

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА СПОСОБОВ ПОВЫШЕНИЯ ЭКОЛОГО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ СУДОВ

Горбов В. М., к.т.н., заведующий кафедрой судовых и стационарных энергетических установок Национального университета кораблестроения имени адмирала Макарова, E-mail: viktor.gorbov@nuos.edu.ua, ORSID: 0000-0002-9697-8083

Митенкова В. С., к.т.н., доцент кафедры судовых и стационарных энергетических установок Национального университета кораблестроения имени адмирала Макарова, E-mail: vera.mitenkova@gmail.com, ORSID: 0000-0001-5486-8559

В статье выполнена оценка различных способов улучшения эколого-энергетической эффективности транспортных судов. Основной целью исследования являлось сравнение перспективных методов снижения выбросов диоксида углерода, которые можно внедрить на стадии концептуального проектирования, за счет влияния на характеристики судовых энергетических установок. Учитывая большое количество факторов, определяющих параметры судна, для количественной оценки энергетической эффективности необходимо использовать многовариантный технико-экономический анализ с разработкой сценариев, включающих вероятные рейсовые линии и возможность использования различных видов топлив. В статье приведены расчетные зависимости выбросов диоксида углерода от дедвейта для танкеров, балкеров и контейнеровозов, построенных после 2007 г., с наложением ограничительных кривых ИМО для различных этапов внедрения индекса энергетической эффективности. В качестве основных сценариев снижения эмиссии парниковых газов для данных групп транспортных судов рассматривалось включение валогенераторов в состав пропульсивных установок наряду с заменой нефтяных топлив в главных и вспомогательных двигателях на сжиженный природный газ и метанол. Анализ полученных расчетных результатов дал возможность оценить эффективность данных методов, используемых как в отдельности, так и в комплексе, для уменьшения выбросов диоксида углерода.

Ключевые слова: двухтопливные двигатели, индекс энергетической эффективности, судовой индекс экологической эффективности, парниковые газы, сжиженный природный газ, метанол, судовые энергетические установки.

Постановка проблемы. В последние десятилетия уделяется значительное внимание экологическому аспекту эксплуатации морского транспорта. Кроме негативного воздействия на водную среду суда вносят существенный вклад в атмосферную эмиссию, уровень которой (для большинства загрязняющих компонентов) напрямую зависит от количества и качества потребляемого топлива [1]. На сегодняшний день законодательно нормируются выбросы оксидов азота (стандарты Tier I, II, III), серы (преимущественно в зонах повышенного контроля эмиссии – ECAs) и диоксида углерода (индексы энергетической эффективности судов, которые проектируются и эксплуатируются, – EEDI, EEOI, соответственно).

Особое внимание Международная морская организация (ИМО) уделяет эмиссии парниковых газов со стороны международного судоходства. Так, согласно данным, представленным в исследованиях ИМО, вклад морского транспорта в общий уровень выбросов CO₂ (основного парникового газа) в 2012 г. составил 796 млн. т, или 2,2 % от общемирового уровня, в 2007 г. это значение составляло 885 млн. т и 2,8 %, соответственно. Прогнозируется, что в 2050 г., по сравнению с 2012, эмиссия CO₂ увеличится на 50...250 %. Столь широкий диапазон обусловлен с одной стороны устойчивым трендом роста мировой экономики и, как следствие, объема морских перевозок, а с другой – интенсивным развитием энергосберегающих и зеленых технологий [2].

Кроме CO₂ рассматриваются и другие парниковые газы, образующиеся в процессе эксплуатации судовых энергетических установок: метан, оксид диазота (N₂O), гидрофторуглероды (HFCs), перфторуглеводороды (PFCs), гексафторид серы (SF₆), а также другие загрязняющие вещества: неметановые летучие органические соединения (NMVOCs), монооксид углерода (CO) и РМ (мелкодисперсные взвешенные частицы) [2]. Обсуждается возможность регламентирования этих выбросов наряду с уже

существующими нормативами на эмиссию диоксида углерода, оксидов серы и азота. Для соблюдения экологических требований активно используются экономические факторы воздействия: штрафы за выбросы и сложные системы скидок и компенсаций при внедрении мероприятий, направленных на снижение эмиссии [3].

Выбор рациональных способов повышения эколого-энергетической эффективности, в первую очередь, за счет повышения качества и/или снижения расхода топлив, сжигаемых в котлах и двигателях судовых энергетических установок, и активного внедрения энергосберегающих технологий, является *актуальной* задачей.

Анализ последних исследований и публикаций. Основными параметрами оценки эколого-энергетической эффективности судов на стадии проектирования и эксплуатации являются EEDI и EEOI, соответственно. Это связано с тем, что выбросы диоксида углерода прямо пропорционально зависят от количества топлива (или топлив), используемого на судне, а также от его вида. На данный момент не существует эффективных технологий очистки уходящих газов от CO₂, в отличие от NO_x и SO_x, для уменьшения концентрации которых на судах устанавливают селективные каталитические нейтрализаторы и скрубберы, соответственно. Нельзя снизить эмиссию CO₂ и первичными методами, как например снижение температуры рабочего цикла двигателя (как для NO_x) или очистка топлива от данного компонента (как для серы). Поэтому в большинстве научных публикаций рассматриваются различные способы уменьшения расхода топлива на судах, как единственного действенного способа снижения выбросов парниковых газов.

Комплексное исследование влияния различных параметров судов типа Ro-Ro и RoPax на EEDI приведено в работе, выполненной судостроительной компанией Deltamarin для Европейского агентства морской безопасности (European Maritime Safety Agency – EMSA). В работе приводятся общие рекомендации для снижения выбросов диоксида углерода без численных оценок эффективности предлагаемых мероприятий [4]. В исследовании ИМО при прогнозировании роста эмиссии парниковых газов рассматриваются различные сценарии социально-экономического развития в мире до 2050 г., в ряде которых прогнозируется значительное увеличение доли сжиженного природного газа (СПГ) в общей структуре потребления морских топлив. Активное внедрение СПГ позволит замедлить рост выбросов парниковых газов при непрерывном увеличении мирового флота, по сравнению со сценариями использования нефтяных топлив [2]. Выработка энергии на судне за счет энергии ветра при благоприятных метеорологических условиях позволит сэкономить до 30% топлива согласно данным приведенным японскими учеными, а, следовательно, и снизить эмиссию CO₂ [5]. Компания MAN Diesel and Turbo предлагает решение по улучшению EEDI путем повышения эффективности пропульсивного комплекса, в т.ч. за счет увеличения диаметра гребного винта и варьирования нагрузки главного двигателя (ГД) [6]. Влияние конструктивных характеристик судов на их энергетическую эффективность вследствие изменения сопротивления корпуса рассматривается в работе [7].

Стоит отметить, что в известных публикациях, связанных с данной темой, различные способы снижения эмиссии CO₂ рассматриваются отдельно, а не в комплексе. Не уделяется достаточно внимания таким вариантам снижения атмосферной эмиссии, как использование альтернативных топлив (кроме СПГ) и топливных элементов.

Цель статьи – оценка и сравнение эффективности различных способов повышения эколого-энергетической эффективности морских транспортных судов.

Изложение основного материала. Показатели, влияющие на EEDI, можно разделить на несколько групп: характеристики энергетической установки (мощность главных и вспомогательных двигателей, тип и расход топлива); мореходные характеристики судна (дедвейт или брутто-тоннаж, скорость); ряд безразмерных коэффициентов, учитывающих конструктивные особенности судна, район плавания, наличие инновационных технологий по снижению потерь энергии.

Действие формулы для определения EEDI, разработанной ИМО, распространяется

на такие типы судов: пассажирские, сухогрузы, газозовы, наливные, контейнеровозы, суда типа Ro-Ro, универсальные для перевозки генеральных грузов. Значение индекса энергетической эффективности определяется следующим образом [8]:

$$EEDI = \frac{\left(\prod_{j=1}^M f_j \right) \left(\sum_{i=1}^{nME} P_{ME(i)} \cdot C_{FME(i)} \cdot SFC_{ME(i)} \right) + (P_{AE} \cdot C_{FAE} \cdot SFC_{AE}^*)}{f_i \cdot f_c \cdot f_l \cdot Capacity \cdot V_{ref} \cdot f_w} +$$

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

* если значительная часть потребностей в электроэнергии на судне обеспечивается за счет валогенераторов, то в расчетах SFC_{AE} заменяют соответствующим значением SFC_{ME} .

SFC – удельный эффективный расход топлива на главные (индекс ME) и вспомогательные двигатели (индекс AE), г/(кВт·ч).

$Capacity$ определяется следующим образом: для сухогрузов, танкеров, газозовов, грузовых судов типа Ro-Ro, универсальных судов для перевозки генеральных грузов принимается равной дедвейту, т; для пассажирских судов, в т.ч. и типа Ro-Ro принимается равной валовому регистровому тоннажу, т; для контейнеровозов – 70 % от дедвейта, т.

Другие элементы формулы: C_F – безразмерный коэффициент корреляции между расходом топлива и образующимся при его сжигании в дизельном двигателе CO_2 , величина которого напрямую зависит от содержания углерода; V_{ref} , узлов – скорость судна на глубокой воде при максимально допустимой мощности двигателей; $P_{ME(i)}$, кВт, принимается равной 75 % от номинальной установленной мощности каждого главного двигателя (i -ого) после вычета мощности, подводимой к валогенераторам ($P_{PTO(i)}$); $P_{PTO(i)}$, кВт, принимается равной 75 % от мощности каждого валогенератора (i -ого), деленной на его КПД; $P_{PTI(i)}$, кВт – 75 % от мощности каждого электрогенератора, деленной на среднее значение КПД электрогенераторов; $P_{eff(i)}$, кВт, составляет 75 % от снижения мощности главных двигателей в результате использования инновационных технологий для снижения механических потерь; $P_{AEff(i)}$, кВт, составляет 75 % от снижения мощности вспомогательных двигателей в результате использования инновационных технологий для уменьшения электрических потерь; P_{AE} , кВт – суммарная мощность вспомогательных двигателей, необходимая для обеспечения всех потребителей электрической энергией на ходовом режиме; f_j – поправочный коэффициент, учитывающие специфические конструктивные элементы судна; f_w – безразмерный коэффициент, учитывающий снижение скорости судна при изменении метеоусловий; $f_{eff(i)}$ – коэффициент, учитывающий использование на судне инновационных технологий повышения энергоэффективности; f_i – коэффициент, учитывающий техническую/законодательную необходимость ограничения мощности судна; f_c – коэффициент, учитывающий полноту валового объема грузовых помещений; f_l – коэффициент, используемый для универсальных грузовых судов, оборудованных кранами, для компенсации потерь дедвейта [8].

Стоит отметить следующий немаловажный аспект, заключающийся в том, что требования к индексу энергетической эффективности регулярно уточняются и пересматриваются. Так, например, если в 2009 г. действие EEDI распространялось только на перечисленные выше типы судов исключительно с дизель-механической энергетической установкой, то в требованиях 2014 г. появилось дополнение о расширении действия индекса на LNG-газовозы и круизные пассажирские суда с другими типами пропульсивных установок. В формулу были введены коэффициенты f_c и f_l , а также был расширен список топлив, для которых приводятся данные по C_F , были введены метанол и этанол в дополнении к представленным ранее нефтяным топливам, сжиженным

природному и нефтяному газам [8, 9]. Это свидетельствует о том, что спирты рассматриваются в качестве серьезной альтернативы нефтяным топливам из-за более низкого значения коэффициента C_F (табл. 1) [8].

Таблица 1 – Расчетные значения эмиссии углерода при сжигании различных топлив для определения индекса энергетической эффективности

Топливо	Содержание углерода, % по массе	C_F , ($m CO_2$)/(m топлива)
Дизельное топливо	0,8744	3,206
Газойль (легкое дистиллятное топливо)	0,8594	3,151
Тяжёлое топливо	0,8493	3,114
Сжиженный нефтяной газ (пропан)	0,8182	3,000
Сжиженный нефтяной газ (бутан)	0,8264	3,030
Сжиженный природный газ	0,7500	2,750
Метанол	0,3750	1,375
Этанол	0,5217	1,913

Для каждого типа судов, на которые распространяется действие индекса энергетической эффективности, введены ограничительные кривые на выбросы диоксида углерода, рассчитываемые по формуле: $EEDI = a \cdot b^c$, где b – это дедвейт (сухогрузы, танкеры, газовозы, грузовые суда типа Ro-Ro, универсальные суда для перевозки генеральных грузов) или валовой регистровый тоннаж (пассажирские суда, в т.ч. и типа Ro-Ro), a и c – коэффициенты, значения которых приведены в табл. 2 [10].

Таблица 2 – Коэффициенты для расчета граничных значений EEDI

Тип судна	Коэффициент a	Коэффициент c
Балкеры	961,79	0,477
Газовозы	11200	0,456
Танкеры	1218,8	0,488
Контейнеровозы	174,22	0,201
Универсальные грузовые суда	107,48	0,216
Рефрижераторы	227,01	0,244
Грузопассажирские суда	1218,8	0,488

Планируется, что нормативные требования к эмиссии CO_2 будут вводиться поэтапно в период с 2013 по 2025 г., ужесточаясь на каждом новом этапе (табл. 3) [10].

Таблица 3 – Снижающие факторы для ограничительных кривых EEDI

Тип судна	Дедвейт, m	Этап 0 1/01/2013 – 31/12/2014	Этап 1 1/01/2015 – 31/12/2019	Этап 2 1/01/2020 – 31/12/2024	Этап 3 с 1/01/2025
Балкеры	> 20000	0 %	10 %	20 %	30 %
	10000–20000	–	0–10%	0–20%	0–30%
Газовозы	> 10000	0 %	10 %	20 %	30 %
	2000–10000	–	0–10%	0–20%	0–30%
Танкеры и грузопассажирские суда	> 20000	0 %	10 %	20 %	30 %
	4000–20000	–	0–10%	0–20%	0–30%
Контейнеровозы	> 15000	0 %	10 %	20 %	30 %
	10000–15000	–	0–10%	0–20%	0–30%
Универсальные грузовые суда	> 15000	0 %	10 %	15 %	30 %
	3000–15000	–	0–10%	0–15%	0–30%
Рефрижераторы	> 5000	0 %	10 %	15 %	30 %
	3000–5000	–	0–10%	0–15%	0–30%

На рис. 1–3 приведены расчетные значения EEDI для трех видов транспортных судов, на которые распространяется действие данного коэффициента с ограничительными

кривими (табл. 2) для етапов 0–3 (табл. 3), характеристики судов для были взяты из [11–12]. Для расчетов и дальнейшего анализа были выбраны именно данные типы судов, поскольку в соответствии с исследованиями ИМО в 2012 г. на их долю пришлось больше всего выбросов CO₂: 124 млн. т – для танкеров, 166 млн. т. – для балкеров и 205 млн. т – для контейнеровозов [2]. Как видно из рис. 1–3, значения EEDI для большинства танкеров и балкеров не выходят за пределы граничных значений на Этапе 0, для контейнеровозов требованиям соответствует менее половины рассматриваемых судов. Только одно судно из представленных, балкер «Forest Venus» на рис. 2, по уровню эмиссии CO₂ соответствует самым жестким требованиям Этапа 3. Низкое значение EEDI обусловлено наличием на судне валогенератора (ВГ) мощностью 2160 кВт, при этом суммарная мощность дизель-генераторов (ДГ) составляет 2400 кВт, т.е. на ходовом режиме при работе главного двигателя при полной нагрузке (номинальная мощность 9370 кВт) потребности судна в электроэнергии могут быть полностью обеспечены за счет ВГ без сжигания дополнительного количества топлив в ДГ [12].

Исходя из представленных на рис. 1–3 данных интерес представляет анализ и сравнение различных вариантов снижения эмиссии диоксида углерода за счет варьирования энергетических показателей в формуле для расчета EEDI (типа топлива, наличия ВГ), а также скорости.

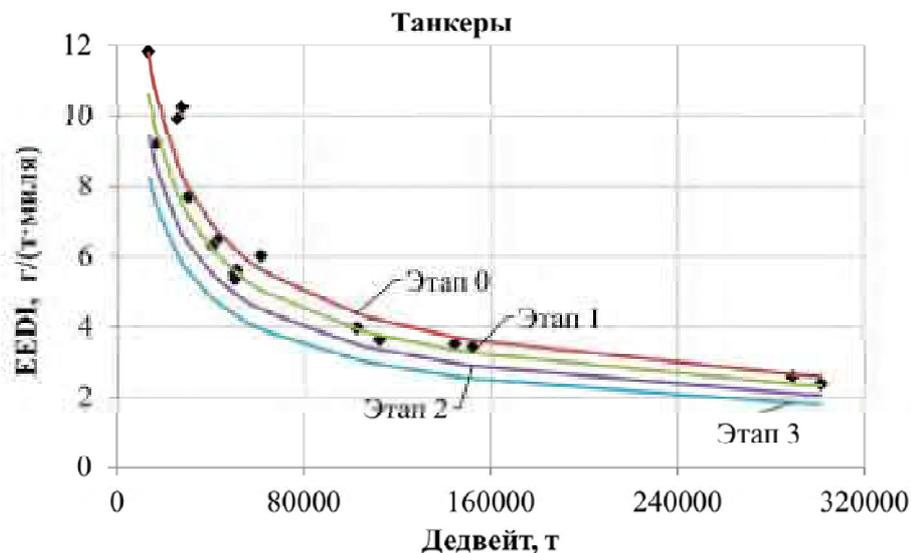


Рисунок 1 – Зависимость EEDI от дедвейта для танкеров с ограничительными кривыми

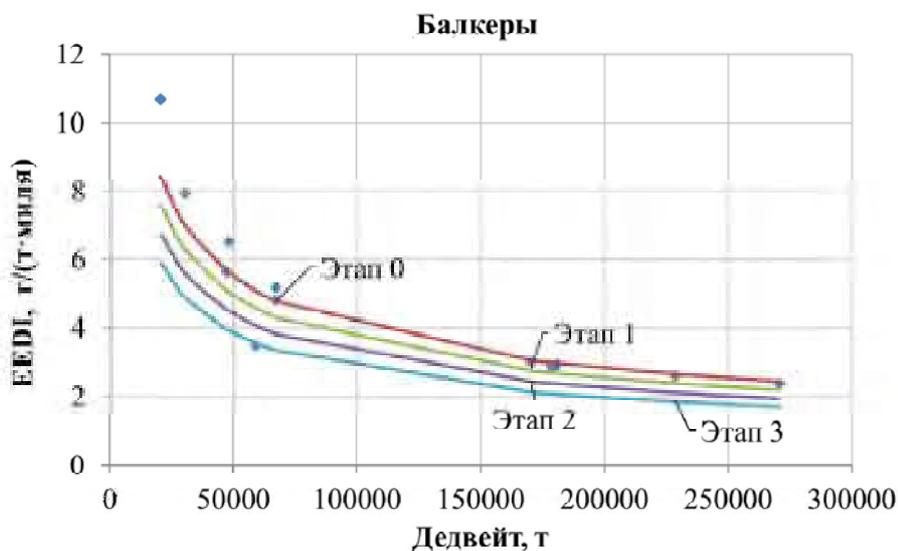


Рисунок 2 – Зависимость EEDI от дедвейта для балкеров с ограничительными кривыми

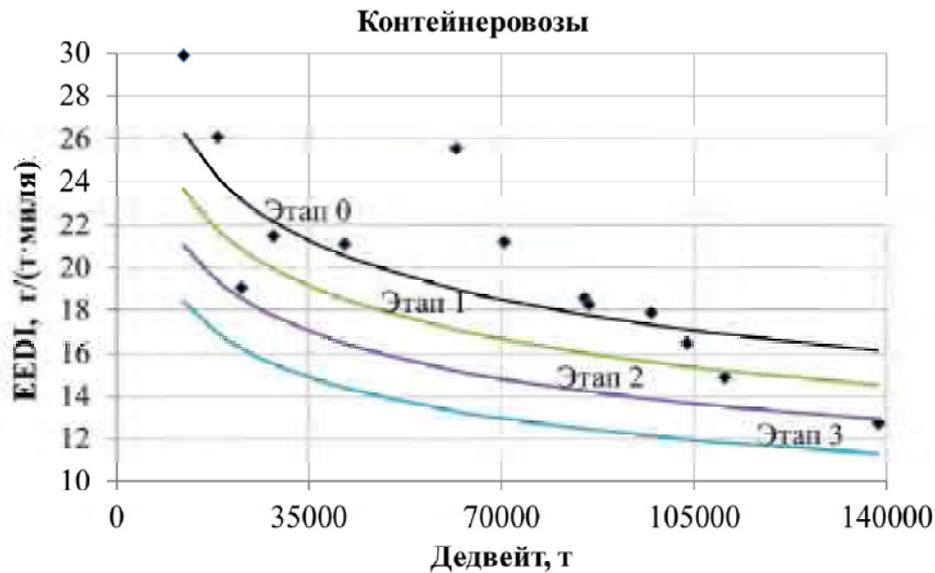


Рисунок 3 – Зависимость EEDI от дедвейта для контейнеровозов с ограничительными кривыми

На рис. 4–7 представлены данные по значениям EEDI при различных сценариях снижения эмиссии для контейнеровоза «Maersk Weymouth» и балкера «Boasteel Education», характеристики базовых вариантов судовой энергетической установки для данных судов приведены в [12]. В качестве возможных сценариев снижения эмиссии рассматривалась установка ВГ мощностью, равной одному (для контейнеровоза) или двум ДГ (для балкера), повышение скорости на 1 узел по сравнению с номинальной, перевод с тяжелого топлива на СПГ (LNG) главных и вспомогательных двигателей, перевод ГД на метанол. При изменении типа топлива в качестве ГД на LNG принимались двухтопливные двухтактные двигатели MAN серии ME-GI, в качестве ДГ – двухтопливные четырехтактные двигатели Wartsila, которые находятся в серийном производстве. В 2013 г. компания MAN анонсировала создание многотопливных двигателей MAN B&W ME-LGI, которые могут работать на метаноле, этаноле и нефтяном газе [13]. В ряде сценариев в качестве главных двигателей рассматривались MAN B&W ME-LGI, работающие на метаноле.

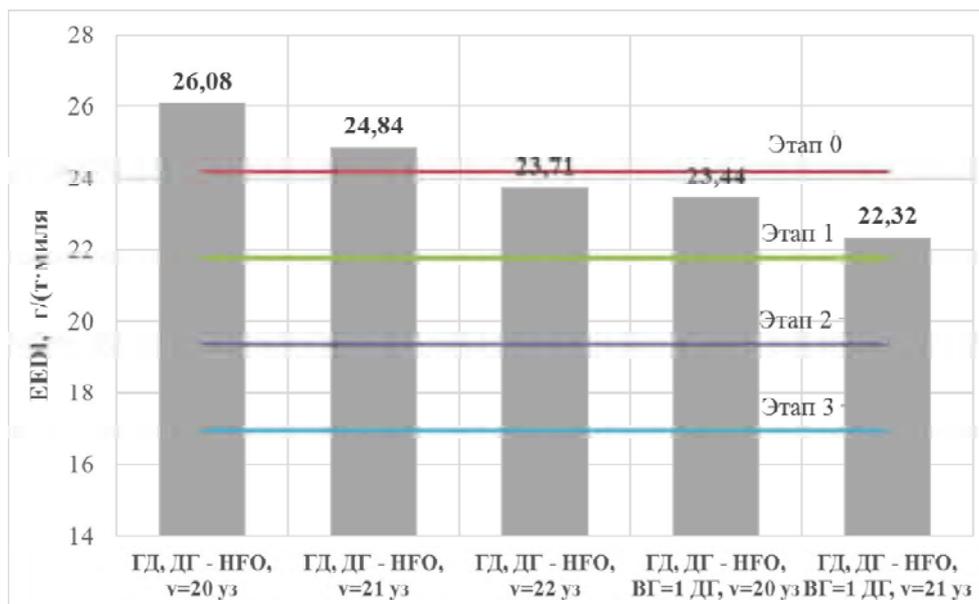


Рисунок 4 – Изменение EEDI контейнеровоза «Maersk Weymouth» при варьировании скоростью и установкой валогенератора

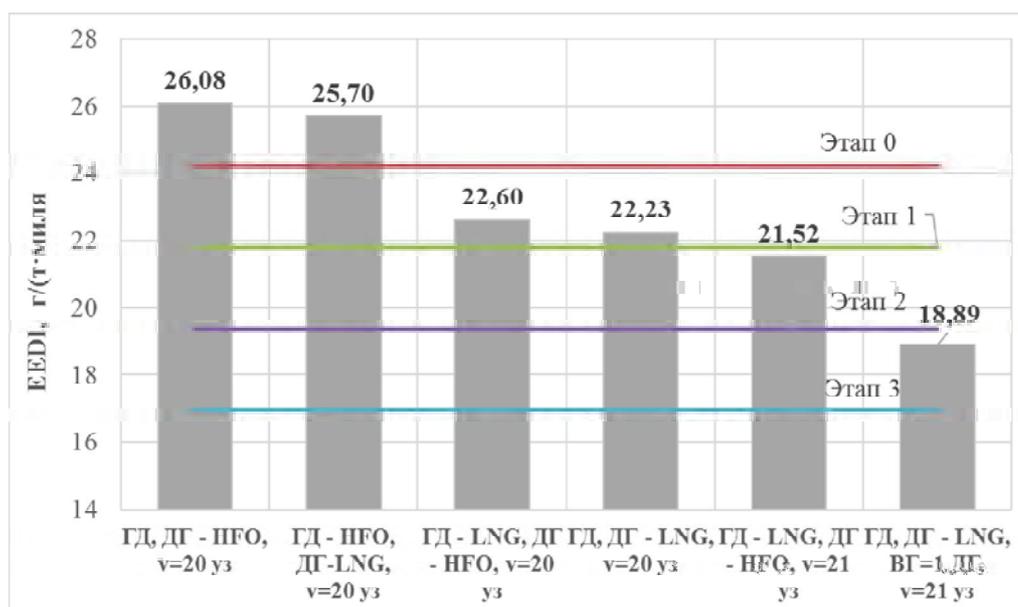


Рисунок 5 – Изменение EEDI контейнеровоза «Maersk Weymouth» при варьировании скоростью, установкой ВГ и заменой HFO на LNG

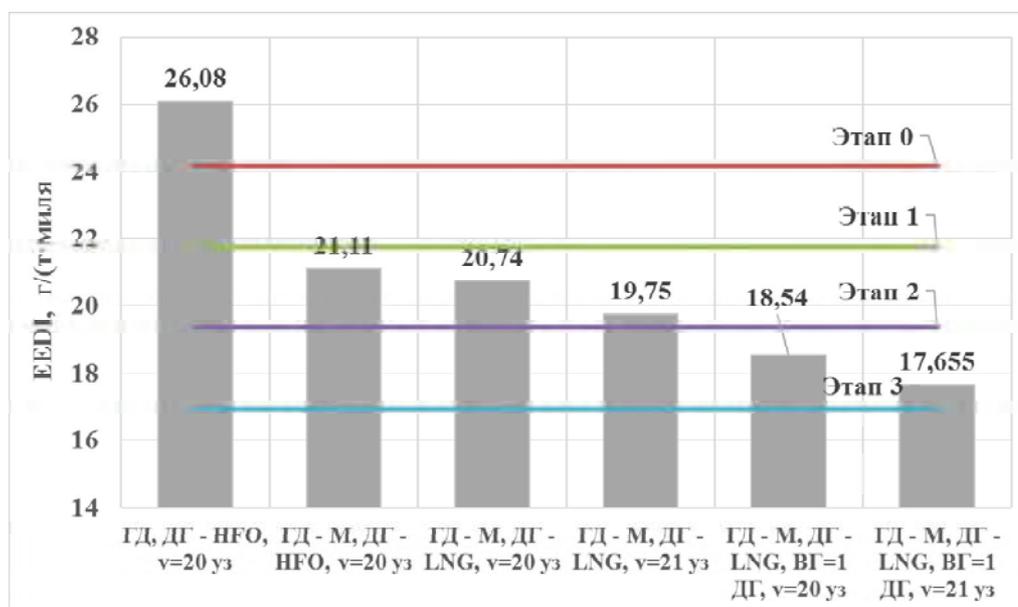


Рисунок 6 – Изменение EEDI контейнеровоза «Maersk Weymouth» при варьировании скоростью, установкой ВГ и заменой HFO на LNG и метанол (М)

Как видно из рис. 4–7 замена нефтяных топлив на альтернативные (LNG или метанол) является эффективным способом снижения диоксида углерода, обеспечивая их соответствие требованиям Этапа 1 (табл. 3). Для достижения требований Этапа 2 дополнительно надо увеличивать скорость и вводить в состав СЭУ валогенераторы (подобные решения требуют отдельной оценки о возможности использования без изменения базовых параметров судна: мощности ГД и дедвейта). Следует отметить, что перечисленных выше мероприятий недостаточно для соответствия самым жестким требованиям Этапа 3. Очевидно, что на судах надо будет предусматривать дополнительные решения для снижения потерь электрической или механической энергии, а также рассматривать варианты получения части энергии без сжигания топлива (используя топливные элементы, солнечные панели, энергию ветра и т.д.).

Стоит отметить, что в структуре EEDI не рассматриваются выбросы вследствие сжигания топлива в котлах, а, следовательно, и возможное снижение эмиссии при внедрении утилизационных технологий. При дальнейшем совершенствовании структуры

коэффициента возможно данные параметры будут учитываться, что также скажется на расчётной величине эмиссии.

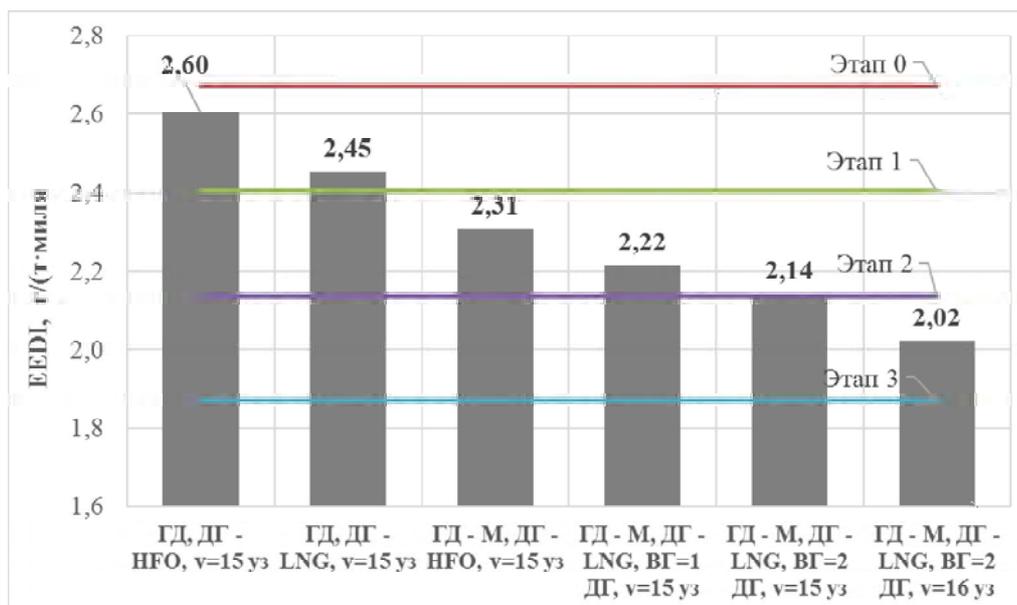


Рисунок 7 – Изменение EEDI балкера «Boasteel Education» при варьировании скоростью, установкой ВГ и заменой HFO на LNG и метанол (М)

Выводы. Проведенный анализ изменений элементов индекса энергетической эффективности судов на стадии проектирования позволил выделить возможные пути снижения выбросов диоксида углерода, исходя из составляющих EEDI, а именно, применение альтернативных топлив: сжиженного природного газа и метанола. Расчет EEDI для трех групп транспортных судов, построенных после 2007 г., показал, что для большинства танкеров и балкеров значения выбросов CO₂ не выходят за нормативные пределы значений на Этапе 0, для контейнеровозов требованиям соответствует менее половины рассматриваемых судов. Расчеты показали, что замена морских нефтяных топлив на сжиженный природный газ или метанол в главных и вспомогательных двигателях судовых энергетических установок позволит судам соответствовать требованиям Этапа 1 по ужесточению EEDI. Для большего снижения выбросов диоксида углерода наряду со сменой топлив следует увеличивать скорость и предусматривать в составе судовых энергетических установок валогенераторы.

Дальнейшие исследования будут связаны с оценкой эффективности других мероприятий, направленных на снижение выбросов диоксида углерода, в частности, использование инновационных технологий по снижению энергетических потерь в пропульсивном комплексе и составе судовой электростанции.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горбов, В. М. Суднова енергетика та Світовий океан: підручник / В. М. Горбов, І. О. Ратушняк, С. І. Трушляков, О. К. Чередниченко. – Миколаїв : НУК, 2007. – 596 с.
2. Third IMO GHG Study 2014. Executive Summary and Final Report [Electronic resource]. – London : IMO, 2015. – Mode of access: <http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Documents/Third%20Greenhouse%20Gas%20Study/GHG3%20Executive%20Summary%20and%20Report.pdf>.
3. Marine NO_x Regulation, Taxes and Incentive Schemes [Electronic resource]. – London: International Association for Catalytic Control of Ship Emissions to Air (IACCSEA), 2015. – Mode of access: http://www.iaccsea.com/fileadmin/user_upload/pdf/local_marine_nox_regulation_taxes_and_incentive_schemes.pdf.
4. Study on Tests and Trials of the Energy Efficiency Design Index as Developed by

the IMO [Electronic resource]. – Raisio (Finland): Deltamarin LTD, 2011. – Mode of access : <http://www.emsa.europa.eu/main/air-pollution/download/1517/1310/23.html>.

5. Sail gets a second wind [Text] // *The Naval Architect*. – 2016. – June. – P. 22–28.
6. MAN takes fuel flexibility to another level [Text] // *The Naval Architect*. – 2013. – March. – P. 26–30.
7. IMO set to decide on ro-ro EEDI fix [Text] // *The Naval Architect*. – 2013. – May. – P. 38–42.
8. Guidelines on the Method of Calculation of the Attained Energy Efficiency Design Index (EEDI) for New Ships [Electronic resource]. – IMO, MEPC.245(66), Annex 5, 2014. – Mode of access: [http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Documents/245\(66\).pdf](http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Documents/245(66).pdf).
9. Горбов, В. М. Оценка выбросов диоксида углерода судовыми дизельными установками [Текст] / В. М. Горбов, В. С. Митенкова // *Двигатели внутреннего сгорания*. – 2012. – № 2. – С. 92–95.
10. Implementing Energy Efficiency Design Index [Electronic resource]. – Mumbai: Indian Register of Shipping, 2015. – Mode of access: http://www.irclass.org/files/marine_publications/EEDI_2015.pdf.
11. Significant Ships of 2008 [Text] / [compiler Lingwood J.; editor Knaggs T.]. – London: RINA, 2009. – 118 p.
12. Significant Ships of 2009 [Text] / [editors Savvides N., Fisk S.]. – London: RINA, 2010. – 119 p.
13. ME-LGI Applications [Electronic resource]. – Mode of access: <http://marine.man.eu/two-stroke/2-stroke-engines/me-lgi-engines>.

REFERENCES

1. Gorbov V. M. Ratushnyak I. O., Trushlyakov S. I., Cherednychenko O. K. (2007). *Sudnova enerhetyka ta Svitovyi okean*, Mykolaiv : NUK.
2. *Third IMO GHG Study 2014. Executive Summary and Final Report*. (2015). London : IMO. <http://www.imo.org>. Retrieved from <http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Documents/Third%20Greenhouse%20Gas%20Study/GHG3%20Executive%20Summary%20and%20Report.pdf>.
3. *Marine NO_x Regulation, Taxes and Incentive Schemes*. (2015). London : International Association for Catalytic Control of Ship Emissions to Air (IACCSEA). <http://www.iaccsea.com>. Retrieved from http://www.iaccsea.com/fileadmin/user_upload/pdf/local_marine_nox_regulation_taxes_and_incentive_schemes.pdf.
4. *Study on Tests and Trials of the Energy Efficiency Design Index as Developed by the IMO*. (2011). Raisio (Finland) : Deltamarin LTD. <http://www.emsa.europa.eu/> Retrieved from <http://www.emsa.europa.eu/main/air-pollution/download/1517/1310/23.html>.
5. Sail gets a second wind. (2016). *The Naval Architect*, June, 22-28.
6. MAN takes fuel flexibility to another level. (2013). *The Naval Architect*, March, 26-30.
7. IMO set to decide on ro-ro EEDI fix. (2013). *The Naval Architect*, May, 38-42.
8. *Guidelines on the Method of Calculation of the Attained Energy Efficiency Design Index (EEDI) for New Ships*. (2014). IMO, MEPC.245(66), Annex 5. <http://www.imo.org>. Retrieved from [http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Documents/245\(66\).pdf](http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Documents/245(66).pdf).
9. Gorbov V. M., Mitienkova V. S. (2012) Otsenka vybrosov dyoksyda uhleroda sudovymy dyzelnymy ustanovkamy. *Dvyhately vnutrenneho shoranyia*, 2, 92-95.
10. *Implementing Energy Efficiency Design Index*. (2015). Mumbai : Indian Register of Shipping. <http://www.irclass.org>. Retrieved from

http://www.irclass.org/files/marine_publications/EEDI_2015.pdf.

11. Lingwood J., Knaggs T. (Ed.). (2008). *Significant Ships of 2008*. London: RINA.

12. Savvides N., Fisk S. (Ed.). (2009). *Significant Ships of 2009*. London: RINA.

13. ME-LGI Applications. <http://marine.man.eu>. Retrieved from <http://marine.man.eu/two-stroke/2-stroke-engines/me-lgi-engines>.

Горбов В. М., Мітенкова В. С. ПОРІВНЯЛЬНА ОЦІНКА СПОСОБІВ ПІДВИЩЕННЯ ЕКОЛОГО-ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ СУДЕН

У статті виконано оцінку різних способів покращення еколого-енергетичної ефективності транспортних суден. Головною метою дослідження було порівняння перспективних методів зниження викидів діоксиду вуглецю, які можна впровадити на стадії концептуального проектування, за рахунок впливу на характеристики судових енергетичних установок. З огляду на велику кількість факторів, що визначають параметри судна, для кількісної оцінки енергетичної ефективності необхідно використовувати багатоваріантний техніко-економічний аналіз з розробкою сценаріїв, що включають ймовірні рейсові лінії й можливість використання різних видів палив. У статті наведено розрахункові залежності викидів діоксиду вуглецю від дедвейту для танкерів, балкерів і контейнеровозів, побудованих після 2007 р., з накладенням обмежувальних кривих ІМО для різних етапів впровадження індексу енергетичної ефективності. В якості основних сценаріїв зниження емісії парникових газів для даних груп транспортних суден розглядалося включення валогенераторів до складу пропульсивних установок поряд із заміною нафтових палив в головних і допоміжних двигунах на зріджений природний газ і метанол. Аналіз отриманих розрахункових результатів дав можливість оцінити ефективність даних методів, що використовуються як окремо, так і в комплексі, для зменшення викидів діоксиду вуглецю.

Ключові слова: *двопаливні двигуни, індекс енергетичної ефективності суден, судовий індекс екологічної ефективності, парникові гази, зріджений природний газ, метанол, судові енергетичні установки.*

Gorbov V. M., Mitienkova V. S. COMPARATIVE EVALUATION OF THE METHODS FOR IMPROVEMENT OF SHIPS ENVIRONMENTAL-AND-ENERGY EFFICIENCY

Estimation of different ways to improve the environmental and energy efficiency of transport ships has made in the article. The main purpose of study was to compare perspective methods decreasing carbon dioxide emissions that could be implemented at the stage of conceptual design, through the influence on the characteristics of ship power plants. In view of the large number of factors determining the parameters vessel, to quantify energy efficiency need to use multivariate technical and economic analysis with the development of scenarios including probable Coach Lines and the use different kinds of fuels. The article presents calculated deadweight-dependence of carbon dioxide emissions for tankers, bulk carriers and container ships built after 2007, with imposing of the restrictive IMO curves for different stages of the implementation energy efficiency index. The main scenarios of reducing greenhouse gas emissions for these transport vehicles groups have been considered inclusion of shaft generators into the propulsive units along with the replacement of fuel oil in the main and auxiliary engines to liquefied natural gas and methanol. Analysis of the calculation results has made it possible to assess the effectiveness of these methods used both individually and in combination, to reduce carbon dioxide emissions.

Keywords: *dual-fuel engines, energy efficiency index, environmental ship index, greenhouse gases, liquefied natural gas, methanol, ship power plants.*

© Горбов В. М., Мітенкова В. С.

Статтю прийнято
до редакції 29.10.16