

УДК 629.123

Дрозд Михаил Сергеевич<sup>1</sup>, старший преподаватель кафедры «ЭАСЭУ»  
e-mail: [drozd.mikhail@rambler.ru](mailto:drozd.mikhail@rambler.ru)

Кича Геннадий Петрович<sup>1</sup>, профессор, д.т.н., начальник кафедры «СДВС»  
e-mail: [kichavp@mail.ru](mailto:kichavp@mail.ru)

<sup>1</sup> Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского, г. Владивосток, Россия.

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СПОСОБОВ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ МОРСКИХ ТРАНСПОРТНЫХ СУДОВ

*Аннотация.* В данной работе, на основе анализа законодательных норм и литературных источников, авторы попытались оценить потенциальные возможности повышения энергоэффективности морских транспортных судов с целью выполнения экологических требований ИМО об ограничении выбросов CO<sub>2</sub>. Целью проведенного анализа явилось определение методов снижения выбросов CO<sub>2</sub> с судов, которые можно внедрить на стадии проектирования судна и направленных на создание энергосберегающих систем транспортировки, распределения и использования энергии. В статье рассмотрены способы уменьшения EEDI (Energy Efficiency Design Index) судов за счет достижения оптимальных параметров судовой энергетической установки и пропульсивного комплекса, описаны достоинства и недостатки различных мероприятий по снижению выбросов CO<sub>2</sub>, определены границы возможностей для уменьшения EEDI судов, а также указаны перспективные направления повышения их энергоэффективности.

*Ключевые слова:* утилизация бросовой теплоты, конструктивный коэффициент энергоэффективности судна, снижение выбросов CO<sub>2</sub>, эксергетический коэффициент полезного действия.

В 2015 году Организацией объединенных наций (ООН) было принято Парижское соглашение по климату (вступило в силу 04.11.2016 г.), основной целью которого стало ограничение роста мировой температуры на 1,5 °С к 2050 г., в связи с чем в Международной морской организации ООН (ИМО) разработали нормативы по сокращению выбросов диоксида углерода (CO<sub>2</sub>) с судов к указанному сроку как минимум вдвое по сравнению с уровнем 1990 г. Российская Федерация ратифицировала Парижское соглашение постановлением Правительства от 21.09.2019 г. № 1228.

Также Резолюциями МЕРС.203(62), МЕРС.212–215(63) введена глава 4 Приложения VI к МАРПОЛ 73/78, устанавливающая связь между энергоэффективностью судна и выбросами CO<sub>2</sub> в виде параметра – гр·(CO<sub>2</sub>)/т·милль, который характеризует процессы получения, передачи и потребления энергии с точки зрения выбросов CO<sub>2</sub> и производства транспортной работы судном, а также методика вычисления конструктивного коэффициента энергоэффективности для новых судов (EEDI – Energy Efficiency Design Index):

$$EEDI = \frac{(\prod_{j=1}^n f_j) (\sum_{i=1}^n P_{ME(i)} C_{F_{ME(i)}} SFC_{ME(i)}) + (P_{AE} C_{F_{AE}} SFC_{AE})}{f_i f_{cf} i Capacity f_w V_{ref}} + \quad (1)$$

$$+ \frac{\left( \left( \prod_{j=1}^n f_j \sum_{i=1}^{n_{PTI}} P_{PTI(i)} - \sum_{i=1}^{n_{eff}} f_{eff(i)} P_{AE_{eff(i)}} \right) C_{FAE} SFC_{AE} \right) - \left( \sum_{i=1}^{n_{eff}} f_{eff(i)} P_{eff(i)} C_{F_{ME}} SFC_{ME} \right)}{f_i f_c f_l Capacity f_w V_{ref}},$$

где  $V_{ref}$  – скорость судна при максимально допустимой мощности пропульсивной установки, узл.;  $Capacity$  – дедвейт для сухогрузов, танкеров, газовозов, универсальных грузовых судов, для контейнеровозов – 70 % от дедвейта, для пассажирских судов – валовая вместимость, т;  $P_{ME(i)} = 0,75(MCR_{ME(i)} - P_{PTO(i)})$  – мощность ГД, принимается равной 75 % от номинальной мощности ГД за вычетом 75 % номинальной выходной мощности валогенератора (ВГ), кВт;  $P_{AE(i)}$  – суммарная мощность вспомогательных двигателей (ВДГ), необходимая для обеспечения потребителей электрической энергией на ходовом режиме, исключая мощность подруливающих устройств, грузовых насосов, балластных насосов и другого оборудования, не предназначенного для обеспечения движения судну, кВт;  $P_{PTI(i)} = \sum (P_{PTI(i)} \eta_{PTI(i)}) \eta_{Gen}$  – мощность, подводимая к пропульсивному комплексу газогенератором или силовой турбиной, работающих на винт за счет энергии отработанных газов главного двигателя (ГД), кВт;  $P_{eff(i)}$  – дополнительная мощность, вырабатываемая инновационной технологией приведения судна в движение при 75 % мощности ГД, кВт;  $P_{AE_{eff(i)}}$  – снижение вспомогательной мощности за счет применения инновационной энергосберегающей технологии, кВт;  $SFC$  – удельный эффективный расход топлива на ГД (индекс  $ME$ ) и вспомогательные двигатели (индекс  $AE$ ), если значительная часть потребностей в электроэнергии на судне обеспечивается за счет ВГ, то в расчетах  $SFC_{AE}$  заменяют соответствующим значением  $SFC_{ME}$ , г/(кВт ч);  $C_F$  – безразмерный коэффициент корреляции между расходом топлива и образующимся при его сжигании  $CO_2$ , г- $CO_2$ /т-топлива;  $f_{eff(i)}$  – коэффициент доступности инновационных технологий энергоэффективности, принимается равным 1,0 для систем утилизации бросовой теплоты ГД;  $f_j$  – поправочный коэффициент для учета элементов конструкции конкретного судна: принимается равным 1,0, за исключением судов ледового класса, у которых  $f_j$  определяется по формулам в Table 1 Резолюции МЕРС.212 (63), для челночных танкеров  $f_j=0,77$ ;  $f_w$  – безразмерный коэффициент, учитывающий снижение скорости судна в зависимости от метеоусловий, принимается равным 1,0 либо определяется путем проведения моделирования характеристик конкретного судна на типичные морские условия;  $f_i$  – коэффициент, учитывающий необходимость ограничения мощности судна: принимается равным 1,0, за исключением судов ледового класса, у которых  $f_i$  определяется по формулам в Table 2 Резолюции МЕРС.212 (63);  $f_c$  – коэффициент, учитывающий полноту валового объема грузовых помещений: принимается равным 1,0, если необходимость в факторе не установлена. Для химовозов  $f_c = R^{-0,7} - 0,014$  при  $R < 0,98$ , либо  $f_c = 1$  при  $R \geq 0,98$ , для газовозов  $f_c = R - 0,56$ , при этом  $R = Capacity/V_c$  – коэффициент вместимости, где  $V_c$  – объем грузовых танков, м<sup>3</sup>;  $f_l$  – коэффициент, учитывающий потерю дедвейта у судов, перевозящих генеральный груз и оборудованных кранами и другим грузовым снаряжением.

Рассчитанные показатели достигнутого EEDI судов, совместно с подтвержденными данными по потребленному топливу, должны предоставляться в контролирующую организацию (администрацию), которая верифицирует полученную информацию и на ее основе выдает свидетельство об энергоэффективности судна.

Согласно физическому смыслу величины EEDI следует, что он отражает расход топлива судном ( $SFC$ ), отнесенный к выбросам  $CO_2$  ( $C_F$ ), работу судовой энергетической установки ( $P_{AE}$ ,  $P_{ME}$ ) и судна ( $Capacity$ ,  $V_{ref}$ ) в целом.

Вместе с тем, посредством формулы (1) не представляется возможным подсчитать потери работоспособности энергетических потоков судовой энергетической установки (СЭУ), то есть дать более правильную оценку степени совершенства СЭУ и применяемых



в ней энергосберегающих технологий и систем утилизации бросовой теплоты судовых дизелей. Также в структуре EEDI не рассматриваются выбросы CO<sub>2</sub> вследствие сжигания топлива вспомогательными котлами, а, следовательно, и возможное «скрытое» снижение CO<sub>2</sub> при внедрении энергосберегающих мероприятий.

Подсчет потерь работоспособности тепловых потоков СЭУ авторы рекомендуют осуществлять посредством определения эксергетического КПД ( $\eta_{ex}$ ) СЭУ:

$$\eta_{ex} = \frac{E_{\Pi}}{E_T} = \frac{3600(P_{ME} + P_{AE}) + E_{CH} + E_{TH} + E_{ПВ}}{(BQ_H^p)_{ME(i)} + (BQ_H^p)_{AE(i)} + (BQ_H^p)_{ВКУ}}, \quad (2)$$

где  $E_T$ ,  $E_{\Pi}$  – эксергия соответственно затраченная и полезно использованная в СЭУ, кДж;  $E_{CH}$ ,  $E_{TH}$ ,  $E_{ПВ}$  – эксергия, использованная на общесудовые и технологические нужды, опреснительную установку соответственно, кДж;  $B$  – расход топлива на ГД, ВДГ и вспомогательную котельную установку (ВКУ), кг/ч;  $Q_H^p$  – низшая теплота сгорания топлива, кДж/кг.

Такой подход в оценке энергетической эффективности морских судов, позволяет учитывать не только количественные, но и качественные потоки энергии различного потенциала, а также подбирать оптимальные технологические решения, а главное – определять полезный эффект от внедрения энергосберегающих мероприятий.

Анализ различных вариантов варьирования энергетическими показателями формулы (1) показывает, что самым простым и доступным способом уменьшения EEDI судов, является снижение  $V_{ref}$ , и, как следствие, обоюдное уменьшение сомножителей  $P_{ME}$ ,  $SFC$  за счёт кубической зависимости буксировочной мощности от скорости судна ( $V_{ref}$ ). Однако такой способ существенно влияет на безопасность мореплавания из-за недостаточной мощности судовой энергетической установки (СЭУ) для преодоления действия морской стихии, а также не выгоден из-за увеличения длительности рейса.

Другим, более сложным способом уменьшения EEDI судов является снижение в знаменателе формулы (1) сомножителя *Capacity* путем увеличения грузоподъемности судна за счёт снижения массы его корпуса (например, за счёт применения высокопрочных сплавов с пределом текучести > 450-600 МПа) и уменьшения балласта. Однако указанный способ будет оправдан в сочетании с другими способами повышения энергоэффективности судов, в том числе за счёт активного манипулирования с обводами корпуса судна, окрашивание инновационными покрытиями, совместное использование статоров и стабилизаторов набегающего потока воды, в сумме снижающими сопротивление движению судна и потребление энергии пропульсивным комплексом в пределах 15-20 % [1]. Кроме того, существующие современные винты, позволяют достигнуть КПД судового движителя более 70 % в широком диапазоне нагрузки ГД [2].

Варьирование показателями сомножителей  $P_{ME/AE}$ ,  $C_F$ ,  $SFC$  в знаменателе формулы (1) показывает, что применение в СЭУ систем глубокой утилизации теплоты судовых дизелей (СГУТ) и валогенераторных механизмов [3, 4], а также оптимизация режима работы теплообменников путем частотного регулирования производительности насосов [5], будут способствовать снижению  $SFC$  и уменьшению EEDI судов от 5,5 % до 20 %.

Также переход на газообразное топливо с меньшим значением  $C_F$  позволяет уменьшать EEDI на 16,5 % [6], а применение спиртов дает снижение EEDI в 2,33 раза [7]. Однако спирты обладают меньшей теплотворной способностью, чем нефтяные виды топлива, что увеличивает их расход, а хранение запасов СПГ на судне требует объемных устройств и механизмов хранения, следовательно, приводит к увеличению *Capacity* (за исключением газозовозов). Эти два разнонаправленных процесса уменьшают EEDI судов в среднем не более чем на 7-9 %.

Среди основных доступных и распространенных инновационных технологий, позволяющих повысить энергоэффективность транспортных судов за счет получения дополнительной тепловой и электрической энергии, можно выделить использование ветрогенераторов и солнечных панелей (батарей) совместно с электрическими



аккумуляторами и механическими накопителями энергии или гребными электродвигателями.

Если оценивать вклад слагаемых  $P_{ME}$ ,  $P_{eff}$ ,  $P_{AE_{eff}}$ ,  $P_{PTI}$ ,  $P_{PTO}$ ,  $C_F$  числителя формулы (1) в снижение величины EEDI судов, то, несомненно, следует отдать приоритет слагаемым  $P_{ME}$ ,  $P_{PTI}$  и  $C_F$ , удельный вес которых достигает 60-75 %. Таким образом, к самым эффективным способам повышения энергоэффективности транспортных судов следует отнести установку в составе СЭУ экономичных многотопливных дизелей, работающих на топливе с низкими значениями  $C_F$ ; использование валогенераторных механизмов и СГУТ. Оптимизация форм корпуса судна, окрашивание его противообрастающими и самополирующимися покрытиями, использование высокоэффективных винтов и насадок, также будет снижать сопротивления движению судна и, как следствие, сокращению выбросов  $CO_2$  из-за уменьшения SFC.

Многообразие вариантов использования бросовой теплоты судовых дизелей и способов выработки тепловой, электрической и механической энергии на судне не позволяет заранее утверждать, какой из них будет лучшим в тех или иных условиях эксплуатации и плавания морского судна. Поэтому выбор наиболее целесообразного варианта энергосберегающей системы и ее параметров для конкретного судна является актуальным и относится к классу оптимизационных проектировочных задач.

Научно-техническая литература, публикации и опыт эксплуатации энергосберегающих технологий на отечественных морских судах, в основном представлены для транспортных судов, построенных в период с 1970 по 2000 годы. Существующие энергосберегающие технологии для морских судов, в том числе СГУТ, компьютерные программы, позволяющие определять величины энергетических потоков и назначать энергоэффективные режимы работы СЭУ, разработаны и внедрены компаниями из недружественных государств и недоступны для использования в Российской Федерации. Также отсутствует информация о функционировании предложенных СГУТ в условиях Арктики и Крайнего Севера, в том числе применительно к дизель-электрическим установкам, имеющих в своем составе несколько главных и вспомогательных среднеоборотных дизелей, работающих на единую энергетическую (электрическую) систему судна, либо валогенераторные и другие силовые устройства.

Проведение научного исследования, направленного на формирование базы данных существующих энергосберегающих технологий, установление влияния изменений режимной мощности судовых дизелей и параметров окружающей среды на показатели и характеристики утилизационного оборудования, позволит отечественным судостроителям оптимизировать состав и структурные схемы СЭУ и привести отечественные транспортные суда в соответствие с экологическими требованиями ИМО.

Разработка прикладных компьютерных программ, позволит сравнивать различные варианты энергосберегающих систем и определять уровень использования располагаемых энергетических ресурсов на судне в зависимости от параметров каждого теплоносителя, в том числе в режиме реального времени, а также определять величины энергетических потоков и назначать энергоэффективные режимы работы СЭУ.

Актуальность проведения исследований, направленных на выявление эксплуатационных характеристик утилизационного оборудования СЭУ, подтверждается отнесением в перечень критических технологий Российской Федерации, утвержденный Указом Президента РФ от 16.12.2015 № 623, технологии создания энергосберегающих систем транспортировки, распределения и использования энергии.

#### **Список литературы:**

1. Integrated Propulsion Systems / E. Boletis // The CIMAC Circle at the 2012 SMM. – 2012. – 34 с. – URL: [http://www.cimac.com/congress\\_events/events-1.asp](http://www.cimac.com/congress_events/events-1.asp) (дата обращения: 13.06.2023 г.).
2. Тогунац, А.Р. Модельные исследования гидродинамических характеристик многофункционального двухступенчатого лопастного движителя за корпусом судна / Л.И. Вишневский, С.В. Капранцев // Морской вестник. – 2016. – № 4(60). – С.35-38.



3. Waste Heat Recovery System (WHRS) for Reduction of Fuel Consumption, Emissions and EEDI // MAN Diesel& Turbo, 2014. – 32 p.

4. 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. – 2019. – Т.1. – № 1(432). – С.88-95.

5. Трифонов, А.В. Анализ способов повышения энергоэффективности насосов систем охлаждения судовых двигателей / А.В. Трифонов, М.Н. Покусаев. // Научные проблемы транспорта Дальнего востока и Сибири. – 2018. – №1. – С.122-126.

6. Оценка энергоэффективности двигателей внутреннего сгорания при использовании природного газа в качестве топлива: сборник докладов Международной науч.-техн. конф. «Двигатель-2017», посвященной 110-летию специальности «Поршневые двигатели» в МГТУ им. Н.Э. Баумана. – Москва: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. – 120 с.

7. Мясников Ю.Н. Альтернативные энергоносители: анализ и перспективы / Ю.Н. Мясников, А.М. Никитин // Судостроение. – 2015. – №2. – С.28-33.

## COMPARATIVE ANALYSIS OF WAYS TO INCREASE THE ENERGY EFFICIENCY OF MARINE TRANSPORT VESSELS

Mikhail S. Drozd, Gennady P. Kicha

*Abstract.* In this paper, based on the analysis of legislative norms and literary sources, the authors tried to assess the potential for improving the energy efficiency of marine transport vessels in order to comply with IMO environmental requirements to limit CO<sub>2</sub> emissions. The purpose of the analysis was to identify methods to reduce CO<sub>2</sub> emissions from ships that can be implemented at the ship design stage and aimed at creating energy-saving systems for transporting, distributing and using energy. The article discusses ways to reduce the EEDI (Energy Efficiency Design Index) of ships by achieving the optimal parameters of the ship's power plant and propulsion complex, describes the advantages and disadvantages of various measures to reduce CO<sub>2</sub> emissions, determines the limits of possibilities for reducing the EEDI of ships, and also indicates promising areas for increasing their energy efficiency.

*Keywords:* waste heat recovery, vessel energy efficiency design factor, reduction of CO<sub>2</sub> emissions, exergy efficiency factor.

