

УДК 621.43.074

КЛЮЧЕВЫЕ ПОДХОДЫ К ОБЕСПЕЧЕНИЮ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ СУДОВ

Живлюк Григорий Евгеньевич¹, доцент, кандидат технических наук

e-mail: spb-engine-prof@mail.ru

Петров Александр Павлович¹, доцент, кандидат технических наук

e-mail: PetrovAP@gumrf.ru

¹ Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Предметом настоящего исследования является энергоэффективность судов морского и речного флота. В работе рассмотрены нормативные требования по энергоэффективности, приведена эволюция требований как международного, так и регионального уровней. Отмечается, что методы оценки энергоэффективности направлены и, в основном, базируются на мониторинге выбросов диоксида углерода при работе двигателей на различных видах топлива. В работе уделено внимание мероприятиям по сокращению выбросов CO₂ на всех этапах жизненного цикла судов, начиная с проектирования и постройки до утилизации судна.

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

KEY APPROACHES TO ENSURING THE ENERGY EFFICIENCY OF SHIPS

Zhivlyuk Grigory Evgenievich¹, Associate Professor, Candidate of Technical Sciences

e-mail: spb-engine-prof@mail.ru

Petrov Alexander Pavlovich¹, Associate Professor, Candidate of Technical Sciences

e-mail: PetrovAP@gumrf.ru

¹ Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, Saint Petersburg, Russia

Abstract. The subject of this study is the energy efficiency of ships of the marine and river fleet. The paper considers the regulatory requirements for energy efficiency, shows the evolution of requirements at both international and regional levels. It is noted that energy efficiency assessment methods are aimed at and are mainly based on monitoring carbon dioxide emissions from engines running on various types of fuels. The work focuses on measures to reduce CO₂ emissions at all stages of the life cycle of ships, from design and construction to ship recycling.

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

Введение (Introduction)

Тенденции негативных климатических изменений последних лет отражают неуклонный рост уровня среднегодовых температур на планете. Достигнутый среднетемпературный максимум в 17,24°C вызывает глубокую озабоченность, и несмотря на то, что всемирное потепление – достаточно медленный и постепенный процесс, долгосрочные последствия могут оказаться катастрофическими. Одной из самых известных общепризнанных причин разогрева поверхности и нижних слоев атмосферы Земли оказывается насыщение атмосферы парниковыми газами, особенно диоксидом углерода CO₂. Наряду с естественными источниками выбросов CO₂, антропогенный фактор, выраженный в сжигании ископаемых углеводородов, вносит свой вклад в создание парникового эффекта. Как отмечалось ранее [1], 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. И несмотря на то, что такие значения выбросов могут показаться незначительными, если не предпринимать соответствующих мер сдерживания, эти выбросы будут продолжать расти вместе с сегментом транспортных услуг, пятикратно увеличиваясь с 2012 по 2050 год [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 от 25% до 75% и может быть достигнута за счет более эффективной эксплуатации существующих судов и эффективного проектирования новых судов [4].

За последние десятилетия созданы несколько проектов, ответственных за решение рассматриваемых проблем. Так, Международная морская организация (ИМО) в 2011 году ввела Индекс энергоэффективности – EEDI, который в последствии был усовершенствован и дополнен (подробнее см. [5]). Общепринятый EEDI, позиционируемый как «показатель энергоэффективности», фактически является измерением выбросов CO₂, что связано с энергоэффективностью опосредованно. Кроме того, EEDI оценивает часть энергетической системы судна, в одной рабочей точке. То есть, его оценка энергоэффективности не может быть расценена как полная и всеобъемлющая [6]. Это проблема общая и для других нормативных актов, которые почти исключительно отслеживают энергоэффективность с точки зрения выбросов CO₂.

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

- состояние законодательной и нормативной базы, влияющей на энергоэффективность;
- анализ и оценка 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 способны образоваться при реализации таких мероприятий.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Нормативно-правовая база. Можно утверждать, что до настоящего времени не существует единого норматива, непосредственно касающегося энергоэффективности судов, как основной концепции регулирования. Принципиально, существующие правила,



регламентирующие энергоэффективность судов, не являются автономными и в значительной мере зависят от заинтересованных структур. Примером тому может служить EEDI, применение которого не корректно для некоторых типов судов, и его метод оценки оказывается не вполне адекватен в случае использования в составе судовой энергетической установки специфических энергетических систем.

Исходя из этого, уместно будет определиться с происхождением и основными задачами действующего норматива, базирующегося на исследованиях в области энергоэффективности. В таблице 1 показана последовательность создания наиболее важных мер и требований ИМО – головной организации, генерирующей и внедряющей требования и нормативы.

Таблица 1

Хронология правил ИМО в части энергоэффективности

Дата	Описание
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.
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 те, которые приняты в эксплуатацию после июля 2015 г.
октябрь 2016 г.	Начало внедрения ИМО Системы сбора данных DCS (МЕРС 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 сессии комитета МЕРС 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.

Основной международной конвенцией, касающейся предотвращения загрязнения морской среды как по эксплуатационным, так и по иным, в частности, аварийным причинам, является конвенция МАРПОЛ (Международная конвенция по предотвращению загрязнений с судов). Наиболее важной частью МАРПОЛ в отношении энергоэффективности является Приложение VI: Предотвращение загрязнения воздуха с судов, которое с 2011 года охватывает обязательные технические и эксплуатационные меры по повышению энергоэффективности, направленные на сокращение выбросов парниковых газов.

Существуют и другие соглашения, которые напрямую не касаются энергоэффективности: 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.

Ниже приведены характеристики основных инструментов технического регулирования энергоэффективности судов, значимые для исследования.

– Наиболее важной технической мерой для новых судов оказывается **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 стимуляцию непрерывных инноваций и технического развития на этапе проектирования, начиная с базового (2013 г. – нулевой этап). Целью применения меры является примерно 30% рост энергоэффективности в 2025 г. по сравнению с базовым уровнем и дальнейшем совершенствовании конструкций уже на третьем этапе. В основном, на этапах разработки и внедрения, 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.

– Для судов, находящихся в эксплуатации, применяется **эксплуатационный индекс энергоэффективности (EEOI)**. 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.

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

Указанные меры в совокупности направлены на 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 Приложению VI МАРПОЛ для обеспечения дальнейшего роста энергоэффективности судов. Новые дополнительные меры представлены нижеследующим.

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

– **Индикатор интенсивности углерода (СИ)**, введенный в четырех поправках (от МЕРС 336(76) до МЕРС 339(76)), разъясняющих индексы и способы работы с ними, см также [7]. Рассматриваемая мера устанавливает рейтинг судов от А до Е и определяет ежегодный коэффициент снижения эксплуатационной углеродоемкости судна. К примеру, любое судно, классифицируемое как Е или три года подряд как D, должно представить план корректирующих действий для достижения рейтинга С или выше, обеспечив рост энергоэффективности. При этом в результате ежегодного пересмотра значений СИ с течением времени действующий рейтинг судна будет понижен.

Чтобы представить дальнейшую перспективу развития событий по обеспечению энергоэффективности судов, рассмотрим комплекс мер по оптимизации энергопотребления судна, состоящий из выбора наилучших решений.



Энергоэффективность на этапе проектирования. Явным преимуществом этого направления оказывается то, что после внедрения мероприятий 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 [8].

Оптимизация судовой энергетической установки может рассматриваться как второе направление повышения энергоэффективности, поскольку мощность главных и вспомогательных двигателей напрямую влияет на выбросы CO₂. Оптимизация возможна на основе новых инновационных технологий силовых установок различных типов [9, 10].

Оптимизация формы корпуса судна – исконный метод улучшения характеристик судов для решения различных задач, начиная с повышения гидродинамических характеристик и заканчивая повышением живучести и транспортной эффективности [11].

Таким образом, при оценке силовой установки следует учитывать характеристики всей пропульсивной системы.

Важным аспектом проблемы роста EEDI также является оптимизация вспомогательных систем судна.

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 [12].

Более поздние исследования гибридной энергетической установки танкера с использованием топливных элементов свидетельствуют о потенциальных возможностях от 9 до 16% сокращения выбросов CO₂ в зависимости от конфигурации компоновки дизельной установки и топливных элементов [13].

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

Наиболее известным альтернативным источником является солнечная энергия, преобразуемая в электроэнергию солнечными батареями. Оборудование преобразователями энергии Солнца силовой установки судна Ро-Ро позволяет увеличить на 8% КПД СЭУ и до 7,4% снижает потребность в топливе [14].

Последним, особо примечательным и эффективным решением, помимо солнечной и ветровой энергии, на котором необходимо заострить внимание, является использование водородных топливных элементов, которые уже внедряются в некоторые гибридные системы и обладают КПД, практически и теоретически недостижимым для любых тепловых двигателей, поскольку не подпадают под действие теоремы Карно.

Создание установок на нетрадиционных топливах может рассматриваться как одно из самых перспективных направлений сокращения выбросов парниковых газов на стадии проектирования судов. Уникальность этого направления состоит в том, что оно единственное из всех рассматриваемых способно обеспечить 100% сокращение выбросов CO₂ путем использования топлив, не содержащих углерода в своем составе. К таким топливам, как отмечалось [15], следует отнести аммиак, метанол, биогаз и др.



Энергоэффективность на этапе эксплуатации. На этапе эксплуатации суда способны сокращать свои выбросы посредством относительно простых средств, например, заменой используемого топлива и оптимизации рейса, даже несмотря на то, что такие меры могут иметь предел как по безопасности, так и по экономической целесообразности.

Одним из самых распространенных и доступных способов минимизации энергопотребления оказывается 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.

Одним из ключевых аспектов влияния на эксплуатационную энергоэффективность является влияние факторов окружающей среды, таких как скорость и направление ветра, при этом данные многочисленных исследований указывают на то, что высота волны и скорость ветра являются основными неблагоприятными факторами достижения высокой энергоэффективности. В настоящее время все больше внимания уделяется разработке методов динамической оптимизации условий перевозок, внедрение которых по данным [3] могут обеспечить снижение до 28% расхода топлива.

Рассматривая вопросы 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.

Как следует из вышеизложенных материалов, энергоэффективность судов коммерческого флота, структура которой представлена на рисунке, оказывается совокупностью разнонаправленных подходов, охватывающих весь жизненный цикл судна от проектирования до утилизации с учетом его назначения.

Судоходные компании в ряде случаев принимают перечисленные меры без особого энтузиазма и крайне настороженно. Такой подход со стороны компаний называют «разрывом в энергоэффективности» [16]. Этот «разрыв» в ряде случаев может состоять в конфликте интересов, когда на рынке фрахтования выгодоприобретатель не является тем, кто инвестировал в проект и тогда инвестор может не извлечь выгоды из проекта. По этой причине чаще всего среди оперативных мер применяется практика «медленного движения» [17]. Помимо подобного конфликта, существуют и другие препятствия на пути развития энергоэффективности судоходства.

Выводы (Summary)

1. Очевидные климатические изменения побуждают ИМО и другие международные организации в своей деятельности уделять значительное внимание вопросам повышения энергоэффективности судов коммерческого и вспомогательного флота, как основного критерия, определяющего выбросы парниковых газов судовыми энергетическими установками.

2. Разработанные ИМО критерии оценки энергоэффективности в виде Коэффициентов энергоэффективности полезны для технического регулирования, но методики их оценки не представляются совершенными, требуют постоянного пересмотра и доработки.

3. Энергоэффективность судов должна обеспечиваться и поддерживаться в течении всего жизненного цикла судна как на стадии проектирования и постройки, так и в процессе эксплуатации судна, вплоть до утилизации.

4. Среди конструктивных мер обеспечения требуемого уровня энергоэффективности на стадии проектирования выделяются: оптимизация корпуса судна; оптимизация



энергетической установки; использование альтернативных источников энергии; установки, работающие на альтернативных видах топлив; внедрение конструкций гибридной энергетической установки.

5. Действены методы, которые могут применяться на этапе эксплуатации: обоснованное сокращение скорости перевозки; назначение рациональных режимов работы оборудования СЭУ; оптимизация маршрутов движения и загрузки судна.

6. На пути к экологически чистому судоходству требуются постоянные усилия по разработке адекватных решений по устранению возникающих проблем. Все эти усилия способствуют минимизации «разрыва в энергоэффективности», преодолевая трудности создания конкурентоспособного и экологически чистого будущего отрасли 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.

2. Hüffmeier, J., State-of-the-Art methods to improve energy efficiency of ships. / Hüffmeier, J., Johanson, M. // Mar. Sci. Eng. – 2021. – 9 (4). – P. 447.

3. Wang, K.e. a. Dynamic optimization of ship energy efficiency considering time-varying environmental factors. Transport. Res. Transport Environ. 2018. – 62. P. 685 – 698.

4. Besikçi, E.B. An application of fuzzy-AHP to ship operational energy efficiency measures. Ocean. Eng. 2016. – 121. – P.392 – 402.

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. Ancic, I. Energy efficiency of ro-ro passenger ships with integrated power systems. / Ancic, I., Vladimir, N., Luttenberger L. // Ocean. Eng. – 2018. – 166. – P 350 – 357.

7. Шурпяк В.К. Новые требования ИМО по уменьшению выбросов углекислого газа с морских судов, совершающих транспортную работу. / В.К. Шурпяк, С.А. Толмачев, М.В. Мусонов. // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2021. — № 64/65. — С. 6 – 20.

8. Tokuslu. Analyzing the energy efficiency design index (EEDI) performance of a container ship. // Int. J. Electron. Govern. – 2020. – 7 (2). – P.114 – 119.

9. Ammar, N.R. Evaluation of the environmental and economic impacts of electric propulsion systems onboard ships: case study passenger vessel. / Ammar, N.R., Seddiek, I.S.// Environ. Sci. Pollut. Control Ser. – 2021. – P. 1 – 16.

10. El Geneidy. Increasing energy efficiency in passenger ships by novel energy conservation measures. // J. Marine Eng. Tech. – 2018.– 17 (2). – P.85–98.

11. Papanikolaou, A. Holistic ship design optimization. // Comput. Aided Des. – 2010. – 42 (11). – P. 1028–1044.

12. Dedes, E.K. Assessing the potential of hybrid energy technology to reduce exhaust emissions from global shipping. / Dedes, E.K., Hudson, D.A., Turnock, S.R. // Energy Pol. – 2012. – 40. – P. 204 – 218.

13. Giap, V.-T. e. a. System simulation and exergetic evaluation of hybrid propulsion system for crude oil tanker: a hybrid of solid-oxide fuel cell and gas engine. / Energy Convers. Manag. – 2020. – 223, 113265.



14. Karatug, Ç. Design of a solar photovoltaic system for a Ro-Ro ship and estimation of performance analysis: a case study. / Karatug, Ç., Durmusoglu, Y. // Sol. Energy. – 2020. – 207. – P. 1259 – 1268.

15. 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.

16. Johnson, H. Barriers to energy efficiency in shipping. / Johnson, H., Andersson, K. // WMU J. Maritime Affair. – 2016. – 15 (1). – P. 79 – 96.

17. Rehmatulla. Barriers to energy efficiency in shipping: a triangulated approach to investigate the principal agent problem. / Rehmatulla, Smith, T. // Energy Pol. – 2015. – 84. – P. 44 – 57.

