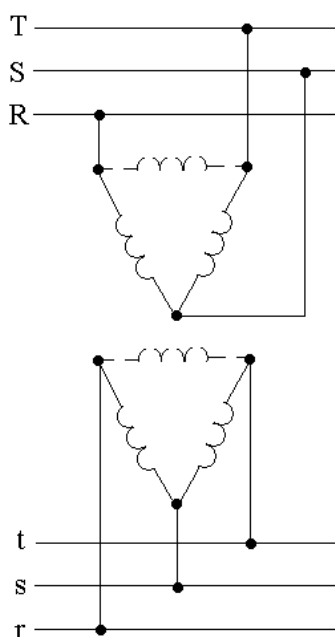


Рисунок 7 — Схема подключения трехфазного трансформатора по схеме «открытого треугольника»

На рис. 7 в «открытый треугольник» соединены два однофазных силовых трансформатора. Это равносильно тому, что из трехфазной группы один трансформатор попросту отсоединен, но все внешние выводы как с первичной, так и со вторичной стороны оставлены.

Особенности такого соединения состоят в следующем. В фазах rs и st протекают линейные токи, сдвинутые по фазе при активной нагрузке относительно соответствующих фазных напряжений на 30° . Значит, каждый трансформатор при активной нагрузке работает с $\cos\varphi=0,866$ (а не $\cos\varphi=1$). Поэтому отдаваемая мощность двух трансформаторов, соединенных в «открытый треугольник», составляет не $2/3$, а только 58 % ($2/3$ от 86,6 %) мощности, которая была бы при «закрытом треугольнике».

Также следует обратить внимание на особенности выполнения монтажных работ в соответствии со стандартом ABS. Монтажные работы и обслуживание электрических установок связаны не только с обеспечением надежности, но и с безопасностью, что требует исключения ошибки. Для этого разработана система цветовых обозначений изоляции жил, определяющая цвета проводника: фаза, нуль и земля. В табл. 3 представлена система цветовой маркировки проводников и шин в разных странах.

Таблица 3 — Цветовая маркировка (расшифровка) проводников и шин в разных странах

Страна/регион	Цвет внешней изоляции проводника (шины)				
	Фазный проводник 1	Фазный проводник 2	Фазный проводник 3	Нейтральный проводник	Защитный проводник
Европа и все страны, применяющие стандарт CENELEC (IEC 60446) – с апреля 2004 г. Великобритания с 31 мая 2004 г. Гонконг с июля 2007 г. Сингапур с марта 2009 г. РФ с 2009 г.	коричневый	черный	серый	синий	зелено-желтый
США – общепринятые в эксплуатации цвета (120/208/240В)	черный	красный	синий	серебристый	без изоляции; зеленый или зелено-желтый
США – альтернативная система цветов (277/480В)	коричневый	оранжевый или фиолетовый	желтый	серый	зеленый
<p>- В соответствии с ПУЭ на переменном токе шины фазы А обозначались желтым цветом, шины фазы В – зеленым цветом, шины фазы С – красным, с буквенным кодированием в алфавитном порядке начальных букв в названии цветов Ж, З, К. Такая схема с принятием ГОСТ Р 50462-2009 заменена стандартной кодировкой CENELEC (IEC 60446).</p> <p>- С 1975 г. Национальный электрический кодекс (США) не регламентирует цветовое обозначение фазных проводов. Представленные в таблице цвета являются общепринятыми в эксплуатации.</p> <p>- Нейтраль трансформатора или генератора, не присоединенная к заземляющему устройству или присоединенная к нему через большое сопротивление приборов сигнализации, измерений, защиты и др. аналогичных им устройств.</p>					

Заключение

При создании электрооборудования и систем электроснабжения в США придерживаются исторически сложившихся традиций, как в части частоты питающей сети, так и в части величин рабочих напряжений, что обусловлено показателями: экономическими, безопасности и борьбой с импортной электротехнической продукцией.

Устройство трехфазных систем электроснабжения в США и Японии имеет некоторые конструктивные особенности для получения разных величин напряжений и этим отличается от отечественных. В них очень широко применяются трехфазные трансформаторные группы. Их применение является более дорогим, чем трехфазных трехстержневых трансформаторов той же мощности, они имеют меньший КПД и занимают больше места, но при этом они более надежны.

Для морских судов, построенных в соответствии с требованиями ABS и ClassNK, для обеспечения требований конвенции MARPOL 73/78 в части контроля выбросов очень важным остается вопрос обеспечения электромагнитной совместимости, а именно частоты питающей сети и величин рабочих напряжений при питании от береговых систем электроснабжения в портах заходов.

Список литературы

1. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи: учебник для бакалавров / Л. А. Бессонов. – 12-е изд., испр. и доп. – М.: Издательство Юрайт, 2016. – 701 с. – Серия: Бакалавр. Углубленный курс.
2. Правила устройства электроустановок (седьмое издание). Все действующие разделы ПУЭ-7. – М.: Моркнига, 2022. – 584 с.
3. Усольцев, А.А. Электрические машины. Учебное пособие. – СПб: НИУ ИТМО, 2013. – 416 с.
4. Костенко, М. П., Пиотровский, Л. М. Электрические машины. В 2-х ч. Ч. 1. Машины постоянного тока. Трансформаторы. Учебник для студентов высш. техн. учеб. заведений. –Л.: «Энергия», 1972. – 544 с.

Поступила в редакцию 08.11.2022.

О перспективах развития судовых гребных электрических установок

Рак Александр Николаевич, канд. техн. наук, доцент, lion15ua@rambler.ru

Камчатский государственный технический университет, г. Петропавловск-Камчатский

В работе рассмотрены вопросы, связанные с исследованием факторов, влияющих на разработку рациональных схем гребных электрических установок с учетом современного уровня развития электротехнологий в морской отрасли, ценовой политики и их соответствия экологическим требованиям. Здесь были использованы расчетные соотношения, приведенные в открытых источниках и соответствующие требованиям ИМО. Проанализирован не только опыт ведущих отечественных и зарубежных предприятий-производителей основного судового электромеханического оборудования, их новейшие и перспективные разработки, но также приведены собственные исследования и наблюдения. Показано, что, несмотря на целый ряд преимуществ электрических систем перед механическими, в ближайшей перспективе основными источниками электрической энергии для приведения в действия генераторов будут дизельные генераторы с углеводородными видами топлива. В среднесрочной перспективе в связи с ужесточением экологических требований в ближайшее время произойдет переход на газообразные виды топлива, что позволит с незначительными конструктивными изменениями повысить мощность существующих дизельных генераторов. Установлено, что применение чисто аккумуляторных систем имеет ограниченный характер в виду значительных массогабаритных показателей, ценовых показателей и маршрутов. В отдаленной перспективе водородные топливные элементы при постоянном совершенствовании технологического уровня его производства, хранения и развития соответствующей инфраструктуры смогут рассматриваться в качестве реальной альтернативы углеводородным видам топлива на морском транспорте.

Ключевые слова: дизельные генераторы, гребная электрическая установка, твердотельный генератор, аккумуляторная система, комбинированная система, топливо.

On the prospects for the development of shipboard propulsion systems

Rak Alexandr N., PhD, Associated Professor, lion15ua@rambler.ru

Kamchatka State Technical University, Petropavlovsk-Kamchatsky

The paper deals with issues related to the study of factors influencing the development of rational schemes of propulsion electrical installations, taking into account the current level of development of electrical technologies in the maritime industry, pricing policy and their compliance with environmental requirements. Here, the calculated ratios given in open sources and corresponding to IMO requirements were used. The experience of leading domestic and foreign manufacturers of the main marine electromechanical equipment, their latest and promising developments, as well as their own research and observations are analyzed. It is shown that despite the advantages of electrical systems over mechanical ones, in the near future, the main sources of electrical energy for driving generators will be diesel generators with hydrocarbon fuels. In medium term perspectives in connection with the tightening of environmental requirements, in the near future there will be a transition to gaseous fuels, which will allow, with minor design changes, to increase the capacity of existing diesel generators. It has been established that the use of purely battery systems is limited due to significant weight

and size indicators, price indicators and routes. In the long term, hydrogen fuel cells, with the constant improvement of the technological level of its production, storage and development of the corresponding infrastructure, can be considered as a real alternative to hydrocarbon fuels in maritime transport.

Key words: diesel generators, propulsion power plant, solid state generator, battery system, combined system, fuel.

Применение судовых гребных электрических установок (ГЭУ), связано с именем русского академика Б. С. Якоби, который еще в 1834 г. создал электрическую машину с непрерывным круговым движением, а впоследствии, в 1836 г., установил ее на катер для вращения гребных колес – первый в мире электроход. Питание электродвигателя осуществлялось от батареи гальванических элементов (БГЭ). Однако уровень развития электротехнологий того времени был невысок: энергоемкость первых БГЭ и эффективность колесного движителя и, соответственно, скорость движения в 1,5 узла надолго сдержали развитие ГЭУ на флоте.

Развитие ГЭУ на флоте началось с промышленного производства свинцово-кислотных аккумуляторов (1883-1884 гг.) и установки в 1895 г. на подводной лодке (ПЛ) “Holland VII” двигателя внутреннего сгорания (ДВС) для надводного хода. Так появилось понятие автономности длительного движения судна без использования ДВС, что надолго предопределило применение ГЭУ на военном подводном флоте.

Однако высокие массогабаритные показатели ГЭУ, существенно превосходящие чисто механическую передачу, в сочетании с гибкостью выработки и распределения мощности, привели к развитию ГЭУ на гражданском флоте.

Уровень развития электротехнологий во второй половине XX в. открыл путь к широкому применению ГЭУ на ледоколах и судах ледового плавания. В порядке наработки опыта эксплуатации строятся транспортные и рыболовные суда с ГЭУ.

Главными преимуществами ГЭУ являются:

- повышение надежности судовых энергетических систем (СЭС) и импульсивных комплексов;
- улучшение маневренности судна;
- повышение КПД ГЭУ на частичных режимах;
- снижение эксплуатационных затрат;
- снижение сроков ремонтных работ;
- снижение вредных выбросов в атмосферу;
- возможность более рационального размещения оборудования на судне, что предполагает увеличение грузоподъемности судна, прежде всего за счет уменьшения размеров машинного отделения.

Выбор той или иной схемы ГЭУ не является только техническим заданием, но также требует решения экологических и ценовых вопросов.

Целью данной статьи является исследование факторов, влияющих на разработку рациональных схем ГЭУ, с учетом современного уровня развития электротехнологий, ценовой политики и их соответствия экологическим требованиям.

В данной работе использовались расчетные соотношения, приведенные в открытых источниках и соответствующие требованиям Международной морской организации (ИМО), учитывались рекомендации ведущих зарубежных фирм и отечественных предприятий-производителей судового механического и электромеханического оборудования, их новейшие и перспективные разработки, а также собственные исследования и наблюдения.

Для оценки перспектив возможного развития ГЭУ рассмотрим схему обобщенной судовой электроэнергетической системы (рис. 1).

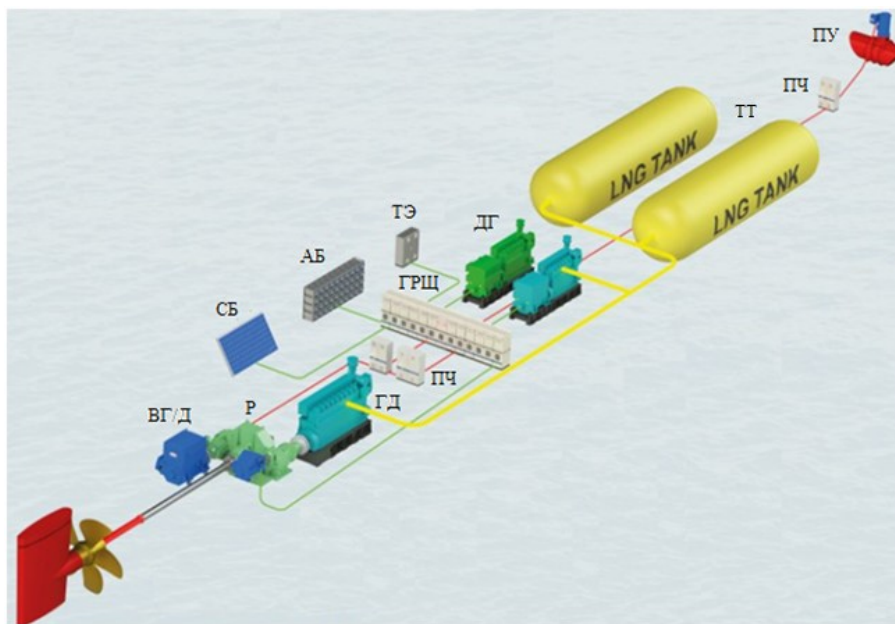


Рисунок 1 — Обобщенная судовая электроэнергетическая система:
 главный двигатель (ГД); дизельные генераторы (ДГ); валогенератор/двигатель (ВГ/Д).
 В качестве ГЭУ можно использовать также винторулевые колонки (ВРК) и системы «Азипод»;
 редуктор (Р); солнечные батареи (СБ); аккумуляторные батареи (АБ); топливные элементы (ТЭ)
 (водородные или аммиачные по принципу действия как водородные); главный распреде-
 лительный щит (ГРЩ); подруливающее устройство (ПУ); преобразователь(-и) частоты (ПЧ);
 топливные танки (ТТ)

Исходя из анализа рис. 1, схемы ГЭУ можно классифицировать по различным признакам, которые представлены на рис. 2.

Вопросы, связанные с определением и исследованием параметров вспомогательно-аварийного дизель-электрического движения, были детально изложены в [1], а для вспомогательного с электрическими и электрогидравлическими подруливающими устройствами – в [2, 3].

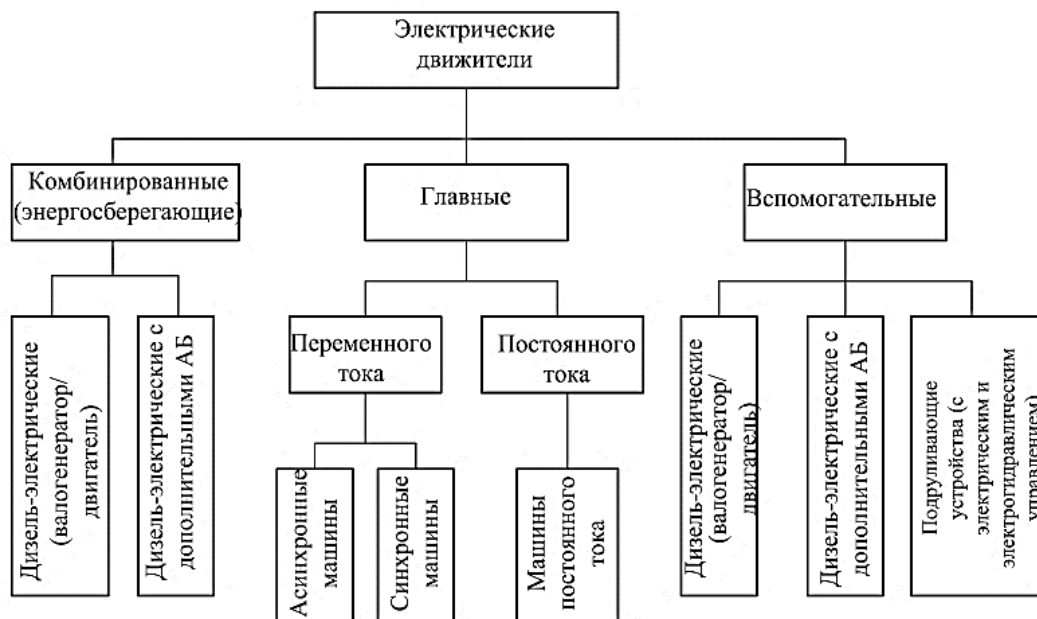


Рисунок 2 — Классификация гребных электрических установок

Для выполнения дальнейших исследований следует определиться с первичными двигателями. Типовые КПД и области применения первичных двигателей в соответствии со стандартом ISO 3046 представлены на рис. 3.

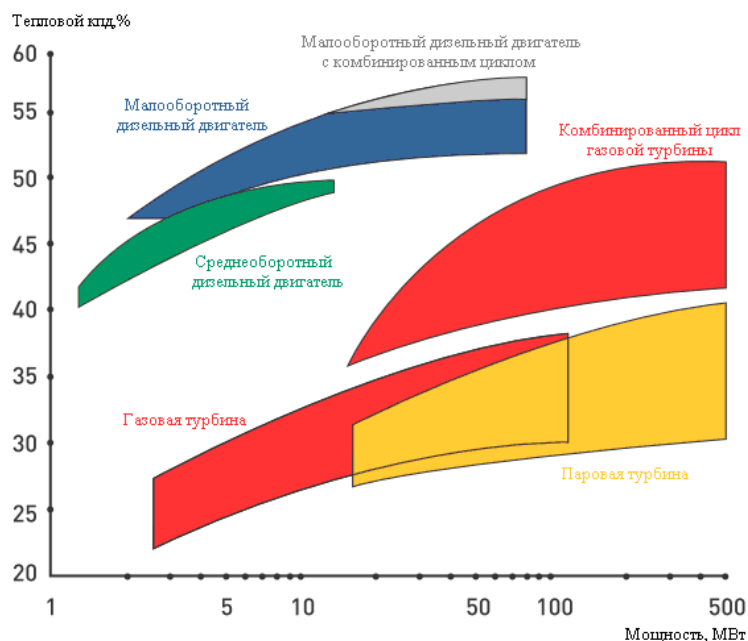


Рисунок 3 — Типовые КПД и области применения первичных двигателей в соответствии со стандартом ISO 3046

Мощность ГД в соответствии с [4] определяется как

$$N = a \cdot Dwt + b, \quad (1)$$

где a, b — значения коэффициентов уравнения для разных типов судов;

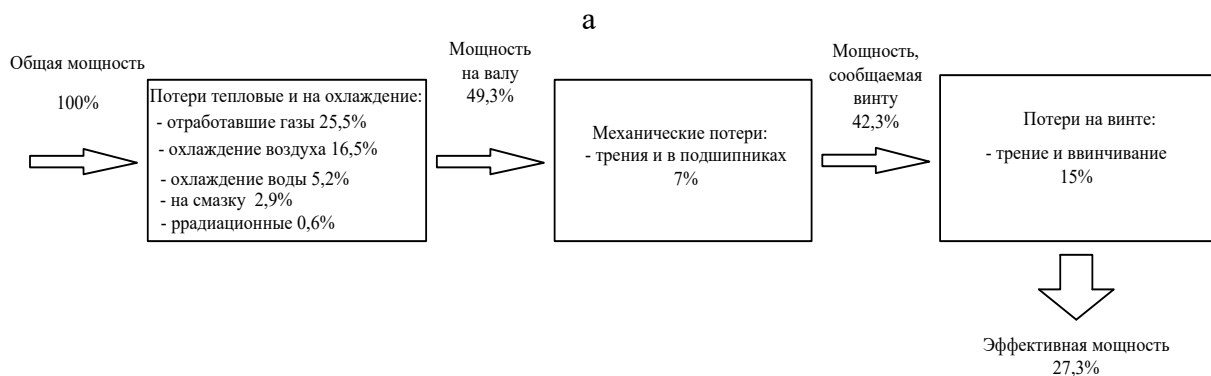
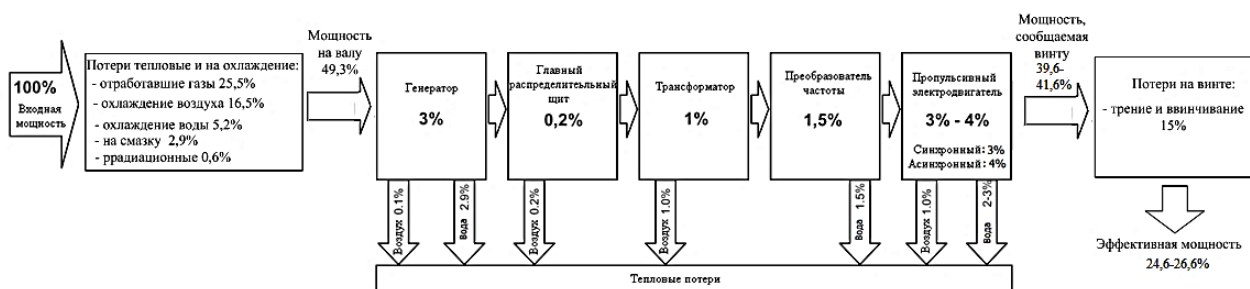
Dwt — дедвейт судов, тыс. т.

Значения составляющих a, b для соотношения (1) приведены в [4] и табл. 1.

Таблица 1 — Параметры a и b , необходимые для определения минимальной мощности главных двигателей различных типов судов

№	Типы судов	a	b
1	Балкеры DWT < 145000 т	0,0763	3374,3
	Балкеры DWT ≥ 145000 т	0,049	7329,0
2	Балкеры DWT < 275825 т	0,0606	4195,2
	Балкеры DWT ≥ 275825 т	0,0273	13366,0
3	Газовозы DWT < 129025 т	0,23	793,6
	Газовозы DWT ≥ 129025 т	0,0097	29224,0
4	Контейнеровозы DWT < 92186 т	0,5843	0,0
	Контейнеровозы DWT ≥ 92186 т	0,054	48886,0
5	Танкеры	0,0602	5495,5
6	Суда для перевозки генеральных грузов	0,152	2399,5
7	Рефрижераторные	0,9809	-1831,2
8	Комбинированные суда	Примерно такая же, как и у танкеров	

Выбор какого-либо из способов движения — дизель-механический, дизель-электрический или комбинированный с применением аккумуляторных батарей — будет зависеть от его эффективности, определяемой КПД. На рис. 4 представлены КПД дизель-электрической и дизель-механической систем.



б

Рисунок — КПД систем:
дизель-электрической (а); дизель-механической (б)

Как отмечалось выше, важными вопросами при разработке систем электрического движения являются экологические, которые досконально изложены в [5, 6].

Одним из важных показателей являются нормы выбросов NO_x с морских судов, представленные на рис. 5. Как следует из рисунка, при частотах вращения 100 об/мин. (что является типовым для малооборотных (МОД) ГД, выпускаемых фирмами MAN B&W и Wärtsilä-Sulzer) уровень выбросов NO_x остается постоянным. Для ГД с частотой вращения 250 об/мин., которая является типовой для фирмы Mitsubishi, выбросы значительно снижаются. Наибольшее снижение достигается при частотах вращения в диапазоне 350-2500 об/мин. – данный диапазон является характерным для средне- (СОД) и высокооборотных (ВОД) ГД, что является весомым аргументом для перехода на ГЭУ.

Кроме этого, с 2020 г. вступили в силу новые требования, серьезно ограничивающие допустимый уровень выбросов окислов серы, азота и парниковых газов (ПГ) в Балтийском, Северном и Средиземном морях. Расширение зон экологического мониторинга морского транспорта и принятие мер по снижению антропогенного воздействия на окружающую среду требуют от судовладельцев выработать стратегию по данному вопросу. При этом не существует универсального решения для всех типов судов, районов плавания, а также различных видов морских перевозок – перевозки массовых грузов, пассажиров, для линейного и трампового судоходства. Поэтому одной из приоритетных задач является обеспечение полного соответствия флота как действующим, так и перспективным нормам международных конвенций.

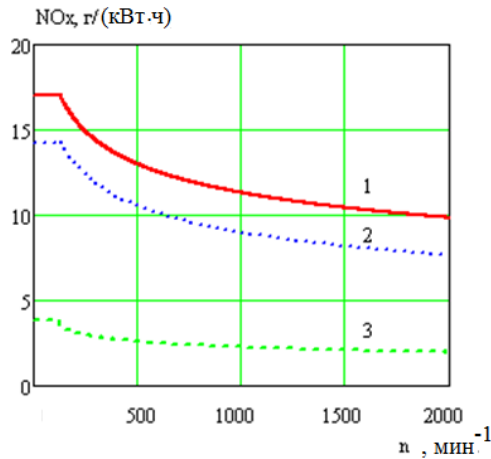


Рисунок 5 — Нормы выбросов NO_x с морских судов:
 1 – уровень I – ГД > 130 кВт – новые суда с 2000 г.;
 2 – уровень II – ГД > 130 кВт – новые суда с 2011 г.;
 3 – уровень III > ГД > 130 кВт – новые суда с 2016 г.
 в зонах контроля выбросов (Emission control areas (ECA):
 Западное и Восточное побережье США, страны Северной Европы)

Так, в соответствии с указанным выше, снижение эмиссии ПГ должно определяться в соответствии с Поправкой к Приложению VI к МАРПОЛ по техническим мерам сокращения выбросов ПГ с судов в соответствии с Резолюцией ИМО МЕРС.203(62), вступившей в силу 1 января 2013 г. при помощи индекса энергоэффективности (Energy Efficiency Design Index – EEDI), который *характеризует энергетические возможности технического средства при наименьших затратах ресурсов для выработки энергии*. Достигнутый индекс должен определяться в соответствии с пересмотренным «Руководством ИМО по методу расчета Конструктивного индекса для новых судов, 2012», приведенным в Резолюции МЕРС.212(63):

$$EEDI = \frac{\left(\prod_{j=1}^M f_j \right) \cdot \left(\sum_{i=1}^{nME} P_{ME(i)} \cdot C_{FME(i)} \cdot SFC_{ME(i)} \right) + (P_{AE} \cdot C_{FAE} \cdot SFC_{AE})}{f_i \cdot f_c \cdot Capacity \cdot v_{ref} \cdot f_w} + \frac{\left(\left(\prod_{j=1}^M f_j \cdot \sum_{i=1}^{nPTI} P_{PTI(i)} - \sum_{i=1}^{neff} f_{eff(i)} \cdot P_{AEff(i)} \right) \cdot C_{FAE} \cdot SFC_{AE} \right) - \left(\sum_{i=1}^{neff} f_{eff(i)} \cdot P_{eff(i)} \cdot C_{FME} \cdot SFC_{ME} \right)}{f_i \cdot f_c \cdot Capacity \cdot v_{ref} \cdot f_w} \quad (2)$$

где SFC – удельный расход топлива двигателя [г/кВт час];

C_F – безразмерный переводной коэффициент между расходом топлива в двигателе (г) и выбросами CO₂ (г), определёнными по содержанию углерода в конкретном топливе [г CO₂ / г топлива]; информация о содержании углерода в различных видах топлива и удельных выбросах CO₂ представлена в [4] и табл. 2;

P_{MEi} – показатель мощности каждого главного двигателя (ГД), равный 75 % от его номинальной мощности за вычетом мощности, потребляемой валогенератором (в случае его наличия);

P_{AE} – показатель требуемой мощности вспомогательных двигателей для обеспечения электроэнергией при максимальной загрузке судна;

P_{PTI} – показатель, равный 75 % от номинальной мощности, потребляемой каждым гребным электродвигателем с учётом механических потерь в нем и без учёта потерь в генераторе;

P_{AEff} – показатель сокращения электрической энергии за счёт использования энергоэффективных технологий (использование отходящего тепла ГД), которые в [4] называют инновационными; в [1, 7] отмечается, что устойчивая работа данных систем возможна только при частоте вращения ГД 40-50 % от номинальной частоты;

P_{eff} – показатель сокращения мощности ГД за счёт применения инновационных технологий в пропульсивной установке при 75 % мощности ГД (фотоэлектрические установки, топливные элементы, ветрогенераторы); в [7] показано, что применение данных установок позволяет повысить индекс энергоэффективности, но они не оказывают решающего влияния на их выбор в качестве основных источников по причине их малой мощности – в десятки-сотни кВт;

f_i – фактор вместимости судна, учитывающий необходимость выполнения требований по ограничению вместимости судна, например, требований, которые применяются к судам ледового класса;

f_j – корректирующий фактор, учитывающий специфическую конструкцию элементов судов, например, судов ледового класса;

f_w – безразмерный коэффициент, учитывающий снижение скорости при определённом неблагоприятном состоянии моря в зависимости от высоты и частоты волны, а также от скорости ветра;

f_{eff} – коэффициент доступности каждой инновационной технологии;

V_{ref} – скорость судна, измеренная на глубокой воде с учётом соответствующей вместимости (дедвейт или валовая вместимость в зависимости от типа судна), в соответствии с вышеуказанным Руководством [узлы].

Более детально с расчетом коэффициентов f_i, f_j, f_w и f_{eff} можно ознакомиться в [4].

Кроме того, Комитет ИМО по охране морской среды (Marine Environment Protection Committee) рассматривает и, по-видимому, примет поправки, согласно которым суда получат категории А, В, С, D, Е в соответствии с EEXI – Индексом энергоэффективности для существующих судов (Energy Efficiency Existing Ship Index), в зависимости от содержания выхлопов двигателей. Чем ниже категория – тем меньше преференции рынка. Суда, получившие категории D и E, будут обязаны предоставить план повышения эффективности для перехода в категорию С. Новый сертификат будет выдан в ходе первого после 31 декабря 2022 г. сюрвея по шестому приложению (IAPP). Для получения сертификата судно должно будет обзавестись одобренным Планом управления энергетической эффективностью судна (SEEMP). Форма и порядок его заполнения нами рассматривался в [7]. Все принятые поправки вступят в силу в 2022 и 2023 годах.

Таблица 2 — Содержание углерода в различных видах топлива и удельные выбросы CO₂

Тип топлива	Ссылка	Низшая теплотворная способность, кДж/кг	Содержание углерода	C _F , т CO ₂ /т топлива
Дизельное/газойль	ISO 8217, сорта от DMX до DMB	42,7	0,8744	3,206
Легкое жидкое топливо (ЛЖТ)	ISO 8217, сорта от RMA до RMD	41,2	0,8594	3,151
Тяжелое жидкое топливо (ТЖТ)	ISO 8217, сорта от RME до RMK	40,2	0,8493	3,114
Сжиженный нефтяной газ (СНГ)	пропан	46,3	0,8182	3,0
	бутан	45,7	0,8264	3,03
Сжиженный природный газ (СПГ)		48	0,75	2,75
Метанол		19,9	0,375	1,375
Этанол		26,8	0,5217	1,913

В табл. 3 приведен сравнительный анализ применения различных видов топлива для судовых ДВС и аккумуляторных систем, а также снижение эмиссии по сравнению с мазутом для уровня II [8].

Таблица 3 — Сравнение альтернативных видов топлива для судовых ДВС и аккумуляторных систем

Типы топлива и источники	Удельная энергия, МДж/кг	Плотность энергии, МДж/л	Соответствующие емкости, м ³	Давление нагнетания, бар	Давление впрыска, бар	Снижение эмиссии по сравнению с мазутом в соответствии с уровнем II		
						SO _x	NO _x	CO ₂
Мазут (HFO)	40,5	35	1,0	7-8	950	SO _x	NO _x	CO ₂
Сжиженный природный газ (LNG-162°C)	50	22	1,59	300/Метан 380/Этан	300/Метан 380/Этан	90-99 90-97	20-30 30-50	24 15
Сжиженный нефтяной газ (LPG (пропан/бутан))	42	26	1,35	50	600-700	90-100	10-15	13-18
Метанол (древесный спирт)	18	15	2,33	10	500	90-97	30-50	5
Этанол	26	21	1,75	10	500	—	—	—
Аммиак (сжиженный -33°C)	18,6	12,5	2,8	50	600-700	—	—	—
Водород (сжиженный -253°C)	142	10	3,5	—	—	—	—	—
Высоко-энергетическая Морская батарейная система	0,5	0,54	64,8	—	—	—	—	—
Элементы Tesla 2170	0,8	2,5	14,0	—	—	—	—	—

Переход к СНГ и СПГ позволит увеличить мощность ДВС ГЭУ при внесении незначительных изменений в систему подачи топлива в соответствии с выражением [9]:

$$N_{НОМ.ГАЗ} = N_{НОМ.ДИЗ} \cdot \left(\frac{C_{F,ДИЗ} \cdot НТС_{ГАЗ}}{C_{F,ГАЗ} \cdot НТС_{ДИЗ}} \right)^{\frac{3}{2}}, \text{ кВт}, \quad (3)$$

где $N_{НОМ.ДИЗ}$ – номинальная мощность на дизельном топливе, кВт;

C_F – безразмерный коэффициент между расходом топлива в двигателе (г) и выбросами CO₂ (г), определенными по содержанию углерода в конкретном топливе (г·CO₂/ г топлива);

НТС – низшая теплотворная способность топлива, кДж/кг.

Одним из возможных видов газообразного топлива, как указано в таблице 1, является водородное. Вообще, сам водород не содержится в чистом виде в природе. Получать его можно из газообразных и жидких углеводородов, где есть С и Н, или из воды, где тоже есть водород. Это два наиболее распространенных и имеющих промышленное значение способов получения водорода, другие способы не представляют практического интереса [10]. Интерес к данной проблеме не случаен. Во-первых, водород считается «зеленым» топливом. Во-вторых, это самый энергоемкий вид топлива. В-третьих, есть технология, которая позволяет без теплового цикла получать из него электроэнергию.

Традиционная цепочка получения электроэнергии имеет значительные потери: на сжигании (тепловые потери), нагрев рабочего тела (вода или пар), механическое вращение ротора турбины или коленчатого вала двигателя, передачу момента на вал генератора и пр. В случае с водородом – в топливных элементах он непосредственно реагирует с кислородом (или кислородом воздуха), в результате получается электроэнергия и тепло, без потерь. При этом получаемое количество электроэнергии из водорода может достигать 60-70 %. В тепловом цикле такой показатель не достигим.

Для успешной реализации проекта необходимо решить ряд проблем. Чтобы топливные элементы обеспечивали мощность 3 МВт в течение 48 часов, требуется около 68 м³ жидкого водорода, для хранения которого требуется намного больше места, чем для дизельного топлива. Для исключения утечек требуются специальные трубопроводы, а сам водород надо хранить при температуре ниже -253 °С. На рис. 6 представлена водородно-воздушная батарея топливных элементов БТЭ-II мощностью 50,0 кВт для энергоустановок мегаваттного класса, а на рис. 7 – судовая гибридная энергетическая установка на основе батарей БТЭ-84 мощностью 60 кВт.

В настоящее время одним из пионеров программы по испытанию судовых ДВС, работающих на чистом водороде, является фирма Wärtsilä (Финляндия). Концепция фирмы основана

на сочетании сжиженного природного газа с паром для получения водорода и CO₂. Произведенный водород будет использоваться непосредственно в смеси с природным газом в ДВС или в ТЭ, что устраняет необходимость хранения водорода на борту. CO₂ будет сжигаться благодаря криогенному потоку, который в любом случае будет использоваться в качестве топлива, а затем сбрасываться на берег для хранения углерода. Танкеры могут использовать сохраненный CO₂ в качестве инертного газа во время выгрузки. Необходимое оборудование легко устанавливается на палубе коммерческого судна. Эта инновационная концепция будет поддерживать постепенный переход морского сектора с СПГ на водород без каких-либо серьезных изменений в судовых технологиях. С постепенным ростом производства водорода потребление ископаемого метана будут сокращаться с той же скоростью [11].

Одним из важных показателей при выборе дизельных двигателей является их цена. Это самая закрытая информация, которую невозможно получить даже из каталожных материалов производителей. Она часто раскрывается только на переговорах при составлении контрактов. Но именно эти данные необходимы на этапе первоначальной проработки какого-либо из проектов. В [12], по результатам исследований особенностей производства судовых и промышленных дизелей, предложена формула для расчета цены, исходя из его основных функциональных характеристик:

$$C = K \cdot \frac{N_e^{0,073} \cdot T^{0,086} \cdot M^{0,763}}{g_e^{2,446} \cdot g_m^{1,138} \cdot S^{0,466}}, \quad (4)$$

где N_e – номинальная эффективная мощность двигателя, кВт;

M – масса, кг;

g_e – удельный расход топлива для режима номинальной мощности, кг/(кВт·ч);

g_m – удельный расход масла для режима номинальной мощности, кг/(кВт·ч);

S – серийность выпуска, у.е. (шт.);

K – коэффициент пропорциональности, 0,023;

T – ресурс до первой переборки, ч.

Показатели степени характеризуют весомость каждого аргумента в формуле. Порядок величин, входящих в (4), приводится в соответствующей нормативно-технической документации.

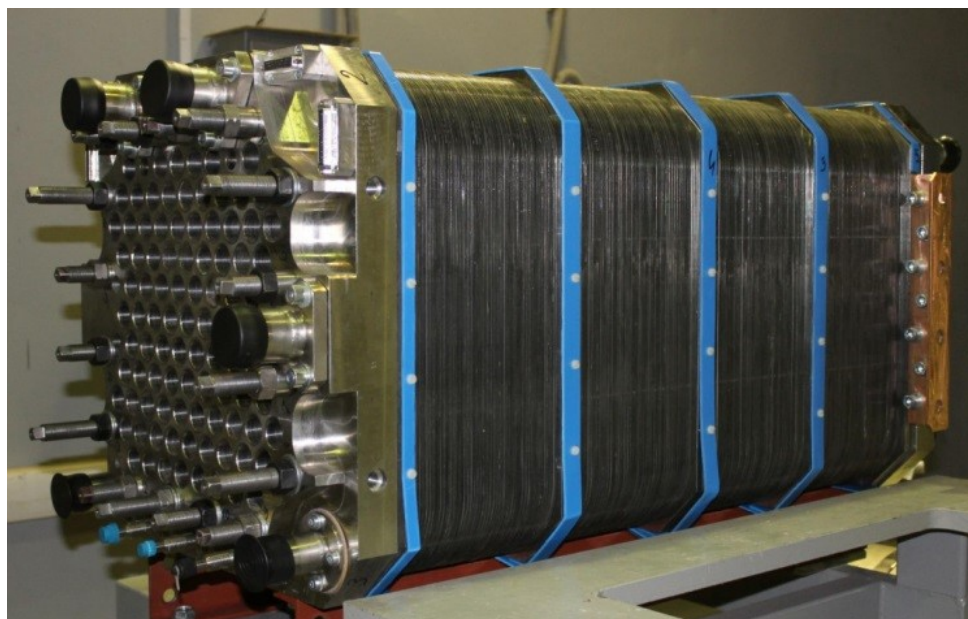


Рисунок 6 — Водородо-воздушная батарея топливных элементов БТЭ-П мощностью 50 кВт для энергоустановок мегаваттного класса. Фото ФГУП «Крыловский государственный научный центр»



Рисунок 7 — Судовая гибридная энергетическая установка на основе батарей БТЭ-84 мощностью 60 кВт/. Фото ЦНИИ СЭТ

Здесь также следует отметить, что рекламируемая мощность, как правило, указывается в соответствии с ISO, без потерь на привод вспомогательных механизмов, размещаемых на двигателе, что приводит к дополнительному увеличению мощности на 5-9 %. В итоге рекламируемая мощность двигателей иностранного производства значительно превышает фактическую длительную мощность. Следствием этого являются завышенные удельные показатели литровой мощности (кВт/л) и удельной массовой мощности (кВт/кг). Информация об удельных расходах топлива МОД, СОД и ВОД представлена в [7].

Для другого электромеханического оборудования ориентировочные цены представлены в [13] и табл. 4.

Таблица 4 — Ориентировочные ценовые показатели электромеханического оборудования

Оборудование	Цена, €/кВт	Тип
Дизельный 4-тактный двигатель	360	Рядный
Дизельный 4-тактный двигатель	340	V-образный с $\varnothing < 32$ См
Дизельный 4-тактный двигатель	280	V-образный с $\varnothing \geq 32$ См
Дизельный генератор	400	$\varnothing < 32$ См
Дизельный генератор	360	$\varnothing \geq 32$ См
Электрическая машина	50	Асинхронная
Одноступенчатый редуктор	30	Максимальное отклонение ± 15 %
Частотный преобразователь	120	С широтно-импульсной модуляцией, линейный коммутирующий преобразователь
Частотный преобразователь	135	Входной преобразователь
Винт регулируемого шага с гребным винтом	100	

Анализ [8] показывает, что значительный прогресс в ГЭУ связан с использованием литий-ионных батарей в составе аккумуляторных систем, но, несмотря на свою привлекательность с экологической точки зрения, имеет ограниченный характер из-за значительных массогабаритных и ценовых показателей, и только для конкретных маршрутов. Их можно использовать в комбинированных ГЭУ как совместно с дизель-генераторными установками, так и индивидуально.

Таблица 5 — Удельная масса, объем и цена больших >1МВт·ч тяжелых литий-ионных батарей (по данным 2019 г.)

	Уровень системы	Групповой уровень	Модульный уровень	Уровень элемента
Удельная масса, кг/кВт·ч	11-30	7-28	6-24	6-8
Удельный объем, л/кВт	12-35	10-12	7-10	1,5-2,5
Удельная цена, USD/кВт·ч	500			200-250

В настоящее время фирмой MAN B&W разработан «твердотельный» генератор MAN Hybrid EcoAux, представленный в [14] и на рис. 8.

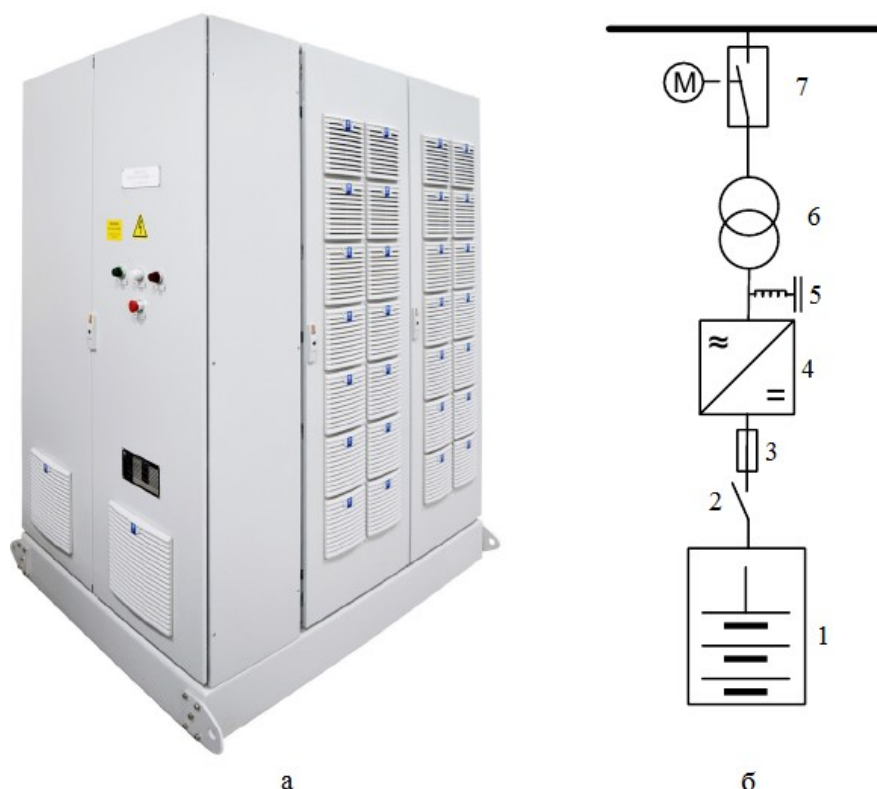


Рисунок 8 — «Твердотельный» генератор MAN Hybrid EcoAux:

а – внешний вид; б – состав генератора: 1 – накопитель энергии (АБ), 2 – выключатель, 3 – система защиты, 4 – двунаправленный инвертирующий преобразователь, 5 – фильтр, 6 – разделительный трансформатор, 7 – выключатель с моторным приводом

Таблица 6 — Технические характеристики «твердотельных» генераторов MAN Hybrid EcoAux

Типоразмер	Напряжение сети, В	Частота, Гц
625 кВт·ч (5С)*	400-690	50 или 60
405 кВт·ч (5С)	400-690	50 или 60
270 кВт·ч (5С)	400-690	50 или 60
135 кВт·ч (5С)	400-690	50 или 60

* С – Скорость заряда. С = 12 мин., т. е. 5 С=5·12=60 мин.

С возможными компоновочными решениями по размещению электромеханического оборудования в машинном отделении в случае применения ГЭУ при питании ДВС от газообразных источников можно ознакомиться в [9; 11], а для систем, в состав которых входят аккумуляторные батареи в [14].

Заключение

1. Использование гребных электрических установок является в настоящее время одним из перспективных направлений в области развития судовых пропульсивных установок. Их применение напрямую связано с соблюдением требований международной конвенции MARPOL 73/78 в части выбросов с морских судов.

2. Применение гребных электрических установок напрямую связано с применяемым видом топлива в первичных генерирующих установках.

3. Важными показателями для выбора гребных электрических установок, кроме вопросов чисто технических, являются вопросы ценовые.

Список литературы:

1. Рак, А. Н. Особенности расчета параметров вспомогательно-аварийного движения на морских судах с комбинированным дизель-электрическим двигателем / А. Н. Рак, С. Н. Царенко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. – 2021. – Т. 13. – № 1. – С. 115-125.
2. Рак, А. Н. Расчет и выбор подруливающих устройств морских судов / А. Н. Рак, А. В. Корощенко, Г. А. Капанадзе // Proceedings of Azerbaijan State Marine Academy. 2019. – № 2. – С. 94-101.
3. Рак, А. Н. Определение параметров подруливающих устройств с электрогидравлическим приводом / А. Н. Рак, В. М. Яковлев // Proceedings of Azerbaijan State Marine Academy. – 2020. – № 2. – С. 153-159.
4. Air pollution and energy efficiency. Background information to document MEPC 64/4/13. Submitted by the International Association of Classification Societies (IACS). MARINE ENVIRONMENT PROTECTION COMMITTEE. 64th session. Agenda item 4. MEPC 64/INF.7 2 July 2012. English only [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/315642914_Background_information_to_document_MEPC_64413/ (дата обращения: 30.03.2020).
5. МАРПОЛ. Книга III, пересмотренное Приложение VI к МАРПОЛ «Правила предотвращения загрязнения воздушной среды с судов» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/499014496> (дата обращения: 30.03.2020).
6. Руководство по применению положений Международной конвенции МАРПОЛ 73/78. НД №2-030101-026. – СПб.: ФАУ «Российский морской регистр судоходства», 2017. – 163 с.
7. Труднев, С. Ю. Судовые автоматизированные электроэнергетические системы: Судовые источники электрической энергии. Часть I [Электронный ресурс]: учебное пособие / С. Ю. Труднев, А. Н. Рак, А. А. Марченко. – Текстовое (символьное) электронное издание. – Новокузнецк: Издательство «Знание-М», 2021. – 1 электрон. опт. диск (CD-R). – 188 с.
8. MAN Energy Solutions. Batteries on board ocean-going vessels [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.man-es.com/docs/default-source/marine/tools/batteries-on-board-ocean-going-vessels.pdf> (дата обращения 22.03.2020).
9. MAN Energy Solutions. MAN B&W ME-LGIP dual-fuel engines [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.man-es.com/marine/products/planning-tools-and-downloads/technical-papers/2> (дата обращения: 22.03.2021).
10. Радченко, Р. В. Водород в энергетике: учеб. пособие / Р. В. Радченко, А. С. Мокрушин, В. В. Тюльпа. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2014. – 229 с.
11. Wärtsilä разрабатывает систему для производства водородного топлива на борту кораблей [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://building-tech.org/Технологии/wartsila-razrabativaet-sistemu-dlya-proyuzvodstva-vodorodnogo-toplyva-na-bortu-korabley> (дата обращения: 22.03.2022).
12. Дорохов, А. Ф. Качество и надёжность судовых дизелей / А. Ф. Дорохов, А. Г. Проватар, А. В. Воробьёв // Вестник АГТУ. Сер.: Морская техника и технология. – 2015. – № 2. – С. 48-55.

13. Bas Kwasiieckyj. Hybrid propulsion systems. Efficiency analysis and design methodology of hybrid propulsion systems. Master thesis for the degree of Masters of Science for Marine Engineering, Marine Technology at Delft University of Technology. Conducted at MAN Diesel & Turbo SE, Augsburg SDPO.13.008.m – 170 p. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://se-atracker.ru/viewtopic.php?t=41306> (дата обращения: 22.03.2022).
14. MAN Energy Solutions. MAN Hybrid EcoAux. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.man-es.com/docs/default-source/document-sync/man-hybrid-ecoaux-eng.pdf?sfvrsn=98d91b1c_0 (дата обращения: 22.03.2022).

Поступила в редакцию 08.11.2022.

Сравнительная оценка эффективности ричстакера и крана RTG при работе со штабелем контейнеров

Салюк Алексей Андреевич,¹ выпускник направления
23.03.01 Технология транспортных процессов

Лазарев Владимир Анатольевич,² канд. техн. наук, доцент, vald.lazarev@list.ru

¹ МГУ им. адм. Г.И. Невельского, Владивосток

² Институт экономических исследований ДВО РАН, Хабаровск

В статье рассматриваются особенности работы ричстакеров и крана RTG с контейнерами, организованными для хранения в штабели. Выполнен сравнительный анализ эффективности применения указанных средств механизации, установлены критерии выбора оптимальной механизации и предложены варианты решения для различных условий складирования. Уделено внимание ограничениям предложенного подхода.

Ключевые слова: контейнер, складирование, штабелирование, ричстакер, кран RTG.

Comparative Analysis of Reach-stacker and RTG Crane Efficiency in Container Stacking Operations

Saluk Alexey A. ¹

Lazarev Vladimir A., ² PhD, vlad.lazarev@list.ru

¹ MSU named after admiral G.I. Nevelskoy, Vladivostok

² Institute of Economic Research, Khabarovsk

The article considers the specifics of reach-stackers and RTG crane operation with stacked containers. A comparative analysis of the effectiveness of the specified means of mechanization is carried out, the criteria for choosing the optimal mechanization are established, and solution options for various storage conditions are proposed. Attention is paid to the limitations of the proposed approach.

Keywords: container, storage, stacking, reach-stacker, RTG crane.

Введение

На современном этапе развитие контейнерных перевозок идёт ускоренными темпами, и транспортные компании должны поспевать за потребителями данной услуги. Анализ развития морского флота показывает, что контейнерная революция продолжается [1]. Выбор контейнера как транспортного средства / тары для перевозки грузов обусловлен тем, что он очень удобен для перевозки различными видами транспорта, а также обеспечивает одно из самых современных требований грузовладельца – доставку груза от двери до двери. Но сам по себе

контейнер не несёт огромной пользы без контейнерного терминала, который является одновременно пунктом временного хранения, выдачи и приёма, формирования и расформирования контейнеров.

Собственно, контейнерный терминал представляет собой специализированный комплекс сооружений и устройств для выполнения погрузочно-разгрузочных работ, связанных с контейнерами. Целью таких промышленных объектов является быстрая и максимально эффективная обработка контейнеров. Данная статья подготовлена с целью выявления возможности повышения производительности причальных комплексов при использовании оборудования других типов.

Ведущие порты мира – источники лучшего опыта

Порт Шанхай в КНР на настоящее время остается крупнейшим и самым загруженным портом мира. Удерживает первенство он с 2010 года, обогнав порт Сингапур по грузопереработке. В 2019 году порт Шанхай переработал более 750 миллионов тонн груза, в том числе более 43 миллионов ДФЭ, и продолжает показывать положительную динамику вне зависимости от состояния мировой торговли и ограничений пандемии: в 2020 году было обработано 43,5 миллиона ДФЭ, в 2021 – более 47 миллионов ДФЭ, в 2022 – 47,3 миллиона ДФЭ, несмотря на некоторое снижение грузооборота. Порт Шанхай состоит из группы морских и речных терминалов, поскольку расположен в устье Янцзы, и каждый из терминалов, составляющих порт Шанхай, часто рассматривается как отдельный порт. Крупнейшие контейнерные терминалы порта Шанхай – Вусонкоу, Вайгаоцяо и Яншань имеют в составе 43 причала, оборудованных 156 кранами [2]. В целом, порт Шанхай занимает площадь 3619,6 кв. километров.

Особого внимания заслуживает *Порт Яншань* (Yangshangang). Это крупный инженерный проект, который включает искусственную гавань с 21 причалом и общей протяженностью береговой линии 20 километров. В порту Яншань установлены 16 уникальных кранов повышенной грузоподъемности STS-40, произведенные китайской компанией ZPMC, каждый из которых оборудован телескопическим спредером с системой твин-лифт, способным захватывать одновременно четыре ДФЭ, что позволяет обрабатывать до 50 ДФЭ в час. В 2017 году в этом порту был введен в эксплуатацию автоматизированный контейнерный терминал, в котором все технологические операции на причалах и складах выполняются роботами под общим управлением из центра автоматизированного управления. Полная автоматизация позволяет компании сэкономить около 70 % рабочей силы.

Первое место в Европе по размеру занимает *порт Роттердам*. Роттердам – старый порт, он испытывает все трудности подобных портов, будучи зажат городской агломерацией и не имея возможностей для экстенсивного развития [3]. Порт Роттердам имеет площадь 105 кв. километров и занимает около 40 километров побережья. Порт расположен по берегам Каландканала – судоходного канала в дельте рек Рейн и Маас, а также на насыпной области Маасвлакте, выходящей в Северное море. В 1962 году порт Роттердам стал крупнейшим портом мира, превысив грузооборот портов Лондона и Нью-Йорка и держал эту позицию до 2004 года, когда его обогнали азиатские порты, поддерживающие промышленную мощь своих стран. Порт Роттердам получил первое место по грузообороту благодаря перевалке нефти и нефтегрузов, обеспечиваемых нефтеперерабатывающими предприятиями на островах в дельте Рейна. Как и порт Шанхай, Роттердам расположен в дельте рек, следовательно, он, кроме традиционной связки с автомобильным, железнодорожным и авиационным транспортом, поддерживает перевалку на внутренний водный транспорт, обеспечивая сообщение с внутренними районами вдоль рек Маас и Рейн. Порт эффективно использует AGV (автоматически управляемое транспортное средство), здесь их более 150 единиц. В 2021 году порт переработал порядка 470 миллионов тонн груза, из них более 40 % – нефти и нефтепродуктов.

Согласно данным Ассоциации морских торговых портов РФ, в 2021 году *ПАО «Владивостокский морской торговый порт»* (порт Владивосток) занимает первое место среди стивидорных компаний России по перевалке контейнеров. Компания перегрузила 757,26 тыс. ДФЭ, или +12,6 %, к уровню 2020 года. Второе место занимает *АО «Первый контейнерный*

терминал» (Большой порт Санкт-Петербург) с оборотом 626 тыс. ДФЭ. В целом, российский рынок перевалки контейнеров показал устойчивый рост и в 2021 году достиг рекордных объемов в 5,4 млн TEU, или +7,1 %, к 2020 г. Рост грузооборота произошел как в сегменте контейнеризованного импорта (+11,1 % в 2021 г.), так и экспорта (+4,2 % в 2021 г.).

Постановка проблемы

С 1860 года, с момента основания, морской порт Владивосток играл огромную роль как база освоения Дальнего Востока России. Владивосток стал главной распределительной базой грузопотоков на Сахалин, Камчатку и другие удаленные территории, отправной точкой большинства рейсов русских коммерческих судов и одновременно главным российским дальневосточным причалом. Владивостокский порт – восточный узел Транссибирской железнодорожной магистрали. Как следствие, к настоящему времени причальная линия, которая традиционно расположена вдоль удобного побережья бухты Золотой Рог, испытывает давление со стороны городской агломерации. Фактический рост портовых территорий Владивостока прекратился еще в 70-е годы XX века. Основная проблема, которую сейчас испытывают все причальные комплексы в бухте Золотой Рог, – недостаток свободных площадей для временного хранения груза. Именно этот фактор сдерживает рост грузооборота причальных комплексов и приводит к тому, что их потенциал используется на 110-120 % от теоретически обоснованного уровня.

Анализ показывает, что все причальные комплексы в наибольшей степени испытывают проблемы вследствие недостаточной пропускной способности складов. Пропускная способность действующего склада, в тоннах или контейнерах, может быть определена как произведение оборачиваемости склада на его вместимость. Для достижения поставленной цели необходимо повысить любой из этих показателей, а для получения наибольшей эффективности – оба показателя.

Оборачиваемость склада напрямую зависит от среднего срока хранения груза в сутках. Снизить сроки хранения груза можно:

- оперативным прохождением процедур таможенного контроля путем организации слаженной совместной работы с таможенными органами, закупки и установки автоматизированного стационарного оборудования для проведения таможенного контроля, увеличения площади зоны таможенного досмотра;

- оперативной отгрузкой путем мотивации грузоперевозчиков, грузополучателей к скорейшему вывозу контейнера с терминала. Того же эффекта можно добиться минимизацией или отказом от хранения контейнеров в штабелях вне зоны работы RTG/RMG, если эти контейнеры не являются одной грузовой партией, планируемой к отгрузке.

Однако пропускная способность складов также зависит от возможностей техники. Одновременно со снижением сроков хранения требуется увеличение парка механизации, что влечет значительные экономические затраты. На сегодняшний день вместимость склада причального комплекса без существенных капиталовложений увеличить невозможно. Для повышения вместимости склада нужны дополнительные площади, а для повышения оборачиваемости склада необходимо эти площади обеспечить наилучшим вариантом механизации.

Конфигурация современной контейнерной площадки на причальных комплексах бухты Золотой Рог обычно представляет собой штабель контейнеров, уложенных в пять ярусов. Допускается шестой ярус, но это нежелательно, поскольку такой штабель может не выдержать ветровую нагрузку, а также не всякое оборудование может работать с таким штабелем. Наиболее распространенные модели ричстакеров могут обрабатывать штабели высотой не более пяти ярусов (рис. 1) [5].

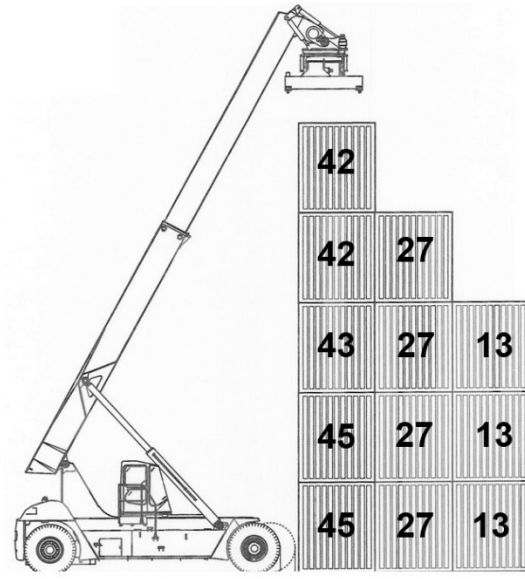


Рисунок 1 — Грузовая характеристика ричстакера «Kalmar» DRF450-60S5
(для контейнеров High Cube 9,6”)

В связи с нехваткой свободного места причальные комплексы практикуют хранение груженых контейнеров в «глухих» штабелях, с которыми работать может только ричстакер, и подход к которым возможен только с одной стороны. Это значительно снижает эффективность перевалки груза, повышает время хранения груза и требует дополнительного места для временного или постоянного складирования.

Сравнительный анализ эффективности средств механизации

Сравним эффективность ричстакера и RTG при одинаковых условиях. Возьмем в качестве примера штабель протяженностью девять рядов, высотой 5 ярусов и рассчитаем среднее число перемещений контейнеров в штабеле при работе ричстакером и RTG.

Среднее число перемещений рассчитывается по формуле:

$$n = \sum n_i \times p_i, \quad (1)$$

где n_i – число перемещений, которое необходимо совершить, чтобы получить доступ к контейнеру, стоящему на i -й позиции согласно нумерации контейнеров в штабеле; p_i – вероятность того, что нужный контейнер находится на i -й позиции в штабеле:

$$p_i = \frac{1}{N}, \quad (2)$$

где N – число контейнеров в штабеле.

Поскольку принимается, что вероятность в потребности любого контейнера в штабеле одинакова, то формула (2) примет вид:

$$n = \frac{1}{N} \sum n_i. \quad (3)$$

На рис. 2 и рис. 3 показано, сколько перемещений необходимо выполнить ричстакеру, чтобы извлечь произвольный контейнер. Вариант 1 разработан для ричстакера, особенности конструкции которого позволяют взять контейнер из второго ряда штабеля, при условии, что в первом ряду на этом ярусе контейнер отсутствует. Вариант 2 разработан для ричстакера, который может брать груженный контейнер только из первого ряда.

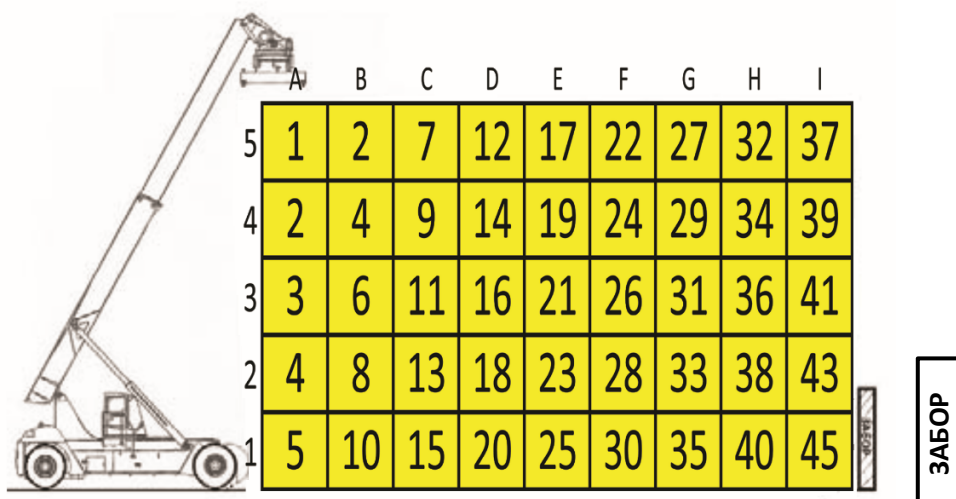


Рисунок 2 — Число перемещений контейнера, ричстакер, вариант 1

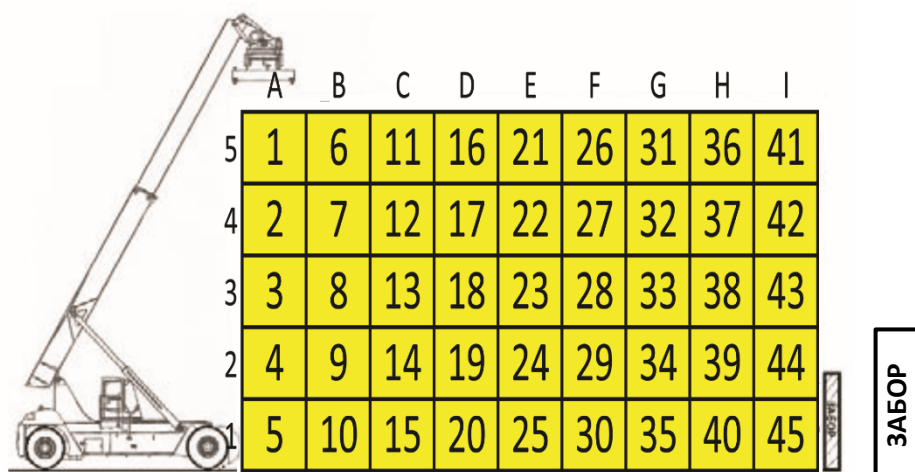


Рисунок 3 — Число перемещений контейнера, ричстакер, вариант 2

Как видно на рис.2, для извлечения из штабеля контейнера В5 ричстакер должен снять контейнер А5, тогда нужный контейнер будет извлечен второй операцией. В варианте 2 для извлечения того же контейнера В5 ричстакер должен предварительно снять весь ряд А, соответственно, извлечение контейнера В5 будет выполнено шестой операцией. Существует конструкция ричстакера, которая благодаря изогнутой стреле позволяет извлечь контейнер В5 первой операцией. Это, например, Liebherr LRS 645 Litronic [6]. Однако такие ричстакеры значительно дороже, и на причальных комплексах порта Владивосток они не используются.

Суммарное число перемещений контейнеров для варианта 1 – 955, для варианта 2 – 1035. Тогда среднее число перемещений для варианта 1

$$n = 955/45 = 21,22,$$

для варианта 2:

$$n = 1035/45 = 23.$$

На рис. 4 показано число перемещений, которые необходимо выполнить крану RTG для извлечения произвольного контейнера. Как видно, любой контейнер из штабеля может быть

извлечен за пять перемещений. Таким образом, суммарное число перемещения в штабеле из 45 контейнеров для RTG составит 135, а среднее число перемещений для RTG равно

$$n = 135/45 = 3.$$

Таким образом, можно составить таблицу среднего числа перемещений контейнеров в зависимости от размера штабеля.

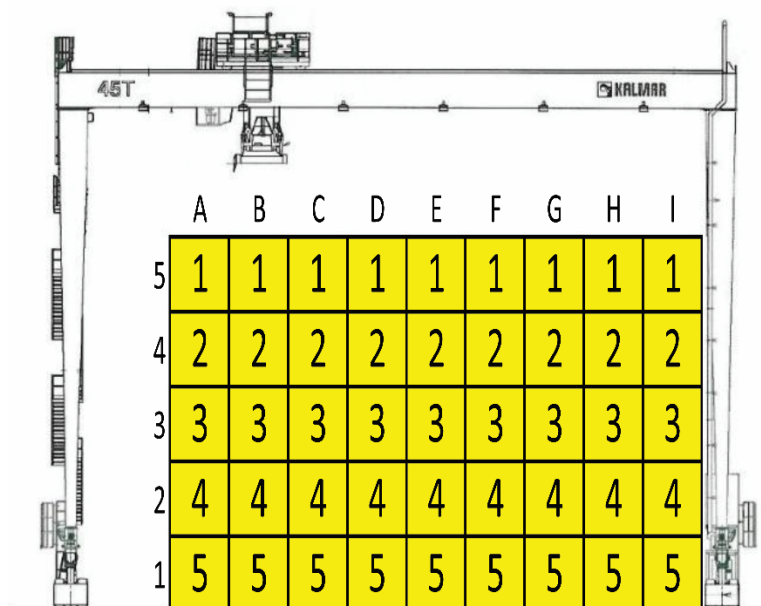


Рисунок 4 — Число перемещений контейнера, RTG

В табл. 1 сведены средние числа перемещений контейнеров в зависимости от числа рядов в штабеле для ричстакеров вариантов 1 и 2 и RTG, число ярусов постоянно и равно пяти. Как видно из табл. 1, по среднему числу перемещений ричстакер проигрывает крану RTG на штабелях, имеющих более одного ряда. Однако окончательное решение по эффективности внедрения следует принимать, исходя из себестоимости работ. Себестоимость одной крановой операции на различных причальных комплексах порта Владивосток различна, зависит от моделей и возраста используемых средств механизации и является коммерческой тайной.

Таблица 1 – Средние числа перемещения контейнеров в зависимости от средства механизации и числа рядов в штабеле высотой 5 ярусов

Число рядов в штабеле	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Число контейнеров в штабеле	5	10	15	20	25	30	35	40	45
Число перемещений, ричстакер, вариант 1	15	45	100	180	285	415	570	750	955
Среднее число перемещений, ричстакер, вариант 1	3	4,5	6,67	9	11,4	13,83	16,29	18,75	21,22
Число перемещений, ричстакер, вариант 2	15	55	120	210	325	465	630	820	1035
Среднее число перемещений, ричстакер, вариант 2	3	5,5	8	10,5	13	15,5	18	20,5	23
Число перемещений, RTG	15	30	45	60	75	90	105	120	135
Среднее число перемещений, RTG	3	3	3	3	3	3	3	3	3

По этой причине определенные числа не могут быть приведены в данной статье, но их можно заменить на оценочные. Если предположить на основании имеющихся данных, что одна крановая операция ричстакера стоит 2000 рублей, то аналогичная крановая операция RTG будет стоить порядка 6000 рублей, что определяется прежде всего различием в стоимости оборудования. Используя эти соотношения, можно построить табл. 2, сведя в нее средние стоимости перемещения контейнеров при разных схемах механизации.

Таблица 2 — Средние затраты на перемещение контейнеров в зависимости от средства механизации и числа рядов в штабеле высотой 5 ярусов, в тыс. рублей

Число рядов в штабеле	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Число контейнеров в штабеле	5	10	15	20	25	30	35	40	45
Средняя стоимость перемещений, ричстакер, вариант 1	6	9	13,33	18	22,8	27,67	32,57	37,5	42,44
Средняя стоимость перемещений, ричстакер, вариант 2	6	11	16	21	26	31	36	41	46
Средняя стоимость перемещений, RTG	18	18	18	18	18	18	18	18	18

Таким образом, при принятых допущениях о себестоимости операций по перемещению контейнеров можно сделать следующие выводы.

1. На штабелях менее четырех рядов RTG по себестоимости работ всегда проигрывает ричстакеру.

2. Ричстакер варианта 2 уступает RTG по себестоимости операций, если в штабеле четыре ряда контейнеров и более.

3. Ричстакер варианта 1 проигрывает RTG по себестоимости работ на штабеле, в котором пять рядов контейнеров и более.

Выводы

Приведенный в данной статье метод определения сравнительной эффективности средств механизации показал, что ответ на вопрос о том, какое оборудование является наилучшим, не вполне однозначен. Кроме факторов, на которые обращает внимание данная статья, а именно размер контейнерного штабеля и особенности работы разных видов портового перегрузочного оборудования, существует еще ряд не менее важных особенностей, которые зачастую не могут быть отражены в форме затрат или себестоимости. Так, ричстакеру для маневрирования вблизи штабеля требуется гораздо больше свободной площади, чем могут занять требуемые для RTG проезды; дополнительная свободная площадь требуется также для сортировки контейнеров в штабеле. С другой стороны, кран RTG, обладающий большей производительностью, гораздо дороже и более затратен в эксплуатации. Следует также учитывать возможность неисправности оборудования. Если неисправный ричстакер легко заменить резервным, то для неисправного RTG такая возможность фактически отсутствует.

Причальным комплексам приходится иметь дело как с единичными контейнерами, так и с контейнерными партиями. Если в штабеле имеется контейнерная партия из рядом размещенных контейнеров, то для извлечения из штабеля такой партии понадобится меньшее среднее число операций в расчете на один извлеченный контейнер. Если причальный комплекс имеет дело со значительным числом таких партий, то задача из вероятностной становится статистической и требует существенного изменения метода решения. В случае значительной партионности контейнеров ричстакер будет проигрывать крану RTG на существенно больших штабелях, чем состоящие из четырех-пяти рядов, а с учетом особенностей эксплуатации RTG замена ричстакера на него, возможно, окажется нецелесообразной даже на достаточно больших штабелях.

Список литературы

1. Lazarev, V. A. Development Trends of World Commercial Fleet during 2001-2018 // 2021 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 1079 062092. DOI 10.1088/1757-899X/1079/6/062092
2. Официальная страница порта Шанхай [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://en.portshanghai.com.cn/> (дата обращения: 10.03.2023).
3. Официальная страница администрации порта Роттердам [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.portofrotterdam.com/en> (дата обращения: 10.03.2023).
4. Топ-5 портов-лидеров грузооборота в России [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.morvesti.ru/news/1679/93578/> (дата обращения: 10.03.2023).
5. Ричстакер SANY SRSC45 H2/V3. Технические характеристики [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://topkraftspb.ru/srsc45h2.html> // ООО «ТопКрафт» (дата обращения: 10.03.2023).
6. Liebherr LRS 645 Litronic Specifications & Technical Data (2004-2023) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.lectura-specs.com/en/model/forklifts/reach-stacker-liebherr/lrs-645-litronic-1035759> (дата обращения: 10.03.2023).

Поступила в редакцию 20.03.2023.

О проблемах перевалки экспортного угля в морских портах Приморья

Терентьева Любовь Васильевна, канд. техн. наук, профессор, Terenteva@msun.ru

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

Перевалка экспортного угля в морских портах Приморского края создает экологические проблемы, если угольные терминалы расположены на универсальных причалах в границах городов. Для обеспечения возрастающего спроса на уголь на азиатских рынках разрабатываются проекты строительства новых и увеличения пропускной способности действующих терминалов. Резервы пропускной способности проектируемых угольных терминалов создают возможности для устранения экологических проблем. Необходимо переориентировать грузопотоки угольных причалов, находящихся в границах городов Приморья, на высокопроизводительные специализированные существующие или вновь строящиеся угольные терминалы. Освободившиеся причалы и терминалы после модернизации можно использовать для перегрузки безвредных для городов грузов.

Ключевые слова: морской порт, угольный терминал, пропускная способность, экология, диверсификация.

On the problems of transshipment of export coal in seaports of Primorye

Liubov V. Terenteva, PhD, Terenteva@msun.ru

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

Transshipment of export coal in seaports of Primorsky region poses environmental problems if coal terminals are located on general-purpose berths within the boundaries of cities. To meet the growing demand for coal in Asian markets, projects are being developed to build new ones and increase the capacity of the existing terminals. The capacity reserves of the designed coal terminals offer opportunities for eliminating environmental problems. It is necessary to redirect the cargo flows of coal berths located within the boundaries of Primorye cities to highly efficient specialized existing or newly built coal terminals. The vacated berths and terminals after modernization can be used for transshipment of cargo that is harmless to cities.

Key words: seaport, coal terminal, capacity, ecology, diversification.

Введение

Россия является одним из крупнейших в мире морским экспортером угля, спрос на который возрастает. Основными потребителями российского угля являются страны Азиатско-Тихоокеанского региона – Китай, Южная Корея, Япония. Увеличение спроса создает предпосылки для увеличения объемов добычи российского угля и отправки его морским путем. Согласно отчетам Росстата, количество угля, отгруженного через морские порты России, более 98 % которого составляет экспортный уголь, ежегодно возрастает (таблица 1) [1].

Таблица 1 — Перегружено грузов в морских портах России, млн тонн

Год	2017	2018	2019
Перегружено грузов, всего	786,4	816,7	840,3
Из них сухогрузы	373,2	387,6	376,0
Из них навалочные	191,0	197,2	214,0
Из них уголь каменный, кокс	154,6	161,4	176,0
В том числе на экспорт	152,7	159,2	173,6
% экспорта от общего количества угля	98,8	98,6	98,6

Экспортный уголь отгружается в основном через порты Балтийского и Дальневосточного бассейнов. Динамика перевалки угля через порты различных бассейнов представлена в таблице 2 [2].

Таблица 2 — Динамика перевалки угля через порты различных бассейнов, % от общего объема перевалки

Год	2017	2018	2019
Дальневосточный бассейн	48	50	52
Балтийский бассейн	31	31	30
Арктический бассейн	10	11	10
Азово-Черноморский	11	8	8

Благодаря росту цен и спроса на уголь на азиатском рынке объемы перегружаемого экспортного угля через порты Дальневосточного бассейна и Приморского края, в частности, увеличиваются с каждым годом, и эта тенденция будет сохраняться. В соответствии со Стратегией и Программой развития угольной промышленности на перспективу до 2035 года Министерство энергетики Российской Федерации планирует в два раза увеличить экспорт угля, который должен составить 392 млн тонн [3]. Увеличивается и количество терминалов, которые перегружают экспортный уголь, особенно на Дальнем Востоке и в Приморском крае. Разрабатываются проекты по увеличению пропускной способности существующих высокопроизводительных угольных терминалов и строительству новых специализированных перегрузочных комплексов по перевалке экспортного угля. При этом особое внимание направлено на восточный полигон – территории Дальнего Востока и Приморья.

При перевалке угля возникают экологические проблемы, связанные с охраной окружающей среды, негативным действием угольной пыли на здоровье жителей прилегающих территорий, если терминал расположен в границах города.

Цель данной работы – обратить внимание на необходимость прекращения перевалки угля на морских терминалах, находящихся в границах портовых городов Приморья. Это особенно актуально в настоящее время, когда развитию Дальнего Востока и Приморского края уделяется повышенное внимание.

1. Угольные терминалы Дальнего Востока и Приморья

Разработкой месторождений и добычей угля в России занимаются различные компании: Сибирская угольная энергетическая компания (СУЭК), Кузбассразрезуголь, СДС-Уголь, Мечел-Майнинг, Группа «ЕВРАЗ», Русский уголь, Компания «Востсибуголь», Кузбасская топливная компания, Сибуглемет, Воркутауголь [4]. Основная доля приходится на СУЭК, которая добывает в год свыше 100 млн тонн угля. Многие угледобывающие компании имеют свои терминалы для перевалки экспортного угля. Сведения о крупнейших угольных терминалах Дальневосточного бассейна и объемах перевалки угля через терминалы в млн тонн приведены в таблице 3 [2].

Таблица 3 — Крупнейшие угольные терминалы ДВ бассейна

Стивидорная компания	Порт	2018	2019
АО «Восточный порт» (КРУ)	Восточный	24,2	25,6
АО «Дальтрансуголь» (СУЭК)	Ванино	20,0	20,6
АО «Находкинский МТП» (ЕВРАЗ)	Находка	8,2	9,4
ООО «Угольный морской порт Шахтерск» (ВГК)	Шахтерск	7,0	8,8
АО «Торговый порт Посьет» (Мечел)	Посьет	5,3	5,6
АО «Ванинский МТП» (Мечел)	Ванино	4,0	5,0

Кроме того, в Приморье уголь в различных объемах перегружается на других угольных терминалах и причалах портов. Экспортный уголь перегружают стивидорная компания «Малый порт» и «Терминал Астафьева», находящиеся в городе Находка, «Восточно-Уральский Терминал» в порту Восточный, недавно построенный недалеко от Владивостока и введенный в эксплуатацию порт «Вера», а также порты Владивостока. Угольные терминалы и причалы отличаются по оснащению и типу используемой перегрузочной техники и применяемым технологиям. Терминалы с капитальной специализацией используют высокопроизводительную перегрузочную технику: вагоноопрокидыватели, системы конвейеров и пересыпных станций стакер-реклаймеры, судопогрузочные машины (Дальтрансуголь, Восточный порт). Терминалы, имеющие универсальные схемы механизации, используют порталные краны и грейферную технологию при загрузке судов, краны и манипуляторы при выгрузке вагонов, бульдозеры на складских работах (Находкинский морской торговый порт, Малый порт). Некоторые порты для повышения пропускной способности модернизировали или заменили технику на грузовых фронтах и используют смешанную технологию, при которой уголь из полувагонов выгружается вагоноопрокидывателями, загрузка судов – кранами с помощью грейферов. Современные угольные терминалы с капитальной специализацией рассчитаны на прием под обработку судов дедвейтом 160 тысяч тонн и более. Технология перегрузки угля и типы обрабатываемых судов влияют на величину грузооборота, который для терминала с капитальной специализацией достигает более 20 млн тонн в год. Эксплуатация высокопроизводительных терминалов является более выгодной и перспективной. Расположены такие специализированные терминалы обычно на значительных расстояниях от населенных пунктов.

В морских портах Владивостока, Находки и Посьета причалы для перегрузки угля находятся в границах городов недалеко от жилых районов, при этом нарушаются нормы и требования к размещению и эксплуатации угольных терминалов и возникают проблемы, как для жителей городов, так и для компаний, эксплуатирующих терминалы. В соответствии с «Руководством по технологическому проектированию морских портов» должны соблюдаться разрывы между сухогрузными перегрузочными комплексами различного назначения в зависимости от рода перегружаемого груза [5]. Так между комплексом для перегрузки угля и причалами для перегрузки контейнеров, металлогрузов, пиломатериалов должно быть предусмотрено расстояние в 100 метров. Между угольным комплексом и комплексом для перегрузки скоропортящихся грузов – расстояние в 300 метров. Эти требования нарушаются в портах Приморья, где уголь и указанные грузы, а также рыбопродукция, перегружаются на смежных причалах. Так называемая «закрытая перевалка» угля на причалах с грейферной технологией, предполагающая ограждение угольных причалов защитными стенами высотой до 25 метров и навесами (арочными куполами), использование пылепоглощающей техники, техники для орошения и пылеподавления не решает всех возникающих проблем с экологией, а иногда порождает и новые проблемы. Угольная пыль негативно влияет на здоровье людей, загрязняет побережье, в теплое время года это не очень заметно, а зимой лед покрывается угольной пылью и становится черным.

Можно понять руководителей портов, которые в периоды спада грузопотоков приняли решение о привлечении в порт пылящих угольных грузов для переработки на универсальных причалах. Это было необходимо для выживания, сохранения рабочих мест и решения социальных вопросов.

Объяснимы также действия руководителей и владельцев угледобывающих компаний, каждая из которых стремится иметь свой терминал для перевалки экспортного угля. При повышении спроса на уголь для развития компаний была выбрана стратегия роста, одним из вариантов которой является стратегия внешнего вертикального роста, предполагающая приобретение компании для сбыта продукции. В данном контексте – компаний, которые осуществляют перевалку экспортного угля с железнодорожного транспорта и погрузку его в суда на терминалах, находящихся на ближайших расстояниях от рынков сбыта. Безусловно, экспорт угля через ближайшие к рынкам сбыта морские порты экономически выгоден во многих отношениях. Создаются рабочие места, повышается вклад угольной отрасли в валовый внутренний продукт России, увеличиваются отчисления в бюджеты различных уровней.

Экологические проблемы, возникающие для жителей города в виде угольной пыли в воздухе, на подоконниках или в прилегающих бухтах решаются по мере необходимости и возможности. В Находке контролируется концентрация угольной пыли в воздухе и проверяется ее соответствие санитарным нормам, закуплена специальная уборочная техника для борьбы с пылью, используемая для очистки прилегающих территорий и др. Однако этих мер недостаточно для устранения негативных последствий и угроз от перевалки угля для экологии Приморья. Неблагоприятные воздействия угольной пыли на окружающую среду накапливаются и могут отразиться на здоровье людей в недалеком будущем. Владельцы угледобывающих компаний находятся далеко от Приморского края, их в меньшей степени волнуют экологические проблемы жителей городов Приморского края. Экологические требования, в некоторой мере, обеспечивают новые специализированные угольные терминалы, строительство которых предполагается в Приморье вдали от населенных пунктов.

2. Проекты угольных терминалов Приморья

Расчеты пропускной способности, выполненные для некоторых существующих угольных терминалов с грейферной или смешанной технологией перевалки угля, которые в свое время были образованы на универсальных причалах, показали, что они практически исчерпали свои возможности. Для увеличения их пропускной способности необходимы существенные и весьма затратные технические и технологические преобразования, как по причальному фронту для увеличения глубин и создания возможностей для приема под обработку судов большей грузоподъемности, так и по замене перегрузочной техники на более производительное перегрузочное оборудование. Часть таких терминалов в Приморье находится в границах городов или на прилегающих территориях, что ограничивает их возможности по расширению складских площадей и по увеличению пропускной способности.

В настоящее время каждый угольный терминал, созданный на базе универсальных причалов, занимает свою рыночную нишу, обеспечивает заданные объемы перевалки экспортного угля и обрабатывает балкеры небольшой ограниченной грузоподъемности. Вместе с тем, строительство и эксплуатация крупнотоннажных балкеров больших размеров и грузоподъемности, обработка которых в портах требует использования современного портового перегрузочного оборудования высокой производительности, повышение уровня конкуренции на рынке стивидорных услуг по перевалке экспортного угля предопределяет их заведомо проигрышное положение в сравнении со специализированными угольными терминалами.

При увеличении объемов экспортного угля необходимо строительство новых угольных терминалов. Такие терминалы должны соответствовать определенным техническим, логистическим и экологическим требованиям, к которым относятся: размещение вдали от населенных пунктов; свободный доступ по железной дороге; достаточность места для склада с возможностью перевалки различных марок угля; возможность обработки больших судовых партий; коммерческая доступность терминала. Проекты размещения угольных терминалов в Приморье представлены в таблице 4 [2].

В таблицу 4 не включены проекты, которые по разным причинам приостанавливаются или закрываются. Суммарная мощность проектируемых терминалов, представленных в таблице 4, составляет 95 млн тонн.

Таблица 4 — Проекты угольных терминалов Приморья

Стивидорный проект	Порт	Мощность, млн т	Год ввода
АО «Открытый порт Находка» (проект «Север»)	Восточный	20	2025
ООО «Порт «Вера Менеджмент»	Владивосток	20,0	2025
ООО «Морской порт Суходол»	Владивосток	20	2021?
ООО «Морской порт в бухте Троицы»	Зарубино	10	2024
Терминал «Аврора» ООО Морской порт «Коулстар»	Владивосток	25	—

Проекты угольных терминалов связаны не только с размещением и строительством новых производственных мощностей по перевалке угля, но и со значительным увеличением пропускной способности эксплуатируемых терминалов. На существующих комплексах Дальнего Востока и Приморья с капитальной специализацией (Дальтрансуголь, Восточный порт) уже перегружается более 40 млн тонн угля ежегодно. Планируется увеличение мощности терминала «Дальтрансуголь» до 40 млн тонн. Мощности угольного терминала в Восточном порту после завершения строительства третьей очереди должны обеспечивать перевалку 50-55 млн тонн угля. Предполагается также завершение в 2023 году строительства терминала АО «Ванинотрансуголь» пропускной способностью 24 млн тонн. Таким образом, пропускная способность угольных специализированных терминалов Дальнего Востока, по приближенной оценке, может составить более 200 млн тонн. Суммарная пропускная способность специализированных угольных терминалов будет превышать потребности в объемах перегрузочных работ на восточном полигоне. В 2018 году на совещании в Кемерово Президент РФ поручил расширить перевозки в восточном направлении так, чтобы восточный полигон к 2025 году пропускал 195 млн тонн угля, из них 100 млн т – через порты Приморья. В 2020 году через восточный полигон было вывезено 115 млн тонн угля [6].

В настоящее время грузопоток экспортного угля в восточном направлении ограничен провозной способностью железных дорог и недостаточным развитием железнодорожной инфраструктуры. В соответствии с поручениями Президента РФ федеральными органами исполнительной власти и угольными компаниями прорабатываются перспективные инфраструктурные проекты, при этом особое внимание уделяется не только развитию традиционных и новых центров угледобычи, но и наращиванию потенциала рынков сбыта угля [3]. Разработан план ускоренной модернизации железных дорог восточного полигона, включающий 212 приоритетных участков и предусматривающий расширение станций и строительство дополнительных путей с целью увеличения провозной способности Байкало-Амурской и Транссибирской магистралей в направлении морских портов Дальнего Востока [6].

При проектировании морских терминалов предусматривается превышение пропускной способности над грузооборотом на величину экономически оправданного резерва с целью наращивания производственных мощностей порта, а также для перевалки повышенных объемов внешнеторговых грузов по сравнению со средними прогнозируемыми значениями [7]. Резерв пропускной способности предусмотрен Нормами технологического проектирования (НТП) морских портов при определении потребного числа причалов, необходимых для освоения заданного грузооборота. В соответствии с Нормами технологического проектирования морских портов [8], потребное число грузовых причалов $N_{пр}$ определяется по формуле

$$N_{пр} = \frac{Q_{мес}}{30M_{сут}K_{мет}K_{зан}}, \quad (1)$$

где $Q_{мес}$ – грузооборот причалов в месяц наибольшей нагрузки (т/мес.);

$M_{сут}$ – валовая интенсивность грузовых работ при обработке расчетных типов судов (т/сут.);

$K_{мет}$ – коэффициент использования бюджета рабочего времени причала, учитывающий простои причала по метеорологическим факторам в месяц наибольшей нагрузки;

$K_{зан}$ – коэффициент занятости причала обработкой судов; $K_{зан} = 0,5 - 0,6$ для специализированных причалов с навалочными грузами [8].

Произведение величин, входящих в знаменатель формулы (1), позволяет рассчитать значение месячной пропускной способности одного причала с учетом ограничения занятости причала и обеспечения резерва пропускной способности с целью предотвращения непроизводительных простоев судов в ожидании обработки [7]. Величина максимального месячного грузооборота, учитывающая неравномерность поступления грузов в порт по месяцам и обычно на 10-20 % превышающая среднемесячные значения, также предусматривает резерв производственной мощности причалов. Таким образом, реализация проектов развития транспортной инфраструктуры позволит обеспечить не только перевалку экспортного угля через дальневосточные порты в предполагаемых объемах, но и создаст резервы производственных мощностей терминалов.

Наличие резервов пропускной способности позволило бы решить важную экологическую и социальную проблему жителей городов, в границах которых находятся причалы, перегружающие пылящий и вредный для здоровья и окружающей среды уголь. Решение этих проблем особенно важно, если учесть повышенное внимание к развитию Дальнего Востока, необходимость прекращения оттока населения из этого малозаселенного региона России, создания более благоприятных условий проживания для жителей. Совместными усилиями Министерства транспорта, Министерства энергетики Российской Федерации и угледобывающих компаний следовало бы диверсифицировать деятельность портов в городах Владивосток, Находка, Посьет, предусмотреть разработку проектов по модернизации и переоснащению универсальных причалов, в настоящее время перегружающих уголь, перенаправить грузопотоки угля на специализированные угольные терминалы, строительство которых предполагается в Приморском крае. Освободившиеся причалы после модернизации следует использовать для перегрузки безвредных для здоровья и окружающей среды грузов. Мировая практика увеличения перевозок грузов в контейнерах подсказывает возможное направление диверсификации портового производства: использование освободившихся причалов для перегрузки контейнеров и грузов северного завоза. Эта непростая и долгосрочная задача требует индивидуального подхода, технического, технологического, логистического и экономического обоснования для каждого конкретного порта и терминала.

Город Владивосток с его неповторимым ландшафтом и бухтами предполагалось сделать местом отдыха и курортной зоной для жителей России, туристическим городом не только для россиян, но и для иностранных граждан. Исключение угля из грузооборота портов Владивостока и Находки откроет перспективы для осуществления таких планов, улучшит качество жизни жителей и гостей Приморья, сделает край более привлекательным для туристов.

Заключение

Цели по увеличению благосостояния граждан России, повышению уровня доходов населения не могут быть достигнуты без развития промышленности и транспорта. Большая роль для достижения этих целей отводится морским портам Приморья, которые в перспективе смогут обеспечить перевалку увеличивающихся грузопотоков экспортного угля. В настоящее время перегрузка угля в некоторых портах Приморья производится на причалах, находящихся в границах городов, что создает экологические проблемы, отрицательно влияет на здоровье жителей. Проекты строительства новых угольных специализированных терминалов в приморских бухтах, с одной стороны, вызывают настороженность и негативное отношение, связанное с их количеством и многомиллионными объемами перевалки угля. Создается впечатление от этих проектов, что в перспективе весь Приморский край станет «одним большим угольным терминалом», бухты и окрестности Приморья будут завалены угольной пылью, и существующие в настоящее время экологические проблемы покажутся незначительными по сравнению с возможными в будущем проблемами. С другой стороны, новые терминалы создают предпосылки для освобождения городов от угля, предотвращения загрязнения городов угольной пылью и создания благоприятных условий для жителей и гостей, развития туризма и обустройства зон отдыха.

Список литературы:

1. Транспорт в России [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/UbzIvBZj/Transport_2020.pdf (дата обращения: 24.09.2021).
2. Терминалы для перевалки угля. Тенденции, проекты, перспективы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://morproekt.ru/articles/blog/1104-soal-transshipment-terminals-trends-projects-prospects> (дата обращения: 24.09.2021).
3. Минэнерго планирует к 2035 году в два раза увеличить экспорт угля [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://oilcapital.ru/news/press_release/04-10-2019/minenergo-rf-planiruet-k-2035-godu-v-dva-raza-uvlichit-eksport-uglya (дата обращения: 25.09.2021).
4. Добыча угля в России сегодня: статистика по регионам [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.mining-portal.ru/publish/dobyicha-uglya-v-rossii-segodnya--statistika-po-regionam/> (дата обращения: 24.09.2021).
5. Руководство по технологическому проектированию морских портов. – М.: 1993. – 558 с.
6. Экспорт угля: азиатский вектор [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.morvesti.ru/themes/1694/90265/> (дата обращения: 24.09.2021).
7. Брюм, А. И. Технологическое проектирование морских портов. – М.: Транспорт, 1971. – 328 с.
8. Нормы технологического проектирования морских портов. – М.: Стандартинформ, 2018. – 226 с.

Поступила в редакцию 10.03.2023.

Научное издание

**ВЕСТНИК
МОРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА**

Выпуск 90 / 2023

Подготовлено в Морском государственном университете
им. адм. Г. И. Невельского
690059, Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50а