

DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-2-301-317

ENERGY EFFICIENCY OF MODERN COMMERCIAL FLEET VESSELS: REGULATORY TOOLS AND METHODS OF ACHIEVEMENT

G. E. Zhivljuk, A. P. Petrov

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

Negative climatic changes, expressed in an increase in average annual temperatures on the planet and associated with saturation of the lower atmosphere with greenhouse gases, force measures to reduce the anthropogenic factor of influence on these processes and the development of methods and regulatory tools. Despite the fact that marine transportation due to the burning of fossil hydrocarbons accounts for less than 2.5 % of total carbon dioxide emissions, in the long term, the accumulation effect can have serious consequences. The subject of this study is the energy efficiency of ships of the modern commercial fleet. The various regulatory requirements for energy efficiency are considered in the paper and the chronology of the requirements introduction at both international and regional levels is tracked. It is noted that the developed methods of energy efficiency assessment are aimed at reducing the measure of the anthropogenic factor influence on the greenhouse effect and that energy efficiency estimates are mainly based on monitoring carbon dioxide emissions when engines run on various types of fuels. The focus in the study is on measures to reduce CO₂ emissions at all stages of the ship life cycle, from design and construction to ship recycling. Among the measures to reduce emissions at the design and construction stage, the issues of optimizing the ship hull and its power plant, developing structures for working on non-traditional, carbon-neutral and carbon-free fuels, and introducing alternative energy sources into the design of a ship power plant, etc. are discussed. Among the operational measures to reduce CO₂ emissions, the problems of optimizing the speed and routes of transportation, the vessel loading, and operating modes of ship equipment are considered. The problems that arise in the way of implementing technologies to achieve the requirements for ships energy efficiency are considered in the paper. Based on the analysis of various methods for reducing the measure of impact on the greenhouse effect from the global shipping industry, the conclusions on the results achieved and their effectiveness are drawn.

Keywords: energy efficiency of ships, marine power plant, environmental safety, greenhouse gas emissions, energy efficiency standards.

For citation:

Zhivljuk, Grigorij E., and Aleksandr P. Petrov. "Energy efficiency of modern commercial fleet vessels: regulatory tools and methods of achievement." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 16.2 (2024): 301–317. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-2-301-317.

УДК 621.43.074

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ СУДОВ СОВРЕМЕННОГО КОММЕРЧЕСКОГО ФЛОТА: ИНСТРУМЕНТЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ И МЕТОДЫ ДОСТИЖЕНИЯ

Г. Е. Живлюк, А. П. Петров

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

В работе обращается внимание на то, что негативные климатические изменения, выраженные в повышении среднегодовых температур на планете и связанные с насыщением нижних слоев атмосферы парниковыми газами, вынуждают к принятию мер по сокращению антропогенного фактора влияния на эти процессы и разработке методик и инструментов регулирования. Отмечается, что несмотря на то, что на морские транспортные перевозки за счет сжигания ископаемых углеводородов приходится менее 2,5 % от суммарных выбросов диоксида углерода, в перспективе эффект накопления способен повлечь серьезные последствия. Предметом настоящего исследования является энергоэффективность судов

современного коммерческого флота. В работе рассмотрены различные нормативные требования по энергоэффективности, отслежена хронология введения требований как международного, так и регионального уровней. Отмечается, что разработанные методы оценки энергоэффективности направлены на сокращение меры влияния антропогенного фактора на парниковый эффект и оценки энергоэффективности в основном базируются на мониторинге выбросов диоксида углерода при работе двигателей на различных видах топлива. В исследовании уделено внимание мероприятиям по сокращению выбросов CO_2 на всех этапах жизненного цикла судов, начиная с проектирования и постройки до утилизации судна. В числе мероприятий по сокращению выбросов на этапе проектирования и постройки рассмотрены вопросы оптимизации корпуса судна и его энергетической установки, разработки конструкций для работы на нетрадиционных, углерод-нейтральных и безуглеродных видах топлива, внедрение в конструкцию судовой энергетической установки альтернативных источников энергии и др. Среди эксплуатационных мер снижения выбросов CO_2 рассмотрены проблемы оптимизации скорости и маршрутов перевозок, загрузки судна, режимов работы судового оборудования. В работе также уделено внимание проблемам, возникающим в процессе внедрения технологий достижения требований к энергоэффективности судов. На основании анализа различных методов сокращения степени влияния на парниковый эффект со стороны мировой судоходной отрасли сделаны выводы о достигнутых результатах и их эффективности.

Ключевые слова: энергоэффективность судов, судовая энергетическая установка, экологическая безопасность, выбросы парниковых газов, регулирование энергоэффективности.

Для цитирования:

Живлюк Г. Е. Энергоэффективность судов современного коммерческого флота: инструменты регулирования и методы достижения / Г. Е. Живлюк, А. П. Петров // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 2. — С. 301–317. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-2-301-317.

Введение (Introduction)

Наблюдающиеся тенденции негативных климатических изменений отражают неуклонный рост уровня среднегодовых температур на планете. Достигнутый среднетемпературный максимум в $17,24^\circ\text{C}$ вызывает серьезную озабоченность и несмотря на то, что всемирное потепление является достаточно медленным и постепенным процессом, долгосрочные последствия могут оказаться катастрофическими. Одной из наиболее известных общепризнанных причин разогрева поверхности и нижних слоев атмосферы Земли является насыщение атмосферы парниковыми газами, особенно диоксидом углерода CO_2 . Наряду с естественными источниками выбросов CO_2 антропогенный фактор, выраженный в сжигании ископаемых углеводородов, вносит свой вклад в создание парникового эффекта. В работе [1] отмечается, что основным потребителем ископаемых углеводородов является транспортная инфраструктура, на которую приходится около 65 % потребления нефтепродуктов. При этом на международные морские перевозки приходится до 78 % объема мировой торговли, а выбросы в этом секторе составляют около 2,4 % глобальных выбросов парниковых газов. Несмотря на то, что указанные значения выбросов могут показаться незначительными, если не предпринять соответствующих мер сдерживания, то по прогнозам их увеличение с 2012 по 2050 гг. вместе с сегментом транспортных услуг возрастет пятикратно [2], [3].

Решение проблем сокращения меры антропогенного влияния на парниковый эффект со стороны водного транспорта представляется не только в попытках использования безуглеродных или углерод-нейтральных топлив, но и в повышении энергоэффективности судовых систем и в целом производительности судов при осуществлении перевозок. Рост производительности означает меньший уровень выбросов при одновременном сокращении расходов топлива. Возможная экономия топлива варьируется в пределах 25–75 % и может быть достигнута за счет более эффективной эксплуатации существующих и рационального проектирования новых судов [4].

За последние десятилетия правительствами различных стран создано несколько проектов и организаций, ответственных за решение указанных проблем. В первую очередь следует отметить Международную морскую организацию (ИМО), которая в 2011 г. ввела индекс энергоэффективности — EEDI, который впоследствии был усовершенствован и дополнен [5]. Несмотря на принимаемые многочисленные попытки [6]–[8] оценки энергоэффективности независимо от выбросов CO_2 с непосредственным учетом расхода топлива, который может составлять до 50–

60 % общих затрат на эксплуатацию судов, общепринятый EEDI, позиционируемый как «показатель энергоэффективности», фактически является измерением выбросов CO₂, что опосредованно связано с энергоэффективностью. Кроме того, EEDI оценивает лишь часть энергетической системы судна и только в одной рабочей точке, поэтому такая оценка энергоэффективности не может быть полной и всеобъемлющей [9]. Это является общей проблемой и для других нормативных актов, которые практически исключительно отслеживают энергоэффективность с точки зрения выбросов CO₂, и такой подход делает изучение энергоэффективности сложным процессом. Таким образом, отсутствие единой нормативной документации в вопросах изучения и обеспечения соблюдения норм энергоэффективности для всех классов и типов судов существенно затрудняет оценки и достижение высокой энергоэффективности морских перевозок, одновременно сводя к минимуму эффективность многих принимаемых решений.

Цель настоящей работы предусматривает исследование текущего состояния проблем энергоэффективности судов по следующим основным направлениям:

- состояние законодательной и нормативной базы, влияющей на энергоэффективность;
- обзор усилий и достижений, направленных на повышение энергоэффективности за последнее десятилетие;
- рассмотрение отдельных предложений по повышению энергоэффективности всего сектора морского транспорта и выделение потенциальных препятствий, которые могут образоваться при реализации таких мероприятий.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Нормативно-правовая база. Следует отметить, что до настоящего времени не существует единого норматива, непосредственно касающегося энергоэффективности судов как основной концепции регулирования. Существующие правила, регламентирующие энергоэффективность судов, не являются автономными и в значительной мере зависят от заинтересованных структур. Примером может служить EEDI, применение которого является некорректным для некоторых типов судов, и его метод оценки оказывается не вполне адекватным в случае использования в составе судовой энергетической установки специфических энергетических систем. Исходя из этого, следует определиться с происхождением и основными задачами действующего норматива, базирующегося на исследованиях в области энергоэффективности. В табл. 1 показана хронология создания наиболее важных мер и требований ИМО как головной организации, генерирующей и внедряющей требования и нормативы.

Таблица 1

Хронология правил ИМО

Дата	Описание
1948 г.	Создание в Женеве Межправительственной морской консультативной организации ИМКО, преобразованной в дальнейшем в Международную морскую организацию ИМО.
1958 г.	Организация вступает в силу.
1967 г.	Катастрофа в каньоне Торри демонстрирует масштабы проблем загрязнения, особенно при транспортировке нефти, как побуждающий мотив к формированию общих нормативов и требований экологической безопасности морских перевозок.
1973 г.	Разработана и принимается к реализации самая большая программа по предотвращению загрязнений — Международная конвенция по предотвращению загрязнения с судов (MARPOL).
1978 г.	Внесение поправок и дополнение Приложениями конвенции MARPOL (MARPOL 73/78)
1997 г.	Протокол MARPOL 73/78 утвержден с положениями о загрязнении, в том числе о разливе грузов, сточных водах и загрязнении воздуха.
Май 2005 г.	Конвенция MARPOL 73/78 вступает в полную силу
Апрель 2009 г.	Первое упоминание проектного индекса энергоэффективности и эксплуатационного индекса энергоэффективности в целях минимизации выбросов парниковых газов в МЕРС 59.

Таблица 1
(Окончание)

Август 2009 г.	Инициировано распространение Руководства по добровольному использованию эксплуатационного индекса энергоэффективности.
Июль 2011 г.	Соответствие установленного уровня EEDI становится необходимым для любых новых судов, под которыми понимаются все суда, контракт на которые заключается после 01.01.2013 г., которые вступают в стадию строительства после июля 2013 г. или принятые в эксплуатацию после июля 2015 г.
Октябрь 2016 г.	Начало внедрения ИМО Системы сбора данных DCS (MEPC 70), позволяющей контролировать расход топлива и другие показатели работы водного транспорта.
Март 2018 г.	Система DCS вступает в полную силу.
Январь 2019 г.	Начало первого отчетного периода системы DCS.
Ноябрь 2020 г.	На 75-й сессии комитета MEPC вводится коэффициент оценки энергоэффективности всех эксплуатируемых судов, вне зависимости от даты постройки как расширение EEDI для помощи в оценке энергоэффективности судов, построенных до 2013 г.

Рассматривая правовую деятельность ИМО, необходимо упомянуть другие соглашения, которые напрямую не касаются энергоэффективности, но способны накладывать ограничения на разработку энергоэффективных судовых систем. К ним относятся: Международная конвенция по охране человеческой жизни на море (СОЛАС), Международная конвенция о подготовке и дипломировании моряков и несении вахты (ПДНВ), Конвенция о противообрастающих системах (AFS 2001), Конвенция об управлении балластными водами для предотвращения вторжения чужеродных видов (BMW 2004) и др. Таким образом, являясь основным разработчиком принятых конвенций, ИМО оказывается наиболее компетентной организацией, отвечающей за управление энергоэффективностью морского транспорта. Роль ИМО заключается в создании для судовладельцев равных условий, обеспечивающих решение проблем без угрозы безопасности персонала, конструкции судна или окружающей среды, способствуя инновациям и эффективности.

Основной международной конвенцией, касающейся предотвращения загрязнения морской среды как по эксплуатационным, так и по иным (в частности, аварийным причинам), является Международная конвенция по предотвращению загрязнений с судов (МАРПОЛ) — документ, который был первоначально создан в 1973 г. и обновлен в 1978 г. Объединенный документ вступил в силу в 1983 г., но все предложенные правила начали применяться в полную силу только после 2005 г. Структура конвенции представляет собой ряд правил, разделенных на шесть технических приложений с конкретными инструкциями. Наиболее важной частью МАРПОЛ в отношении энергоэффективности является Прил. VI «Предотвращение загрязнения воздуха с судов», которое с 2011 г. охватывает обязательные технические и эксплуатационные меры по повышению энергоэффективности, направленные на сокращение выбросов парниковых газов.

Рассмотрим основные инструменты регулирования энергоэффективности судов и их характеристики, значимые для данного исследования.

1. Наиболее важной технической мерой для новых судов является *индекс энергоэффективности (EEDI)*, принятый в базовом эталонном значении в 2013 г. Основная функция EEDI состоит в содействии использованию более энергоэффективного оборудования и механизмов на новых судах. Это требование подлежит постепенной корректировке каждые 5 лет и направлено на стимулирование непрерывных инноваций и технического развития на этапе проектирования, начиная с базового (2013 г. — нулевой этап). Целью применения меры является примерно 30 %-й рост энергоэффективности в 2025 г. по сравнению с базовым уровнем и дальнейшее совершенствование конструкций уже на третьем этапе. В основном на этапах разработки и внедрения данная мера была посвящена грузовым судам, но в 2014 г. была внесена поправка для учета оценки судов *ро-ро* и пассажирских судов с их соответствующими справочными значениями.

2. Для судов, находящихся в эксплуатации, применяется *эксплуатационный индекс энергоэффективности (ЕЕОІ)*. Такая техническая мера позволяет судовладельцам и операторам измерять эффективность использования топлива судном в процессе эксплуатации и оценивать влияние любых изменений, включая улучшение планирования рейса, техническое обслуживание оборудования и корпуса судна и др.

3. *План управления энергоэффективностью судна (SEEMP)* представляется операционной мерой, которая призвана направлять деятельность судоходных компаний на управление энергоэффективностью судов, используя, например, ЕЕОІ как инструмент мониторинга. Внедрение Плана инициирует продвижение передового опыта эксплуатации судов с учетом рекомендаций по добровольному использованию ЕЕОІ в судоходстве.

Указанные меры в совокупности направлены на внедрение и распространение новых технологий и методов оптимизации характеристик судна. Дальнейшее развитие концепция получила в июне 2021 г. с принятием Комитета по защите морской среды новых поправок к Прил. VI МАРПОЛ для обеспечения дальнейшего роста энергоэффективности судов. Новые дополнительные меры состоят в следующем.

1. Поправкой Комитета по защите морской среды МЕРС 333(76) вводится *индекс энергоэффективности существующих судов (ЕЕХІ)*, выполняющий функцию оценки энергоэффективности всех находящихся в эксплуатации судов, независимо от даты их постройки. Данный параметр аналогичен ЕЕДІ, охватывает те же типы и размеры судов и методом сопоставления с требуемым ЕЕХІ позволяет убедиться в том, что эксплуатируемое судно соответствует требуемому уровню энергоэффективности.

2. *Индикатор интенсивности углерода (СІІ)*, введенный в четырех поправках (от МЕРС 336(76) до МЕРС 339(76)), разъясняющих индексы и способы работы с ними [10]. Рассматриваемая мера устанавливает рейтинг судов от *A* до *E* и определяет ежегодный коэффициент снижения эксплуатационной углеродоемкости судна. Например, любое судно, классифицируемое как *E* или три года подряд как *D*, должно представить план корректирующих действий для достижения рейтинга *C* или выше, обеспечив рост энергоэффективности. При этом в результате ежегодного пересмотра значений СІІ с течением времени действующий рейтинг судна будет понижен (рис. 1).

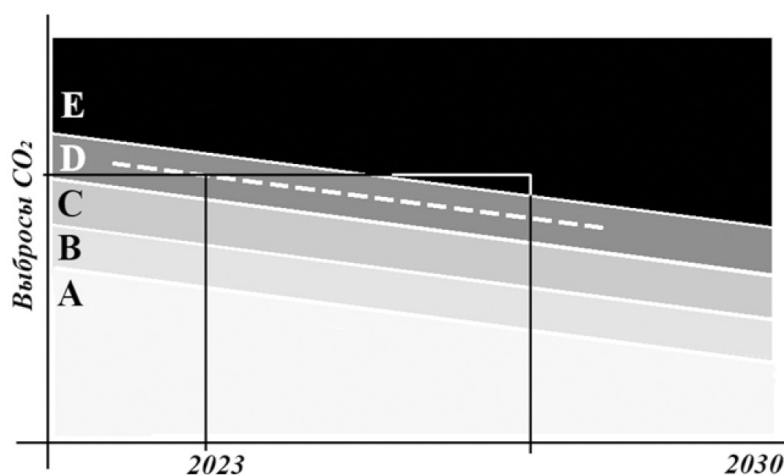


Рис. 1. Индикатор интенсивности выбросов CO₂
Fig. 1. CO₂ emissions intensity indicator

Согласно отчету Международного совета по чистому транспорту [11], [12], наибольшая часть суммарных вредных выбросов от судоходства распределяется следующим образом: 21 % контейнеровозы; 19 % сухогрузы; 13 % танкеры. В этой связи интерес представляют официальные данные ИМО, касающиеся роста энергоэффективности некоторых типов судов, приведенные в табл. 2.

Таблица 2

Тенденции роста энергоэффективности грузовых судов

Тип судна	Повышение энергоэффективности новых судов по сравнению с базовым значением EEDI 2013 г.	Доля новых судов, соответствующих целевым показателям EEDI 2025 г.
Контейнеровозы	На 58 %	71 %
Суда для перевозки генеральных грузов	На 57 %	69 %
Газовозы	На 42 %	13 %
Нефтяные танкеры	На 35 %	26 %
Балкеры	На 27 %	1 %

Помимо регулирования энергоэффективности судов со стороны ИМО, необходимо отметить наборы нормативных актов на европейском уровне. К основным европейским «ориентировкам», затрагивающим вопросы энергоэффективности, следует отнести: мониторинг, отчетность и проверку (MRV), Европейский регламент по утилизации судов (CRR) и Индекс чистого судоходства (CSI). Хронология принятия решений по регулированию на уровне ЕС показана в табл. 3.

Таблица 3

Хронология европейских правил

Организация	Дата	Описание события
MRV	Июнь 2013 г.	Европейская комиссия предлагает Стратегию постепенного включения морских выбросов в политику по парниковым газам.
MRV	Апрель 2015 г.	Стратегия одобрена Европейским парламентом.
MRV	Июль 2015 г.	Стратегия вступает в силу.
MRV	Январь 2018 г.	Судоходные компании должны отслеживать потребление топлива, выбросы углерода и другую соответствующую информацию для каждого судна, находящегося в сфере их ответственности. Первый отчетный период — до декабря 2018 г.
SRR	Ноябрь 2013 г.	SRR предложен Европейским парламентом для скорейшей ратификации Гонконгской конвенции 2009 г. о безопасной и экологически обоснованной утилизации судов.
SRR	Декабрь 2013 г.	SRR вступает в силу.
CSI	14 ноября 2017 г.	Шведская морская администрация утверждает правила фарватерных сборов.
CSI	Январь 2018 г.	Внедряется система, в соответствии с которой суда с высокими экологическими показателями облагаются более низкими сборами.

В табл. 4 приведена хронология создания международных правил и проведения мероприятий за пределами деятельности ИМО, которые имеют отношение к проблемам энергоэффективности судов. Основными из них являются следующие: Гонконгская конвенция (НКС), Принципы Посейдона (PP) и Хартия морских грузов (SCC).

Таблица 4

Хронология международных правил и мероприятий вне рамок деятельности ИМО

Организация	Дата	Описание
НКС	Май 2009 г.	Принята Конвенция о безопасной и экологически чистой утилизации судов.
PP	Ноябрь 2017 г.	Первоначальное совещание финансовых учреждений по климатическим рискам при финансировании судовой отрасли.
PP	Апрель 2018 г.	По соглашению с ИМО установлен уровень требований.
PP	Июнь 2018 г.	Проведены семинары по климатическим рискам в Сингапуре, Лондоне и Нью-Йорке.
PP	Август–сентябрь 2018 г.	Редакционная группа PP начинает работу над первоначальными принципами, которые известны как «Принципы Посейдона».

Таблица 1
(Окончание)

PP	Октябрь 2018 г.	На саммите Глобального морского форума в Гонконге запрошены отзывы промышленных предприятий по первоначальному проекту PP.
PP	Ноябрь 2018 г. – февраль 2019 г.	Редакционная группа PP дорабатывает «Принципы Посейдона», стимулируя банки и другие финансовые учреждения поддерживать «Стратегию ИМО по сокращению выбросов парниковых газов».
PP	18 июня 2019 г.	Презентация «Принципов Посейдона» в Нью-Йорке.
SCC	Июнь 2019 г.	Семинар по климатическим рискам и коллективной цели «Принципов Посейдона» в Лондоне.
SCC	Сентябрь 2018 г. – апрель 2019 г.	Семинары в Сингапуре и Женеве, сбор отзывов от широкой группы заинтересованных сторон о разработке «Хартии морских грузов».
SCC	Октябрь 2019 г.	Стартовое совещание редакционной группы на ежегодном саммите Глобального морского форума в Сингапуре.
SCC	Ноябрь 2019 г. — март 2020 г.	Редакционная группа начинает работу над первоначальными принципами, которые становятся известными как «Устав морских грузов».
SCC	Март 2020 г.	Серия вебинаров для получения отзывов о первоначальном проекте Устава морских грузов от широкой группы заинтересованных сторон.
SCC	Март 2020 г. — июль 2020 г.	Редакционная группа дорабатывает «Хартию морских грузов», обеспечивая структуру, аналогичную «Принципам Посейдона», но применяемую конкретно к фрахтователям.
SCC	7 октября 2020 г.	Запуск морской грузовой хартии во время виртуальной встречи высокого уровня Глобального морского форума.

Таким образом, в мировой судоходной отрасли разработан ряд конкретных правил, направленных на энергоэффективность судов и оказывающих на нее непосредственное влияние. Эти правила, основные из которых были указаны ранее, сведены в табл. 5 в хронологическом порядке.

Таблица 5

Хронология распространения нормативных актов по энергоэффективности

Статус	Дата	Описание
ИМО	Апрель 2009 г.	Первое упоминание о концепциях EEDI и EEOI для сокращения выбросов парниковых газов в МЕРС 59.
ИМО	Июль 2011 г.	EEDI становится необходимым для любых новых судов. (Под «новым» подразумевается любое судно, контракт на которое заключен после января 2013 г., которое вступает в стадию строительства после июля 2013 г. или те, которые приняты в эксплуатацию после июля 2015 г.).
Европейский	Декабрь 2013 г.	Вступает в силу «Закон об утилизации и регулировании судов» (SRR).
Европейский	Январь 2018 г.	Внедряется индекс чистого судоходства, награждающий суда с высокими экологическими показателями меньшими сборами за дальние рейсы.
Европейский	Январь 2018 г.	Судоходные компании, подающие заявку на MRV, должны отслеживать потребление топлива, выбросы углерода и другую соответствующую информацию для каждого судна, находящегося под их юрисдикцией. Первый отчетный период до декабря 2018 г.
ИМО	Январь 2019 г.	Начало первого отчетного периода по всем судам, включенным в Систему сбора данных.
Международный	18 июня 2019 г.	Презентация «Принципов Посейдона» в Нью-Йорке.
Международный	7 октября 2020 г.	Запуск морской грузовой хартии во время виртуальной встречи высокого уровня Глобального морского форума.

Чтобы представить дальнейшую перспективу развития событий по обеспечению энергоэффективности судов, рассмотрению подлежит комплекс мер по оптимизации энергопотребления судна, состоящий из выбора наилучших решений. Проект поправок к Конвенции МАРПОЛ требует сочетания эксплуатационных и технических подходов к энергоэффективности, т. е. большинство мер следует разделить на такие, которые необходимо применять на стадии проектирования и постройки судна, и те, которые могут быть применены к судну на этапе эксплуатации.

Энергоэффективность на этапе проектирования. Очевидным преимуществом этого направления является то, что после внедрения мероприятий, обеспечивающих соответствие требованиям по энергоэффективности, они не требуют постоянного контроля и корректировок для достижения оптимальной производительности, а предписывают только регулярное техническое обслуживание. Такие обстоятельства оставляют судно с оптимизированной энергоэффективностью и «экологическим следом» на протяжении всего жизненного цикла. Предлагаемые методы варьируются от применения альтернативных видов топлива до модификаций корпуса, энергетической установки и систем утилизации энергии отработавших газов [13]. Для оценки указанных мер существует достаточное число методик, но при этом большинство из них используют EEDI в качестве основы [14], [15] и др. Несмотря на имеющиеся недостатки EEDI оказывается полезным в качестве критерия сравнения различных показателей, так как наличие унифицированного набора параметров облегчает оценку энергоэффективности.

Оптимизация формы корпуса судна — метод улучшения характеристик судов для решения различных задач, начиная с повышения гидродинамических характеристик и заканчивая повышением живучести и транспортной эффективности. Общее влияние формы корпуса на энергоэффективность значительно. За истекшее десятилетие EEDI увеличивался за счет таких факторов, как более высокий коэффициент полноты и более низкий коэффициент водоизмещения по длине судна [16]. Анализ влияния длины, ширины и осадки судна на энергоэффективность и топливную экономичность показывает, что уменьшение любого из них на 1 % при неизменном дедейте приводит к снижению потребляемой мощности от 4,6 % для длины, 2 % для ширины и 2,8 % для осадки. При этом влияние размеров корпуса на EEDI является менее значительным, чем на расход топлива, составляя 0,7–2,5 % в зависимости от выбранного параметра.

Процесс оптимизации за счет снижения сопротивления корпуса, основанный на уменьшении смачиваемой поверхности судна, когда внимание сосредоточено на конструктивных изменениях для минимизации лобового сопротивления и использования различных типов бульба и кормы для уменьшения воздействия волн, не в полной мере учитывает факторы влияния на сопротивление движению судна. Значимым аспектом влияния оказывается шероховатость площадь подводной части судна. В этом плане особую важность приобретают не только мероприятия по очистке корпуса, но и разработка и использование специальных покрытий для корпуса, внедрение технологий аэродинамической смазки и др. Установлено, что подводная очистка корпуса танкера «Афромакс» обеспечивает до 9 % снижения расхода топлива, а при постановке судна для очистки корпуса в сухой док достигается до 17 % экономии топлива [17].

Оптимизация судовой энергетической установки может рассматриваться как еще одно направление повышения энергоэффективности, поскольку мощность главных и вспомогательных двигателей напрямую влияет на выбросы CO_2 . Оптимизация возможна на основе новых инновационных технологий силовых установок различных типов. Так, например, паровые системы, особенно системы, реализующие органический цикл Ренкина, выявляют наибольшие потенциальные преимущества, способствуя достижению лучших показателей энергоэффективности для круизных судов, когда требуется глубокая оптимизация электропотребления судна [15]. Другим примером оптимизации являются силовые установки, реализующие принцип электродвижения. При этом наиболее высокую энергоэффективность показывают дизель-электрические установки при модернизации СЭУ [14].

В то время как изучение главного двигателя является очень важным направлением, оптимизация гребных винтов также является ключевым направлением повышения энергоэффективности

[18]. Направленность этого способа роста эффективности инвариантна. Например, несмотря на то, что винты фиксированного шага обычно более экономичны, использование винта регулируемого шага может оказаться более выгодным, если судно в течение длительного времени работает в широком диапазоне рабочих режимов. Таким образом, при оценке силовой установки следует учитывать характеристики всей пропульсивной системы. Подтверждением такого подхода является исследование конструкции, синтеза и эксплуатации пропульсивной системы танкера-газовоза, выполненное в [19], которое демонстрирует потенциальные возможности экономической выгоды до 5,1 % при наилучшем сочетании характеристик двигателя и движителя.

Важным аспектом проблемы роста EEDI также является оптимизация вспомогательных систем судна. Минимизация энергии, потребляемой оборудованием СЭУ за счет использования более эффективных устройств и / или путем снижения потерь в судовой энергосистеме, может оказаться решающим фактором повышения энергоэффективности. Для создания эффективной энергосистемы вспомогательных устройств и механизмов необходим комплексный анализ электроэнергетических потоков в судовой установке, позволяющий выявить основные недостатки и принять необходимые решения для их устранения. Перспективным решением является глубокая рекуперация отработанного тепла, которая по разным данным способна обеспечивать около 72 % потребляемой энергии в ходовом режиме. Существуют также другие эффективные решения, например, работа приводных электродвигателей с изменяющейся частотой вращения в зависимости от требуемой нагрузки [2], задействование валогенераторов [20] и т. д.

Другие возможные подходы к оптимизации энергосистем на судне могут предусматривать стандарты качества электроэнергии, различные частотные диапазоны и влияние топологий силовых преобразователей на каждый из этих частотных диапазонов. Одним из вариантов является использование подачи электроэнергии на суда с берега. В ряде случаев во время выполнения обслуживания судов, грузовых или иных операций в порту энергообеспечение судового оборудования происходит за счет вспомогательных дизель-генераторов, обеспечивающих судно электроэнергией. Использование берегового электропитания позволит вывести из работы вспомогательные двигатели, прекратить расходование топлива и выбросы CO_2 . Такая практика используется судами General Cargo и судами с гибридными системами. Ожидается, что она в ближайшие годы будет внедрена в большинстве портов. Это также очень перспективно для круизных лайнеров из-за большого количества энергии, необходимой пассажирам, которые остаются на борту во время стоянки в порту, что вызывает большое электропотребление судовых бортовых источников тока [21].

Гибридные энергетические системы предусматривают комбинацию первичного теплового двигателя и системы накопления энергии, обычно в виде аккумуляторной батареи. Система производит накопление энергии на низких нагрузках и высвобождает аккумулированную энергию на режимах, близких к предельным, что позволяет первичному двигателю работать с максимальной эффективностью на режиме настройки, обеспечивая тем самым сокращение расхода топлива. Такие системы получили широкое распространение в автомобильной промышленности. Успешное их применение в автопроме вызвало интерес со стороны судостроителей. Согласно результатам первичных исследований, такие установки актуальны для современных балкеров и позволяют достичь повышения общей эффективности судна в размере 2–10 % [22].

Более поздние исследования гибридной энергетической установки танкера с использованием топливных элементов свидетельствуют о потенциальных возможностях сокращения на 9–16 % выбросов CO_2 в зависимости от конфигурации компоновки дизельной установки и топливных элементов [23]. Следует признать, что подобные установки обладают более высокой сложностью и стоимостью, чем обычная архитектура энергетической системы. Существование таких инновационных систем вызвало потребность в создании новой методологии оценки эффективности судов с гибридными энергетическими системами. Эта методология оценивает комплексные энергосистемы, характеризующиеся централизованным производством электроэнергии как для основных, так и для вспомогательных систем, реализуя принципы электродвижения.

Анализ энергоэффективности более 380 современных судов отражает тенденции снижения EEDI ниже эталонного значения для судов с гибридными энергетическими установками [9].

Альтернативные источники энергии, такие как ветряные турбины, фотоэлектрические панели, валогенераторы и другие ресурсы, являются еще одним весьма эффективным и привлекательным способом сокращения выбросов диоксида углерода за счет снижения расхода топлива.

Энергия ветра — один из самых древних источников энергообеспечения судна. В современном флоте это направление отражается в создании конструкций с ветряными турбинами для выработки электроэнергии или в содействии движению судна посредством «жестких парусов» и других устройств (например, роторов Флеттнера — роторные паруса). Использование этих устройств предъявляет специфические требования к конструкции судна, а именно наличие достаточного свободного пространства на палубе без прилегающих конструкций и достаточно прочных мест крепления. Это делает ряд судов непригодными для такого рода устройств (например, контейнеровозы или суда типа Ро-Рах. При этом оборудование танкеров или сухогрузов подобными устройствами обеспечивает экономию до 20 % в зависимости от направления и скорости ветра [24], а срок окупаемости модернизации составляет приблизительно 6 лет.

Несмотря на высокую эффективность использования ветряных устройств наиболее известным альтернативным источником является солнечная энергия, преобразуемая в электроэнергию солнечными батареями. Оборудование преобразователями энергии Солнца силовой установки судна типа Ро-Ро позволяет увеличить на 8 % КПД СЭУ и до 7,4 % снизить потребность в топливе [25]. Дополнительный эффект от применения солнечных батарей состоит в покрытии охлаждаемых зон как в портах, так и на судах, благодаря чему происходит не только производство электроэнергии, но и в ряде случаев снижаются затраты на работу систем охлаждения. Особо эффективным решением помимо солнечной и ветровой энергии, на котором необходимо акцентировать внимание, является использование водородных топливных элементов, которые внедряются в некоторые гибридные системы и обладают КПД, практически и теоретически недостижимым для любых тепловых двигателей, поскольку не подпадают под действие теоремы Карно [26]. Водород становится все более распространенным способом хранения энергии и может быть получен с использованием абсолютно экологически безопасных источников, не провоцирующих выбросов диоксида углерода. Добавление топливного элемента мощностью 3 МВт с 770 м³ сжатого водорода может производить 10,6 ГВт·ч энергии в год, сокращая при этом выбросы CO₂ более чем на 2300 т [8].

Создание установок на нетрадиционных топливах может рассматриваться как одно из наиболее перспективных направлений сокращения выбросов парниковых газов на стадии проектирования судов. Уникальность данного направления состоит в том, что оно способно обеспечить 100 %-е сокращение выбросов CO₂ путем использования топлив, не содержащих в своем составе углерода. Наибольшие ожидания в сокращении выбросов диоксида углерода связаны с разработкой конструкций СЭУ, адаптированных к использованию новых видов топлив, не нарушающих естественный оборот CO₂ в природе, взамен традиционных ископаемых углеводородов. К таким топливам, как отмечалось в [27], следует отнести аммиак, метанол, биогаз и др.

Энергоэффективность на этапе эксплуатации. В то время как все описанные ранее методы могут способствовать значительной экономии энергии и позволяют добиться существенного сокращения выбросов CO₂ и затрат на топливо, их главный недостаток состоит в том, что они могут применяться только на стадиях постройки и проектирования судов, а суда, находящиеся в эксплуатации для реализации этих новаторских концепций, могут потребовать глубокой модернизации, что повлечет за собой высокие инвестиционные затраты. Однако и на этапе эксплуатации суда способны сокращать свои выбросы посредством относительно простых средств, таких, например, как замена используемого топлива и оптимизация рейса, даже несмотря на то, что подобные меры могут иметь предел как по безопасности, так и экономической целесообразности. Эксплуатационные меры могут применяться к любому судну и не требуют глубокой модернизации энергетической установки или изменения ее конструкции. Необходимо отметить, что меры, касающиеся этого направления, имеют большую историю и даже предшествуют разработке и введению EEDI.

Одним из наиболее распространенных и доступных способов минимизации энергопотребления является сокращение скорости перевозок. Так, снижение скорости движения контейнеровоза всего на 5 % вызывает снижение расхода топлива в пределах 16–19 %. Более скромные результаты в пределах 13 % экономии достигаются для сухогрузов и танкеров. Дополнительная экономия топлива может быть достигнута путем снижения энергопотребления вспомогательным оборудованием. Учитывая, что до 70 % от потребления приходится на насосы (большой потенциал имеет использование насосов регулируемой производительности). Примером может служить оборудование, которое позволяет снизить на 60 % потребление электроэнергии циркуляционных насосов системы охлаждения главного двигателя [28]. В полной мере такая экономия может быть распространена и на оборудование других систем (топливной, масляной, вентиляции и т. д.).

Практика «медленного движения» представляется весьма ценной и актуальной, но у нее имеются недостатки, состоящие в том, что для судна по мере снижения проектной скорости ухудшается управляемость и оно теряет устойчивость на курсе и кроме того, увеличивается продолжительность рейса. Это повышает важность выбора оптимального маршрута для операторов судов как фактора снижения выбросов парниковых газов и роста энергоэффективности.

Известно, что одним из ключевых аспектов влияния на эксплуатационную энергоэффективность является влияние факторов окружающей среды, таких как скорость и направление ветра, скорость течений и глубина под килем. При этом данные многочисленных исследований указывают на то, что высота волны и скорость ветра являются основными неблагоприятными факторами для достижения высокой энергоэффективности. Изменчивость во времени и неопределенность, связанные с этими факторами, могут затруднить определение оптимальной скорости плавания даже при наличии эмпирических данных о состоянии моря. В настоящее время все большее внимание уделяется разработке методов динамической оптимизации условий перевозок, внедрение которых, по данным [3], могут обеспечить снижение до 28 % расхода топлива.

При рассмотрении вопросов повышения эксплуатационной энергоэффективности необходимо уделить отдельное внимание оптимизации загрузки судна. В этой связи на первый план выходит не только наиболее полное и эффективное использование грузового пространства, но и способы сокращения сопротивления движению судна за счет выбора наиболее выгодного деферента с учетом условий средней осадки. Этот метод эффективен в сочетании с отмеченными ранее и зависит от таких факторов, как скорость и направление ветра, осадка судна и мощность главного двигателя. В исследованных случаях максимальное снижение расхода топлива может достигать почти 14 %. Это означает, что существующие суда могут получить огромный выигрыш в энергоэффективности при минимальных затратах [7]. Это особенно актуально, если оптимальная дифференровка может быть достигнута за счет смещения грузов без использования водяного балласта.

Как следует из ранее изложенного, энергоэффективность судов коммерческого флота, структура которой представлена на рис. 2, является совокупностью разнонаправленных подходов, охватывающих весь жизненный цикл судна от проектирования до утилизации с учетом его назначения. Как следствие, построение всеобъемлющего критерия оценки энергоэффективности остается востребованной, но не решенной в полной мере задачей.

Несмотря на существование всех существующих экономически эффективных технических мер судоходные компании в ряде случаев принимают их без особого энтузиазма и крайне настоятельно. Такой подход со стороны компаний называют «разрывом в энергоэффективности» [29]. Он в ряде случаев может состоять в конфликте интересов, когда на рынке фрахтования выгодоприобретатель не является инвестором проекта и тогда инвестор может не извлечь выгоды из проекта. По этой причине чаще всего среди оперативных мер применяется практика «медленного движения» [30]. Кроме того, существуют и другие препятствия на пути развития энергоэффективности судоходства.



Рис. 2. Классификация методов повышения энергоэффективности
Fig. 2. Classification of methods for increasing energy efficiency

Внедрение методов энергоэффективности требует новых политических решений, организационных мероприятий и новой инфраструктуры для обеспечения мониторинга инвариантных подходов к разрешению рассматриваемых проблем. В этом плане новаторские проекты могут оказать помощь как компаниям, так и разработчикам новых требований при наличии взаимных интересов. Примером могут служить политические решения со стороны ИМО, касающиеся достижения энергоэффективности, среди которых в первую очередь необходимо выделить «План управления энергоэффективностью судов» — SEEMP. Таким образом, достижение высокой энергоэффективности коммерческого флота требует дальнейших исследований и разработок оценочных методик, направленных на понимание того, как знания и накопленный опыт по вопросам энергетики могут быть использованы среди судоходных компаний, а также на использование и дальнейшее развитие систем мониторинга применяемых мер в области энергоэффективности.

Выводы (Summary)

На основании выполненного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Нормы и принципы регулирования энергоэффективности в судоходной отрасли находятся в постоянной динамике и внедряются как на региональном, так и на международном уровне. Важные и действенные шаги по регламентации предпринимаются со стороны Международной морской организации, разработавшей и совершенствующей инструменты регулирования: конструктивный и эксплуатационный Индекс энергоэффективности, План управления энергоэффективностью, Индекс энергоэффективности существующих судов, Индикатор интенсивности углерода. К наиболее значимым инструментам регулирования в судоходной отрасли на международном уровне следует отнести Принципы Посейдона, Хартию морских грузов и др. На европейском уровне вопросы энергоэффективности решаются такими средствами, как Индекс чистого судоходства, Европейский регламент по утилизации судов, мониторинг, отчетность и проверка.

2. Разработанные ИМО критерии оценки энергоэффективности в виде коэффициентов энергоэффективности оказываются крайне полезными для регулирования. Тем не менее методики их оценки не представляются совершенными и универсальными, поэтому требуют постоянного пересмотра и доработки с учетом постоянного развития и совершенствования технологий.

3. Энергоэффективность судов должна обеспечиваться и поддерживаться в течение всего жизненного цикла судна как на стадии проектирования и постройки, так и в процессе эксплуатации судна, вплоть до утилизации. При этом благодаря применяемым мерам экономия топлива может варьироваться от 25 до 75 %.

4. Среди конструктивных мер обеспечения требуемого уровня энергоэффективности на стадии проектирования выделяется ряд направлений, наиболее актуальными среди которых являются оптимизация корпуса судна, оптимизация энергетической установки, использование альтернативных источников энергии, создание конструкций установок, способных работать на альтернативных видах топлив, включая углеродно-нейтральные и безуглеродные, внедрение конструкций гибридной энергетической установки. Так, при наилучшем сочетании характеристик двигателя и движителя можно ожидать более 5 % экономической выгоды. Использование гибридных установок позволит достичь до 10 % повышения общей эффективности судна, а использование альтернативных источников энергии — до 20 %.

5. Применяемые меры по повышению энергоэффективности на стадии проектирования и постройки, несомненно, оказывают существенное и длительное влияние на снижение выбросов CO₂. При этом не следует игнорировать действенные методы, которые могут применяться на этапе эксплуатации. Среди таких методов, которые не требуют глубокой модернизации энергетической установки — обоснованное сокращение скорости перевозки, назначение рациональных режимов работы оборудования СЭУ, оптимизация маршрутов движения и загрузки судна. Указанные методы применимы к любым судам, находящимся в эксплуатации. Например, снижение скорости перевозок на 5 % способно обеспечить до 19 % сокращения расхода топлива, динамическая оптимизация условий перевозок может привести к снижению расхода топлива на 20 %, а оптимизация загрузки судна в ряде случаев обеспечивает до 14 % экономии топлива.

6. На пути к экологически чистому судоходству существуют сложности, препятствующие совершенствованию и применению даже самых рентабельных новаций. Поэтому необходимо предпринимать постоянные усилия в разработке адекватных решений по устранению возникающих проблем, в том числе политических, что способствует минимизации разрыва в энергоэффективности, а также преодолению трудностей в создании конкурентоспособного и экологически устойчивого судоходства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Живлюк Г. Е. Экологическая безопасность энергетических установок: двухтопливные и газовые двигатели / Г. Е. Живлюк, А. П. Петров // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2022. — Т. 14. — № 3. — С. 449–462. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-3-449-462.
2. Hüffmeier J. State-of-the-art methods to improve energy efficiency of ships / J. Hüffmeier, M. Johanson // Journal of Marine Science and Engineering. — 2021. — Vol. 9. — Is. 4. — Pp. 447. DOI: 10.3390/jmse9040447.
3. Wang K. Dynamic optimization of ship energy efficiency considering time-varying environmental factors / K. Wang, X. Yan, Y. Yuan, X. Jiang, X. Lin, R. R. Negenborn // Transportation Research Part D: Transport and Environment. — 2018. — Vol. 62. — Pp. 685–698. DOI: 10.1016/j.trd.2018.04.005.
4. Beşikçi E. B. An application of fuzzy-AHP to ship operational energy efficiency measures / E. B. Beşikçi, T. Keceli, O. Arslan, O. Turan // Ocean engineering. — 2016. — Vol. 121. — Pp. 392–402. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2016.05.031.
5. Иванченко А. А. Энергетическая эффективность судов и регламентация выбросов парниковых газов / А. А. Иванченко, А. П. Петров, Г. Е. Живлюк // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 3 (31). — С. 103–112. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-3-103-112.
6. Ang J. H. Energy-efficient through-life smart design, manufacturing and operation of ships in an industry 4.0 environment / J. H. Ang, C. Goh, A. A. F. Saldivar, Y. Li // Energies. — 2017. — Vol. 10. — Is. 5. — Pp. 610. DOI: 10.3390/en10050610.

7. *Moustafa M. M.* Energy efficient operation of bulk carriers by trim optimization / M. M. Moustafa, W. Yehia, A. W. Hussein // 18th International Conference on Ships and Shipping Research. — Italy: Organising Committee NAV, 2015. — Pp. 484–493.
8. *McKinlay C. J.* Fuel cells for shipping: To meet on-board auxiliary demand and reduce emissions / C. J. McKinlay, S. R. Turnock, D. A. Hudson // Energy Reports. — 2021. — Vol. 7. — Suppl. 2. — Pp. 63–70. DOI: 10.1016/j.egy.2021.02.054.
9. *Ančić I.* Energy efficiency of ro-ro passenger ships with integrated power systems / I. Ančić, N. Vladimir, L. R. Luttenberger // Ocean Engineering. — 2018. — Vol. 166. — Pp. 350–357. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2018.05.042.
10. *Шурпак В. К.* Новые требования ИМО по уменьшению выбросов углекислого газа с морских судов, совершающих транспортную работу / В. К. Шурпак, С. А. Толмачев, М. В. Мусонов // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2021. — № 64–65. — С. 4–18.
11. *Amorariței M.* A preliminary propulsive performances evaluation for an oil tanker to meet EEDI challenge / M. Amorariței // Annals of "Dunarea de Jos" University of Galati. Fascicle XI Shipbuilding. — 2019. — Vol. 42. — Pp. 103–108.
12. *Constantin G.* Analysis of the energy efficiency design index for two container ships and EEDI influence on propulsion performances / G. Constantin, M. Amorariței // Annals of "Dunarea de Jos" University of Galati. Fascicle XI Shipbuilding. — 2018. — Vol. 41. — Pp. 127–132.
13. *Tokuşlu A.* Analyzing the Energy Efficiency Design Index (EEDI) performance of a container ship / A. Tokuşlu // International Journal of Environment and Geoinformatics. — 2020. — Vol. 7. — Is. 2. — Pp. 114–119. DOI: 10.30897/ijegeo.703255.
14. *Ammar N. R.* Evaluation of the environmental and economic impacts of electric propulsion systems onboard ships: case study passenger vessel / N. R. Ammar, I. S. Seddiek // Environmental Science and Pollution Research. — 2021. — Vol. 28. — Pp. 37851–37866. DOI: 10.1007/s11356-021-13271-4.
15. *El Geneidy R.* Increasing energy efficiency in passenger ships by novel energy conservation measures / R. El Geneidy, K. Otto, P. Ahtila, P. Kujala, K. Sillanpää, T. Mäki-Jouppila // Journal of Marine Engineering & Technology. — 2018. — Vol. 17. — Is. 2. — Pp. 85–98. DOI: 10.1080/20464177.2017.1317430.
16. *Papanikolaou A.* Holistic ship design optimization / A. Papanikolaou // Computer-Aided Design. — 2010. — Vol. 42. — Is. 11. — Pp. 1028–1044. DOI: 10.1016/j.cad.2009.07.002.
17. *Adland R.* The energy efficiency effects of periodic ship hull cleaning / R. Adland, P. Cariou, H. Jia, F. C. Wolff // Journal of Cleaner Production. — 2018. — Vol. 178. — Pp. 1–13. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.12.247.
18. *Марговский В. В.* Новое в международной политике снижения эмиссии парниковых газов судами и необходимые мероприятия в морском секторе. Часть 2: Анализ эффективности энергосберегающих мероприятий, применяемых для снижения эмиссии парниковых газов / В. В. Марговский, В. Н. Половинкин, А. В. Пустошный, О. В. Савченко // Труды Крыловского государственного научного центра. — 2023. — № 1 (403). — С. 167–182. DOI: 10.24937/2542-2324-2023-1-403-167-182.
19. *Marques C. H.* An early-stage approach to optimise a marine energy system for liquefied natural gas carriers: Part B — Application / C. H. Marques, C. R. P. Belchior, J. D. Caprace // Ocean Engineering. — 2019. — Vol. 174. — Pp. 96–107. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2019.01.045.
20. *Медведев В. В.* Оценка возможности уменьшения конструктивного коэффициента энергетической эффективности за счет применения валогенераторов в составе судовых энергетических установок с главными высокооборотными двигателями / В. В. Медведев, В. В. Гаврилов, И. А. Сорокин // Морские интеллектуальные технологии. — 2020. — № 1–3 (47). — С. 101–106. DOI: 10.37220/MIT.2020.47.1.048.
21. *Iris Ç.* A review of energy efficiency in ports: Operational strategies, technologies and energy management systems / Ç. Iris, J. S. L. Lam // Renewable and Sustainable Energy Reviews. — 2019. — Vol. 112. — Pp. 170–182. DOI: 10.1016/j.rser.2019.04.069.
22. *Dedes E. K.* Assessing the potential of hybrid energy technology to reduce exhaust emissions from global shipping / E. K. Dedes, D. A. Hudson, S. R. Turnock // Energy policy. — 2012. — Vol. 40. — Pp. 204–218. DOI: 10.1016/j.enpol.2011.09.046.
23. *Giap V. T.* System simulation and exergetic evaluation of hybrid propulsion system for crude oil tanker: A hybrid of solid-oxide fuel cell and gas engine / V. T. Giap, Y. D. Lee, Y. S. Kim, K. Y. Ahn, D. H. Kim, J. I. Lee // Energy conversion and management. — 2020. — Vol. 223. — Pp. 113265. DOI: 10.1016/j.enconman.2020.113265.
24. *Seddiek I. S.* Harnessing wind energy on merchant ships: case study Flettner rotors onboard bulk carriers / I. S. Seddiek, N. R. Ammar // Environmental Science and Pollution Research. — 2021. — Vol. 28. — Pp. 32695–32707. DOI: 10.1007/s11356-021-12791-3.

25. Karatuğ Ç. Design of a solar photovoltaic system for a Ro-Ro ship and estimation of performance analysis: A case study / Ç. Karatuğ, Y. Durmuşoğlu // *Solar Energy*. — 2020. — Vol. 207. — Pp. 1259–1268. DOI: 10.1016/j.solener.2020.07.037.

26. Живлюк Г. Е. Применение топливных элементов в энергообеспечении водного транспорта / Г. Е. Живлюк, А. П. Петров // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2022. — Т. 14. — № 1. — С. 104–119. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-1-104-119.

27. Живлюк Г. Е. Перспективные технологии водного транспорта для ограничения парникового эффекта / Г. Е. Живлюк, А. П. Петров // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2021. — Т. 13. — № 5. — С. 730–743. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-5-730-743.

28. Dere C. Load optimization of central cooling system pumps of a container ship for the slow steaming conditions to enhance the energy efficiency / C. Dere, C. Deniz // *Journal of Cleaner Production*. — 2019. — Vol. 222. — Pp. 206–217. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.03.030.

29. Johnson H. Barriers to energy efficiency in shipping / H. Johnson, K. Andersson // *WMU Journal of Maritime Affairs*. — 2016. — Vol. 15. — Pp. 79–96. DOI: 10.1007/s13437-014-0071-z.

30. Rehmatulla N. Barriers to energy efficiency in shipping: A triangulated approach to investigate the principal agent problem / N. Rehmatulla, T. Smith // *Energy Policy*. — 2015. — Vol. 84. — Pp. 44–57. DOI: 10.1016/j.enpol.2015.04.019.

REFERENCES

1. Zhivljuk, Grigorij E., and Aleksandr P. Petrov. “Environmental safety of power plants: dual-fuel and gas engines.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 14.3 (2022): 449–462. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-3-449-462.

2. Hüffmeier, Johannes, and Mathias Johanson. “State-of-the-art methods to improve energy efficiency of ships.” *Journal of Marine Science and Engineering* 9.4 (2021): 447. DOI: 10.3390/jmse9040447.

3. Wang, Kai, Xinping Yan, Yupeng Yuan, Xiaoli Jiang, Xiao Lin, and Rudy R. Negenborn. “Dynamic optimization of ship energy efficiency considering time-varying environmental factors.” *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 62 (2018): 685–698. DOI: 10.1016/j.trd.2018.04.005.

4. Beşikçi, E. Bal, T. Kecici, O. Arslan, and O. Turan. “An application of fuzzy-AHP to ship operational energy efficiency measures.” *Ocean engineering* 121 (2016): 392–402. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2016.05.031.

5. Ivanchenko, A. A., A. P. Petrov, and G. E. Zhivlyuk. “Energy efficiency of ships and regulation of greenhouse gas emissions.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 3(31) (2015): 103–112. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-3-103-112.

6. Ang, Joo Hock, Cindy Goh, Alfredo Alan Flores Saldivar, and Yun Li. “Energy-efficient through-life smart design, manufacturing and operation of ships in an industry 4.0 environment.” *Energies* 10.5 (2017): 610. DOI: 10.3390/en10050610.

7. Moustafa, M. M., W. Yehia, and A. W. Hussein. “Energy efficient operation of bulk carriers by trim optimization.” *18th International Conference on Ships and Shipping Research*. Italy: Organising Committee NAV, 2015. 484–493.

8. McKinlay, C. J., S. R. Turnock, and D. A. Hudson. “Fuel cells for shipping: To meet on-board auxiliary demand and reduce emissions.” *Energy Reports* 7 (2021): 63–70. DOI: 10.1016/j.egyr.2021.02.054

9. Ančić, Ivica, Nikola Vladimir, and Lidija Runko Luttenberger. “Energy efficiency of ro-ro passenger ships with integrated power systems.” *Ocean Engineering* 166 (2018): 350–357. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2018.05.042.

10. Shurpyak, V. K., S. A. Tolmachev, and M. V. Musonov. “New IMO requirements for reduction of carbon dioxide emissions from ships performing transport work.” *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping* 64–65 (2021): 4–18.

11. Amaraitei, Mihaela. “A preliminary propulsive performances evaluation for an oil tanker to meet EEDI challenge.” *Annals of “Dunarea de Jos” University of Galati. Fascicle XI Shipbuilding* 42 (2019): 103–108.

12. Constantin, Gabriel, and Mihaela Amaraitei. “Analysis of the energy efficiency design index for two container ships and EEDI influence on propulsion performances.” *Annals of “Dunarea de Jos” University of Galati. Fascicle XI Shipbuilding* 41 (2018): 127–132.

13. Tokuşlu, Aydın. “Analyzing the Energy Efficiency Design Index (EEDI) performance of a container ship.” *International Journal of Environment and Geoinformatics* 7.2 (2020): 114–119. DOI: 10.30897/ijegeo.703255.
14. Ammar, Nader R., and Ibrahim S. Seddiek. “Evaluation of the environmental and economic impacts of electric propulsion systems onboard ships: case study passenger vessel.” *Environmental Science and Pollution Research* 28 (2021): 37851–37866. DOI: 10.1007/s11356-021-13271-4.
15. El Geneidy, Rami, Kevin Otto, Pekka Ahtila, Pentti Kujala, Kari Sillanpää, and Tero Mäki-Jouppila. “Increasing energy efficiency in passenger ships by novel energy conservation measures.” *Journal of Marine Engineering & Technology* 17.2 (2018): 85–98. DOI: 10.1080/20464177.2017.1317430.
16. Papanikolaou, Apostolos. “Holistic ship design optimization.” *Computer-Aided Design* 42.11 (2010): 1028–1044. DOI: 10.1016/j.cad.2009.07.002.
17. Adland, Roar, Pierre Cariou, Haiying Jia, and Francois-Charles Wolff. “The energy efficiency effects of periodic ship hull cleaning.” *Journal of Cleaner Production* 178 (2018): 1–13. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.12.247.
18. Magarovskiy, V. V., V. N. Polovinkin, A. V. Pustoshny, and O. V. Savchenko. “Novelties in the international policy towards mitigation of greenhouse gas emissions from ships and necessary measures in marine industry Part 2. Efficiency analysis of power-saving measures intended to reduce greenhouse gas emissions.” *Transactions of the Krylov State Research Centre* 1(403) (2023): 167–182. DOI: 10.24937/2542-2324-2023-1-403-167-182.
19. Marques, Cristófer Hood, Carlos Rodrigues Pereira Belchior, and Jean-David Caprace. “An early-stage approach to optimise a marine energy system for liquefied natural gas carriers: Part B — Application.” *Ocean Engineering* 174 (2019): 96–107. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2019.01.045.
20. Medvedev, V. V., V. V. Gavrilov, and I. A. Sorokin. “Evaluation of the possibility of reducing the energy efficiency design index based on the application of shaft generators in the composition of marine power plant with main high-speed engine.” *Marine Intellectual Technologies* 1–3(47) (2020): 101–106. DOI: 10.37220/MIT.2020.47.1.048.
21. Iris, Çağatay, and Jasmine Siu Lee Lam. “A review of energy efficiency in ports: Operational strategies, technologies and energy management systems.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 112 (2019): 170–182. DOI: 10.1016/j.rser.2019.04.069.
22. Dedes, Eleftherios K., Dominic A. Hudson, and Stephen R. Turnock. “Assessing the potential of hybrid energy technology to reduce exhaust emissions from global shipping.” *Energy policy* 40 (2012): 204–218. DOI: 10.1016/j.enpol.2011.09.046.
23. Giap, Van-Tien, Young Duk Lee, Young Sang Kim, Kook Young Ahn, Dae Hee Kim, and Jung Il Lee. “System simulation and exergetic evaluation of hybrid propulsion system for crude oil tanker: A hybrid of solid-oxide fuel cell and gas engine.” *Energy conversion and management* 223 (2020): 113265. DOI: 10.1016/j.enconman.2020.113265.
24. Seddiek, Ibrahim S., and Nader R. Ammar. “Harnessing wind energy on merchant ships: case study Flettner rotors onboard bulk carriers.” *Environmental Science and Pollution Research* 28 (2021): 32695–32707. DOI: 10.1007/s11356-021-12791-3.
25. Karatug, Çağlar, and Yalçın Durmuşoğlu. “Design of a solar photovoltaic system for a Ro-Ro ship and estimation of performance analysis: A case study.” *Solar Energy* 207 (2020): 1259–1268. DOI: 10.1016/j.solener.2020.07.037.
26. Zhivljuk, Grigorij E., and Aleksandr P. Petrov. “The use of fuel cells in the energy supply of water transport.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 14.1 (2022): 104–119. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-1-104-119.
27. Petrov, Aleksandr P., and Grigorij E. Zhivljuk. “Advanced water transport technologies for limiting the greenhouse effect.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 13.5 (2021): 730–743. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-5-730-743.
28. Dere, Caglar, and Cengiz Deniz. “Load optimization of central cooling system pumps of a container ship for the slow steaming conditions to enhance the energy efficiency.” *Journal of Cleaner Production* 222 (2019): 206–217. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.03.030.
29. Johnson, Hannes, and Karin Andersson. “Barriers to energy efficiency in shipping.” *WMU Journal of Maritime Affairs* 15 (2016): 79–96. DOI: 10.1007/s13437-014-0071-z.
30. Rehmatulla, Nishatabbas, and Tristan Smith. “Barriers to energy efficiency in shipping: A triangulated approach to investigate the principal agent problem.” *Energy Policy* 84 (2015): 44–57. DOI: 10.1016/j.enpol.2015.04.019.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Живлюк Григорий Евгеньевич —

кандидат технических наук, доцент

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала

С. О. Макарова»

198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,

ул. Двинская, 5/7

e-mail: *spb-engine-prof@mail.ru, kaf_dvs@gumrf.ru*

Петров Александр Павлович —

кандидат технических наук, профессор

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала

С. О. Макарова»

198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,

ул. Двинская, 5/7

e-mail: *app.polab@inbox.ru, PetrovAP@gumrf.ru*

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Zhivljuk, Grigorij E. —

PhD, associate professor

Admiral Makarov State University of Maritime

and Inland Shipping

5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,

Russian Federation

e-mail: *spb-engine-prof@mail.ru, kaf_dvs@gumrf.ru*

Petrov, Aleksandr P. —

PhD, professor

Admiral Makarov State University of Maritime

and Inland Shipping

5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,

Russian Federation

e-mail: *app.polab@inbox.ru, PetrovAP@gumrf.ru*

Статья поступила в редакцию 11 января 2024 г.

Received: January 11, 2024.