

DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-2-390-401

INVESTIGATION OF THE IMPACT OF MARINE TRANSITION PARAMETERS ON THE OPERATIONAL COEFFICIENT OF ENERGY EFFICIENCY OF THE SHIP

V. Ye. Leonov¹, V. V. Timoshenko^{1, 2}

¹ — Kherson State Maritime Academy, Kherson, Ukraine

² — Shipping Company “NIESKO”, Nikolaev, Ukraine

Outlines the aspects of determining the economic efficiency and environmental safety of a real voyage of the vessel “SORMOVSKIY-45” on the route Rostov-on-Don (Russia) — Durres (Albania), carried out in February 2017. The regulatory basis of this article is the Resolutions of the International Maritime Organization and (IMO) its committees in terms of saving the consumption of marine fuel and, accordingly, reducing the emission of components of “greenhouse” gases - carbon dioxide, soot, hydrocarbons, nitrogen oxides. This is the implementation of such IMO documents as the Ship Energy Efficiency Management Plan (SEEMP), the Constructed Energy Efficiency Rate of the Vessel (EEDI), the Operational Efficiency of the Vessel (EEOI). Unlike the previous normative documents, which have the main goal of reducing the transition time, the above-mentioned IMO documents have the following main objective: to reduce the consumption of marine fuel and to reduce the emissions of the components of “greenhouse” gases from the waste gases of ship power plants. In the process of a real sea crossing, the influence of the ship’s speed, the mass of the cargo being transported, the distance of the sea crossing, the capacity of the ship’s power plant (SPP), the number of turns on the crankshaft of the SPP at the EEOI. On the basis of the computational studies performed, work was carried out to minimize the EEOI. The minimum values of EEOI in real flight conditions can be achieved under the following conditions-the mass of the cargo to be transported must be within the range of at least 3000 – 3100 Mt, ship speed within 6.5 – 9.0 Kn. The transition distance does not affect the magnitude of the EEOI. The above results may be affected by hydrometeorological conditions.

Keywords: consumption, ship fuel, minimization, Constructive, Operational, «greenhouse» effect, Management Plan, Energy efficiency.

For citation:

Leonov, Valery Ye., and Vladislav V. Timoshenko. “Investigation of the impact of marine transition parameters on the operational coefficient of energy efficiency of the ship.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 10.2 (2018): 390–401. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-2-390-401.

УДК 574+504.054:656.61

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ МОРСКОГО ПЕРЕХОДА НА ОПЕРАЦИОННЫЙ КОЭФФИЦИЕНТ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ СУДНА

В. Е. Леонов¹, В. В. Тимошенко^{1, 2}

¹ — Херсонская Государственная морская академия, Херсон, Украина

² — Судходная компания «NIESKO», Николаев, Украина

Изложены аспекты определения экономической эффективности и экологической безопасности реального рейса судна «SORMOVSKIY-45» на маршруте Ростов-на-Дону (РФ) — Дуррес (Албания), выполненного в феврале 2017 г. За нормативную базу данной статьи приняты Резолюции Международной морской организации (ММО) и ее комитетов в части экономии расхода судового топлива и, соответственно, снижения эмиссии компонентов «парниковых» газов: диоксида углерода, сажи, углеводородов, оксидов азота. Речь идет об имплементации таких документов ММО, как План управления энергетической эффективности судна (ПУЭЭС), Конструктивный (достигнутый) коэффициент энергетической эффективности судна (К(Д)КЭЭС), Операционный коэффициент энергетической эффективности судна (ОКЭЭС). В отличие от предыдущих нормативных документов, ставящих основной целью сокращение времени перехода, вышеприведенные документы ММО имеют следующую основную цель: сокращение расхода судового

топлива и снижение эмиссии с отработанными газами судовых энергетических установок компонентов «парниковых» газов. В процессе реального морского перехода исследовано влияние скорости судна, массы перевозимого груза, дистанции морского перехода, используемой мощности судовой энергетической установки (СЭУ), количества оборотов на коленчатом валу СЭУ на ОКЭЭС. На основании выполненных расчетных исследований проведены работы по минимизации ОКЭЭС. Минимальные значения ОКЭЭС в условиях реального рейса могут быть достигнуты при следующих условиях: масса перевозимого груза должна быть в пределах не менее 3000 – 3100 т, скорость судна в пределах 6,5 – 9,0 уз. Дистанция перехода не влияет на величину ОКЭЭС. На приведенные выше результаты могут оказать влияние гидрометеорологические условия.

Ключевые слова: расход, судовое топливо, минимизация, конструктивный и операционный коэффициент, «парниковый» эффект, план управления, энергетическая эффективность.

Для цитирования:

Леонов В. Е. Исследование влияния параметров морского перехода на операционный коэффициент энергетической эффективности судна / В. Е. Леонов, В. В. Тимошенко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 2. — С. 390–401. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-2-390-401.

Введение (Introduction)

1 января 2013 г., в соответствии с Резолюцией Комитета по защите морской среды ИМО МЕРС.213(63), вступило в силу дополнение к МАРПОЛ 73/78 [1]. 22-е Правило этой главы предписывает в обязательном порядке иметь на борту каждого судна валовой вместимостью более 400 План управления энергоэффективностью судна (Ship Energy Efficiency Management Plan — SEEMP, или ПУЭЭС) [1] – [3].

Цель ПУЭЭС — разработать рекомендации для повышения энергетической эффективности морских грузоперевозок при безусловном выполнении требований по защите экипажа судна и окружающей среды.

Эффективность ПУЭЭС зависит от использования судном накопленного научного и практического опыта в части экономии топлива, снижения времени погрузочно-разгрузочных работ, уменьшения эмиссии вредных токсичных компонентов с отработанными газами судовых энергетических установок (ОГ СЭУ).

Требования к SEEMP регламентированы Правилем 22 Приложения VI МАРПОЛ; Резолюцией МЕРС.203(62); Резолюцией МЕРС.212(63); Резолюцией МЕРС.213(63); Резолюцией МЕРС.214(63); Резолюцией МЕРС.215(63); Резолюцией МЕРС.278(70), действие которых началось с 01 марта 2018 г.

Комитет по защите морской среды Международной морской организации (ММО) Резолюцией МЕРС.282(70) от 28.10.2016 принял Руководство по разработке Плана управления энергетической эффективности судна. Основным отличием нового документа является учет требований Резолюции МЕРС.278(70) от 28.10.2016 по обеспечению ежегодной отчетности судов валовой вместимостью 5000 и более о расходе топлива, пройденном расстоянии и времени в пути. В Резолюции МЕРС.282(70) отмечено, что заблаговременное изменение данного руководства связано с необходимостью обеспечения «единообразного и эффективного осуществления правил, а также предоставления отрасли достаточного времени для подготовки».

ПУЭЭС имеет две части: ч. 1. «План управления, направленный на повышение энергоэффективности»; ч. 2. «План сбора данных по расходу топлива».

Для сбора данных о годовом расходе судового топлива рекомендованы следующие методы:

1. Метод на основе накладных на поставку бункерного топлива.
2. Метод на основе использования расходомеров.
3. Метод на основе мониторинга количества бункерного судового топлива в танках, имеющих на борту.

Пройденное расстояние должно регистрироваться в журнале в соответствии с Правилем V/28.1 Конвенции СОЛАС-74 [4]. При этом учитывается только расстояние, пройденное при дви-

жении судном самостоятельно. Время в пути должно представлять собой суммарную продолжительность движения судна своим ходом. План сбора данных должен содержать меры контроля качества данных, которые должны быть интегрированы в действующую на судне систему управления безопасностью [5]. В План включают процедуры идентификации пробелов в данных и их устранения в случае отсутствия данных мониторинга, вследствие неисправности расходомера. Собранные данные должны предоставляться в стандартизированном формате:

- в соответствии с системой опознавательных номеров судов ММО, принятой Резолюцией А.1078(28);
- в соответствии с правилом 2 Приложения VI к Конвенции МАРПОЛ 73/78;
- валовая вместимость должна рассчитываться в соответствии с Международной конвенцией по обмеру судов 1969 года;
- NT должна рассчитываться в соответствии с Международной конвенцией по обмеру судов 1969 года;
- DWT означает разницу в тоннах между водоизмещением судна в воде с относительной плотностью 1025 кг/м³ при осадке по летнюю грузовую марку и при весе судна порожнем;
- ККЭЭ должен рассчитываться в соответствии с Руководством 2014 г. по методу вычисления фактического ККЭЭ для новых судов с поправками, принятыми Резолюцией МЕРС.245(66);
- ледовый класс должен быть обозначен в соответствии с определением, приведенным в Международном кодексе для судов, эксплуатирующихся в полярных водах, принятом Резолюциями МЕРС.264(68) и МСC.385(94);
- приводится мощность двигателей, если она превышает 130 кВт, номинальная мощность означает максимальную длительную мощность, указанную в паспортной характеристике двигателя;
- один из трёх вышеуказанных методов.

В Руководстве 2016 г. указано, что ч. I ПУЭЭС может быть элементом судовой системы управления безопасностью, но если в судоходной компании действует система экологического менеджмента, соответствующая Стандарту ISO 14001, то мониторинг эксплуатационной экологической эффективности может быть неотъемлемой частью системы экологического менеджмента.

Проектный индекс энергетической эффективности для новых судов EEDI (или конструктивный коэффициент энергетической эффективности) и эксплуатационный (операционный) критерий энергетической эффективности судна EEOI имеют одинаковый физический смысл: отношение количества произведенного «парникового» газа CO₂ к величине транспортной работы судна за определенный период времени [6], [7].

Стадии разработки ПУЭЭС [8]: планирование; реализация, внедрение; мониторинг; самооценка и усовершенствование. Судовой ПУЭЭС разрабатывается компанией для каждого судна с использованием эксплуатационного (операционного) коэффициента энергетической эффективности (EEOI) в соответствии с рекомендациями МЕРС.1/Circ.684 от 17.08.2009 г. и Резолюцией МЕРС 203, принятой 15.07.2011 г. Основные рекомендации, которые могут быть включены в ПУЭЭС, приведены далее [8]:

1. *Топливосберегающая эксплуатация судов и улучшенное планирование рейса* могут быть достигнуты разработкой оптимального маршрута с использованием программного обеспечения для решения различных задач, в том числе навигационных, на морском переходе, проводки судна наиболее выгодными путями с учётом конкретных гидрометеорологических условий.

2. *Соблюдение сроков рейса* для планирования совместной работы портов и судна, своевременной постановки судна к причалу и взятия его под обработку.

3. *Оптимизация скорости* не означает минимальную скорость. Фактически при плавании со скоростью ниже оптимальной расход топлива выше, при малых скоростях проявляется повышенная вибрация и проблемы, связанные с налетом сажи в камерах сгорания и в выхлопных системах. При согласовании условий чартера следует направлять усилия на поощрение судна к эксплуатации с оптимальной скоростью для максимального повышения энергоэффективности.

4. *Оптимизированная мощность на валу* — рекомендуемая эксплуатация судна при постоянной частоте вращения вала.

5. *Оптимизация процесса управления судном* — дифферент судна в грузу или в балласте оказывает большое влияние на сопротивление судна в воде, а оптимизация дифферента может обеспечить значительную экономию топлива. Полному применению оптимизации дифферента могут препятствовать конструкция судна или факторы безопасности.

6. *Оптимальный балласт*. Балласт следует корректировать с учетом требований относительно оптимальных условий дифферента и управления судном, а также условий оптимального балласта, обеспечиваемого посредством надлежащего планирования погрузки. Условия и меры по управлению балластом изложены в Судовом плане управления балластными водами.

7. *Оптимизация набегающего на гребной винт потока*. Улучшение набегающего на гребной винт потока воды с помощью таких устройств, как бортовые управляемые рули или направляющие насадки, может повысить эффективную пропульсивную мощность и поэтому позволяет сократить расход топлива. Энергоэффективность можно значительно повысить путем очистки и полировки гребного винта или изменением его покрытия.

8. *Оптимальное использование рулевого устройства и системы управления курсом судна* (авторулевой) — достигается улучшением управления курсом путем менее частых и незначительных переключений пера руля и сводит к минимуму потери энергии вследствие сопротивления руля. При подходе к портам и лоцманским станциям авторулевой не всегда более эффективен, поскольку ручное управление рулем обеспечивает более быстрое реагирование на подаваемые команды.

9. *Уход за корпусом судна, удаление биообрастаний и шероховатости*. Сопротивление корпуса может быть снижено за счёт покрытия по новой технологии, возможно, в сочетании с меньшими промежутками между очистками. Должна присутствовать регулярная проверка состояния корпуса судна на плаву. Чем более гладкой является поверхность корпуса, тем выше эффективность использования топлива.

10. Альтернативные виды топлив для СЭУ [9]:

- сжиженный природный газ (LNG);
- метанол, высшие алифатические спирты;
- водород (сырьё для получения водорода неисчерпаемо — вода, продуктом сгорания водорода является вода);
- сероводород, содержащийся в растворенном состоянии в морской воде, представляет потенциальную угрозу, а с другой стороны, является энергоносителем с большой кратностью запаса;
- водно-топливные, спиртово-топливные эмульсии, предназначенные для экономии углеводородного топлива, снижения эмиссии вредных токсичных компонентов с отработанными газами СЭУ;
- присадки к топливам и смазочным материалам позволяют решить следующие проблемы: снизить концентрацию сажи в отработанных газах СЭУ, улучшить триботехнические характеристики смазочных материалов, снизить коэффициент трения, увеличить время межремонтного пробега машин и механизмов судового оборудования.

11. *Утилизация теплоты ОГ СЭУ*. Существующие на судах технологии утилизации теплоты ОГ СЭУ имеют ряд недостатков: 1) низкий коэффициент использования теплоты ОГ СЭУ; 2) большая трудоемкость и опасность для экипажа, обусловленная частыми и вредными для экипажа работами по очистке от сажи трубных сборок котла-утилизатора; 3) выброс сажи с продувочными газами в атмосферу. Авторами статьи разработано новое техническое решение по утилизации теплоты ОГ СЭУ, которое позволяет исключить указанные выше недостатки [9].

12. *Рациональное использование тоннажа* может быть обеспечено путем усовершенствования планирования работы флота и в особенности сокращения периодов балластного перехода, в чем заинтересованы все стороны перевозки груза.

13. Контролировать и рассчитывать целесообразность содержания изношенных судов с целью выявления выгоды и потерь от необходимых ремонтов изношенных судов и поддержания их в хорошем техническом и мореходном состояниях.

14. *Район плавания и перевозок.* В районах, соответствующих его классу согласно Классификационному свидетельству. Пути выбора наиболее эффективного сочетания района плавания и перевозимого груза лежат в сфере компетенции и ответственности судоходной Компании.

15. *Совместимость мер.* В процессе морской перевозки участвуют различные заинтересованные стороны и в этой связи важно иметь налаженные и усовершенствованные пути взаимодействия для осуществления успешной перевозки грузов.

Необходимо отметить, что предложенные рекомендации имеют общий характер, поэтому для каждого конкретного проекта судна при разработке ПУЭЭС необходимо учитывать его специфику, характеристику перевозимых грузов, навигационное планирование перехода, время года, даты выхода / прихода в порт.

В предлагаемой статье рассматриваются вопросы минимизации операционного коэффициента энергетической эффективности судна (ОКЭЭС) за счет оптимизации скорости судна (пп. 3), массы перевозимого груза и дистанции перехода.

Методы и материалы (Methods and Materials)

В качестве объекта исследований выбраны реальное судно и реальный рейс (табл. 1).

Таблица 1

Характеристика судна

Название	SORMOVSKIY-45
Флаг	Молдова
Судовладелец	NAVIMAR LTD
Номер ММО	8133566
Валовая вместимость	2478
Позывной сигнал	ERWP
Тип судна	Генеральный груз
Экипаж	14 человек
Год и место постройки	1982, Россия
Классификационное общество	PMPC
Район плавания	SORMOVSKIY-45
Мощность судовой энергетической установки, кВт	1350
Используемое судовое топливо на маршруте перехода	Дизельное ЕВРО зимнее, сорт С, экологического класса К5 (ДТ-3-К5)

Скорость судна и дистанция морского перехода определяются с помощью доплер-лага FURUNO DS-80. Объем загруженного при бункеровке судового топлива определяется с помощью расходомеров, а расходуемое топливо на конкретный переход — по изменению уровня топлива в танке.

Выполним анализ гидрометеорологических условий в Азово-Черноморском и Средиземноморском бассейнах между портами Ростов-на-Дону (РФ) — Дуррес (Албания), с заходом в промежуточные порты на январь – февраль 2017 г. При выходе судна из р. Дон атмосферное давление 1032 кПа, незначительное ветровое волнение, высота волны 0,5 м, ветер до 5 м / с в полосе экваториальной депрессии, в которой создаются условия для образования циклонов. Антициклон 1030 кПа, в центре Черного моря и антициклон 1034 кПа в центре Азовского моря способствуют хорошей погоде, атмосферное давление 1033 кПа. Видимость хорошая — 5 миль.

Над материковой Грецией появился антициклон 1020 кПа, который подвинул антициклон 1018 кПа к югу Эгейского моря и в результате объединился с циклоном 1010 кПа, который находится на острове Сицилия. Атмосферное давление на переходе 1012 кПа, ветер юго-восточный 7 – 10 м/с. Высота волны 2,5 м. Перед приходом в порт атмосферное давление имеет

значение 1014 кПа. Скорость ветра достигает 5 м/с. Ветровое волнение сохраняется. Высота волны 2 м.

Несмотря на то, что Правило 21 Прил. VI МАРПОЛ 73/78 не требует расчета конструктивного коэффициента энергетической эффективности судна (ККЭЭС) для судов типа т/х «Сормовский-45», авторами статьи в порядке исключения был выполнен расчет ККЭЭС для сравнения с ОКЭЭС.

Расчеты ОКЭЭС выполнены согласно разработанной компьютерной программе для условий рейса в Азово-Черноморском и Средиземноморском бассейнах между портами Ростов-на-Дону – Дуррес, с заходом в промежуточные порты. Прием на борт судна груза выполняется согласно удельному погрузочному объему (УПО) груза, рассчитанному для полной вместимости в грузовые отсеки судна.

Результаты (Results)

ККЭЭС рассчитан по формулам [8]:

$$\text{ККЭЭС} = (1 - X / 100) \cdot L; \quad (1)$$

$$L = ab^{-c}, \quad (2)$$

где X — константа, зависящая от типа судна и временного фактора; L — величина базовой линии; a, c — константы: для судна «генеральный груз» $a = 107,48$; c принимается равным 0,216 [8]; b — дедвейт судна 3346 т; $L = 107,48 \cdot 3346^{-0,216} / 1000 = 0,0186$; $\text{ККЭЭС} = (1 - 30/100) \cdot 0,0186 = 0,01302$.

ОКЭЭС, кг $\text{CO}_2 / \text{Nm} \cdot \text{mt}$, рассчитан по формуле

$$\text{ЕЕОИ} = \frac{Q_{\text{CT}} \cdot K_{\text{CO}_2}}{D_{\text{Nm}} \cdot G_{\text{mt}}}, \quad (3)$$

где Q_{CT} — расход топлива на переход, т; $K_{\text{CO}_2} = 3,186$ — безразмерный коэффициент пересчета расхода топлива в выбросы диоксида углерода в зависимости от содержания углерода в топливе, кг; D_{Nm} — расстояние между портами, мили; G_{mt} — масса груза, погруженного на судно, т.

Расчеты ОКЭЭС должны проводиться для каждого судна с целью анализа для последующей минимизации выбросов диоксида углерода — основного компонента «парниковых газов» [9], [10]. С другой стороны, при снижении расхода судового топлива на выбранный маршрут снижаются выбросы всех токсичных веществ и соединений, содержащихся в ОГ СЭУ.

Расчетные исследования ОКЭЭС проводились в зависимости от изменения следующих параметров:

– скорость судна, уз: 5,1; 6,5; 7,2; 9,0; 10,6; 12,7*; 14,8**.

Примечание. Скорости, отмеченные значками *, **, приняты условно для данного конкретного судна;

– дистанция перехода Nm : 409; 380; 265; 740, 1494;

– масса груза mt : 1500; 2794; 2900; 3000; 3100;

– обороты коленчатого вала, мин^{-1} : 140; 200; 240; 260; 290;

– нагрузка СЭУ, %: 25; 50; 75; 100.

Результаты расчетных исследований представлены в табл. 2 – 6 и на рис. 1 – 4. Влияние дистанции морского перехода на ОКЭЭС показано в табл. 2 и на рис. 1.

Таблица 2

Изменение ОКЭЭС в зависимости от дистанции перехода при $G_{\text{mt}} = 3100 \text{ mt}$, $v_c = 10,6 \text{ уз}$

Наименование маршрута	Время в пути, ч	Расход топлива, т	Дистанция, мили	ОКЭЭС, кг· $\text{CO}_2 / \text{Nm} \cdot \text{mt}$
Ростов – Дуррес	140,9	33,1	1494	0,023
Ростов – Синоп	38,6	9,07	409	0,023
Синоп – Текирдаг	35,8	8,4	380	0,023
Текирдаг – Измир	25	5,88	265	0,023
Измир – Дуррес	69,8	16,4	740	0,023

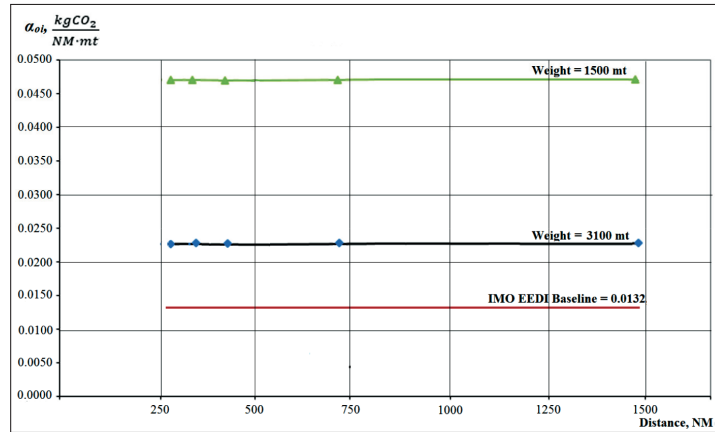


Рис. 1. Зависимость ОКЭЭС от дистанции перехода при скорости судна 10,6 уз

Из представленных данных следует, что дистанция перехода не влияет на ОКЭЭС при фиксированных массах перевозимого груза. Влияние массы перевозимого груза на ОКЭЭС показано в табл. 3 и 4 и на рис. 2 и 3.

Таблица 3

Влияние массы груза на изменение ОКЭЭС при скорости судна $v = 10,6$ уз

Наименование маршрута	Время в пути, ч	Расход топлива, т	Расстояние, мили	Масса груза, т	ОКЭЭС, $\text{кг} \cdot \text{CO}_2 / \text{Nm} \cdot \text{mt}$,
Ростов – Дуррес	140,9	33,1	1494	3100	0,022
Ростов – Синоп	38,6	9,07	409	3000	0,024
Синоп – Текирдаг	35,8	8,4	380	2900	0,025
Текирдаг – Измир	25	5,88	265	2794	0,047
Измир – Дуррес	69,8	16,4	740	1500	0,023

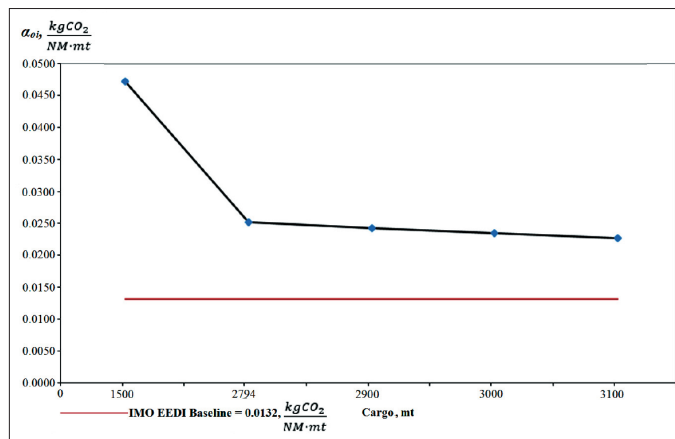


Рис. 2. Зависимость ОКЭЭС от массы груза при скорости 10,6 уз

Таблица 4

Зависимость ОКЭЭС от массы груза и дистанции, при скорости судна $v = 9,0$ уз

Наименование маршрута	Время в пути, ч	Расход топлива, т	Расстояние, мили	Масса груза, т	ОКЭЭС, $\text{кг} \cdot \text{CO}_2 / \text{м} \cdot \text{т}$
Ростов – Дуррес	166	29,05	1494	3100	0,020
Ростов – Синоп	45,4	7,95	409	3000	0,021
Синоп – Текирдаг	42,2	7,39	380	2900	0,022
Текирдаг – Измир	29,4	5,15	265	2794	0,041
Измир – Дуррес	82,2	14,39	740	1500	0,0207

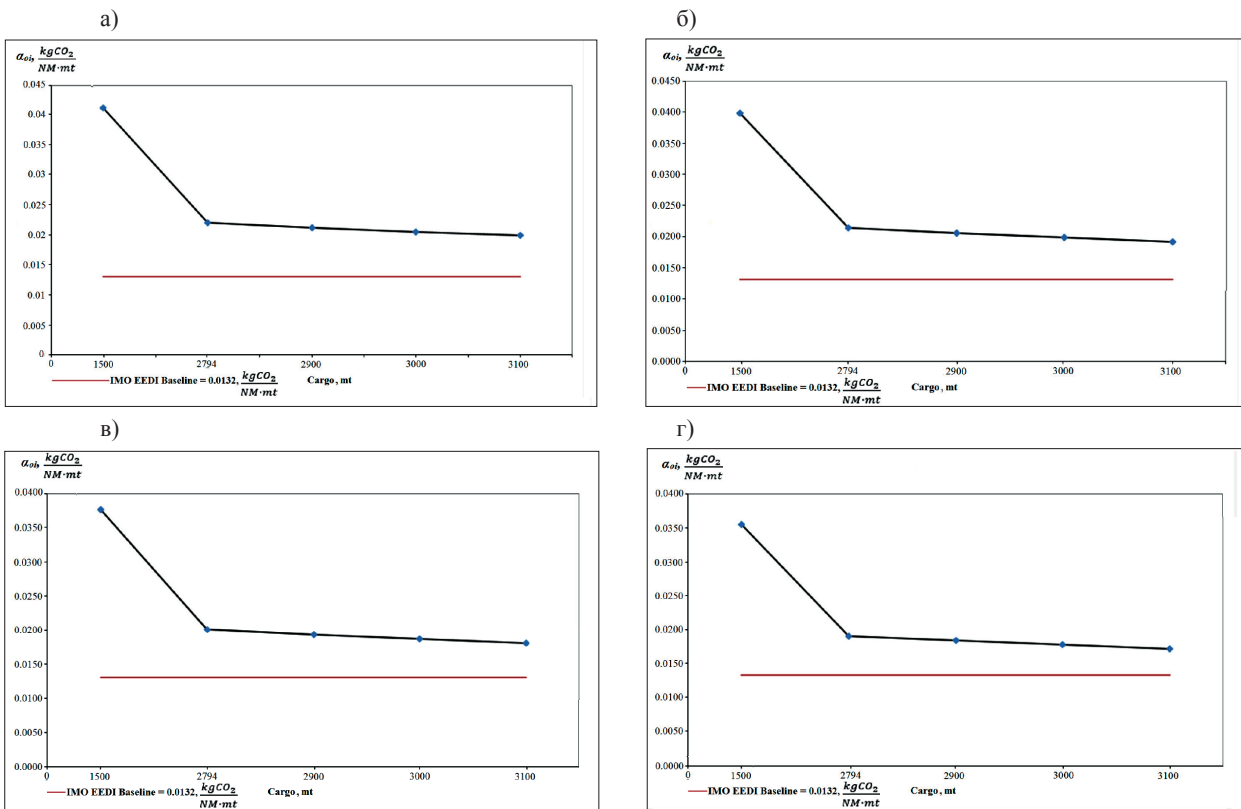


Рис. 3. Зависимости ОКЭЭС от массы груза: а — при скорости 9 уз; б — при скорости 7,2 уз; в — при скорости 6,5 уз; г — при скорости 5,1 уз

Установлено, что с увеличением массы груза ОКЭЭС снижается, причем особенно резко при снижении массы груза от 1500 до 2800 т. Снижение скорости судна в диапазоне 10,6 – 5,1 уз приводит к уменьшению ОКЭЭС, что характеризует переход как энергоэффективный. Влияние скорости судна на ОКЭЭС показано на рис. 4.

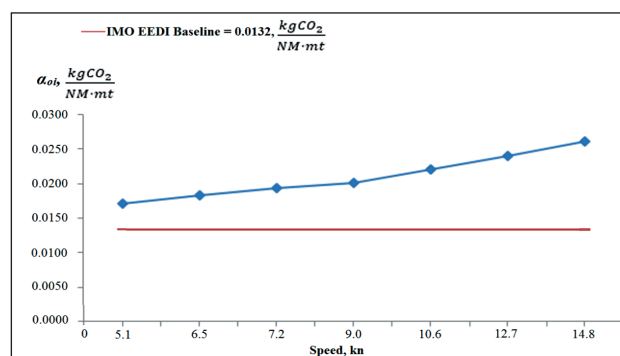


Рис. 4. Зависимость ОКЭЭС от скорости судна при дистанции перехода 1494 миль и массе груза 3100 т

С увеличением скорости судна ОКЭЭС повышается и отклонение от конструктивного коэффициента энергетической эффективности судна также растет.

Обсуждение (Discussion)

Влияние массы перевозимого груза на ОКЭЭС. ОКЭЭС имеет высокую параметрическую чувствительность в зависимости от массы груза при выбранной скорости судна 10,6 уз:

$G_{mi} = 3100$ т	ОКЭЭС = 0,0228	⊖⊖⊖⊖
$G_{mi} = 3000$ т	ОКЭЭС = 0,0235	⊖⊖⊖
$G_{mi} = 2900$ т	ОКЭЭС = 0,0244	⊖⊖
$G_{mi} = 2794$ т	ОКЭЭС = 0,0253	⊖
$G_{mi} = 1500$ т	ОКЭЭС = 0,0471	⊕⊕⊕⊕⊕

Значение конструктивного КЭЭС = 0,0132 соответствует линии, параллельной оси абсцисс, на рис. 1 – 4. С уменьшением массы груза величина ОКЭЭС повышается. Аналогичные закономерности наблюдаются и при других исследованных скоростях: 14,8; 12,7; 9,0; 7,2; 6,5; 5,1.

Влияние скорости на ОКЭЭС. Скорость судна изменялась в следующем диапазоне, уз: 5,1; 6,5; 7,2; 9,0; 10,6; 12,7*; 14,8** (скорости, отмеченные значками *, **, приняты условно для данного конкретного судна). Установлено, что с увеличением скорости судна ОКЭЭС повышается (см. рис. 4). Представляет практический интерес анализ изменения соотношения $\rho = \text{ОКЭЭС} / \text{ККЭЭС}$ в зависимости от скорости судна при массе груза 2794 т и дистанции в грузу 1494 миль. Полученные результаты:

$v_1 = 10,6$ уз	$\rho = \text{ОКЭЭС} / \text{ККЭЭС} = 1,92$;
$v_2 = 9,0$ уз	$\rho = 1,68$;
$v_3 = 7,2$ уз	$\rho = 1,62$;
$v_4 = 6,5$ уз	$\rho = 1,53$;
$v_5 = 5,1$ уз	$\rho = 1,44$.

Из полученных данных следует, что с уменьшением скорости судна соотношение $\rho = \text{ОКЭЭС} / \text{ККЭЭС}$ снижается от 1,92 до 1,44, что является положительным фактором как для улучшения экономических показателей рейса, так и для защиты окружающей среды.

Влияние количества оборотов на коленчатом валу на ОКЭЭС. Для расчетов приняты: дистанция перехода 409 миль, масса груза 3100 т. Результаты расчетов:

$n = 140$ мин ⁻¹	$\alpha_{oi} = 0,0171$ кг CO ₂ / Nm · mt;
$n = 200$ мин ⁻¹	$\alpha_{oi} = 0,0182$ кг CO ₂ / Nm · mt;
$n = 240$ мин ⁻¹	$\alpha_{oi} = 0,0193$ кг CO ₂ / Nm · mt;
$n = 260$ мин ⁻¹	$\alpha_{oi} = 0,0200$ кг CO ₂ / Nm · mt;
$n = 290$ мин ⁻¹	$\alpha_{oi} = 0,0228$ кг CO ₂ / Nm · mt.

Определено, что с увеличением количества оборотов на коленчатом валу ОКЭЭС повышается. Представляет практический интерес определение влияния количества оборотов главного двигателя на эмиссию оксидов азота, которое может быть определено по уравнению [8]:

$$\dot{E}_{\text{NOx}} = 45n^{-0,2}, \quad (4)$$

где n — количество оборотов, мин⁻¹.

Влияние оборотов двигателя и степени использования мощности энергосиловых судовых установок на расход топлива и эмиссию оксидов азота приведено в табл. 5 и 6.

Таблица 5

Зависимость расхода судового топлива (кг/ч) и эмиссии оксидов азота от оборотов ГД

Наименование	Вид топлива	Частота вращения, мин ⁻¹						
		140	200	240	260	290	310	330
		Скорость, уз						
		5,7 / 5,0	6,5 / 5,8	8,0 / 7,2	9,0	10,6	12,7	14,8
ГД № 1 Пр. Б. Туре 6NVD-48 AU	MDO	35	50	60	80	110,2	141	182,6
ГД № 2 Л. Б. Туре 6NVD-48 AU	MDO	35	50	60	80	110,2	141	182,6
Эмиссия оксидов азота, г/кВт·ч	MD	16,75	15,59	15,04	14,79	14,48	14,29	14,11

Таблица 6

Зависимость расхода топлива (кг/ч) дизель-генератора от нагрузки

Механизм	Вид топлива	Нагрузка, кВт			
		25 %	50 %	75 %	100 %
ДГ № 1 50 кВт Типа 6 Ч 12/14	Дизельное топливо MDO	10,4	11,3	12,5	14,6
ДГ № 2 50 кВт Типа 6 Ч 12/14	Дизельное топливо MDO	10,4	11,3	12,5	14,6
ДГ № 3 50 кВт Типа 6 Ч 12/14	Дизельное топливо MDO	10,4	11,3	12,5	14,6

Определено, что с увеличением количества оборотов ГД эмиссия оксидов азота, содержащихся в отработанных газах СЭУ, снижается (см. табл. 5), но запас от нормируемых значений NO_x относительно невелик (находится в пределах 3 – 5 %), что необходимо учитывать в зонах особого контроля NECA.

Следует отметить, что при использовании на судах углеводородного судового топлива необходимо проводить исследования по минимизации расхода судового топлива и, как следствие, — по минимизации выбросов диоксида углерода — основного компонента «парниковых» газов в зависимости от основных параметров эксплуатации судов. В дальнейшем для снижения эмиссии диоксида углерода, вплоть до его исключения, требуется разработка альтернативных источников энергии и переход на альтернативное судовое топливо [9], [10] — табл. 7.

Таблица 7

Коэффициент пересчета (K_{CO_2}) расхода судового топлива в выбросы диоксида углерода в зависимости от содержания углерода в топливе

Тип топлива	Источник	Содержание углерода в топливе, массовая доля	K_{CO_2} , t-CO ₂ /t-топлива
1. Diesel/GasOil	ISO 8217 Grades DMX through DMB	0,8744	3,206
2. Light Fuel Oil (LFO)	ISO 8217 Grades RMA through RMD	0,8594	3,151
3. Heavy Fuel Oil (HFO)	ISO 8217 Grades RME through RMK	0,8493	3,114
4. Liquefied Petroleum Gas (LPG)	Propane	0,8182	3,000
	Butane	0,8264	3,030
5. Liquefied Natural Gas	LNG	0,7500	2,750
6. Ethanol		0,528	1,913
7. Methanol		0,375	1,375
8. Hydrogen		0,0	0,0
9. Hydrogen Sulfide		0,0	0,0

Из анализа табл. 7 следует, что перевод морского транспорта на сжиженный природный газ по сравнению с традиционным углеводородным топливом позволит снизить эмиссию диоксида углерода всего на 10 – 15 %. Перевод судов на спиртовое топливо позволяет снизить эмиссию CO_2 на 40 % (в случае этанола) и на 56 % (в случае метанола). При использовании в качестве судового топлива водорода и сероводорода эмиссия CO_2 полностью отсутствует.

С целью снижения причинения ущерба окружающей среде, биосфере [11] – [13] при эксплуатации судов интересным представляется новое решение для борьбы с вредными выбросами, в частности минимизация ОКЭЭС, при прохождении зоны Панамского канала [14].

Заключение (Conclusion)

В результате выполненных исследований следует отметить, что минимальные значения ОКЭЭС в условиях реального рейса могут быть достигнуты при следующих условиях: масса перевозимого груза должна быть в пределах не менее 3000 – 3100 т, скорость судна — в пределах 6,5 – 9,0 уз. Дистанция перехода не влияет на величину ОКЭЭС. На приведенные выше результаты могут оказать влияние гидрометеорологические условия. Для обобщения полученных результатов с целью переноса их на другие суда необходимо расширить специфику и структуру исследований.

Авторы выражают благодарность капитанам дальнего плавания В. Н. Жмур, Л. А. Пивоварову, А. А. Гурову, канд. техн. наук О. Н. Товстокорому, ведущему научному сотруднику И. И. Рублёву, принявшим участие в обсуждении отдельных разделов работы и высказавшим критические замечания в адрес отдельных положений настоящей статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. MARPOL Consolidated edition 2011: Articles, Protocols, Annexes and Unified Interpretations of the International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, 1973 as modified by the 1978 and 1997 Protocols. — London: CPI Group (UK) Ltd, 2011. — 448 p.
2. Ship Energy Efficiency Management Plan (SEEMP): SEEMP template for owners and operators. — London: Lloyd's Register, 2012. — 12 p.
3. Пивоваров Л. А. Разработка плана управления энерго-эффективностью судна (ПУЭЭС) для танкеров / Л. А. Пивоваров // Збірка матер. Міжн. Наук. Практик. Конф. «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті» – MINTT-2013. — Херсон: ВЦ ХДМА, 2013. — Т. 1. — С. 73–77.
4. SOLAS. Consolidated text of the International Convention for the Safety of Life at Sea, 1974 and its Protocol of 1988: articles, annexes and certificates. — London: IMO, 2004. — 566 p.
5. Богданов В. И. Синергетический подход к задаче оптимизации качества управления судном на курсе / В. И. Богданов, С. А. Подпорин, А. С. Потапов // Проблемы и методы разработки и эксплуатации вооружения и военной техники ВМФ. — 2006. — Вып. 57. — С. 29–34.
6. MEPC 65/INF.17 IMO Model Course on Energy-Efficient Operation of Ships. — London: World Maritime University, 2013. — 61 p.
7. Guidelines for voluntary use of the ship energy efficiency Operational indicator (EEOI). — London: IMO, 2009. — 75 p.
8. Леонов В. Е. Современные информационные технологии обеспечения безопасности судоходства и их комплексное использование: монография / В. Е. Леонов, В. И. Дмитриев, О. Н. Безбах, А. А. Гуров, В. Б. Сус, В. Ф. Ходаковский. — Херсон: ВЦ ХДМА, 2014. — 324 с.
9. Леонов В. Е. Защита окружающей среды при эксплуатации судов: монография. / В. Е. Леонов, В. И. Дмитриев. — М.: МОРКНИГА, 2017. — 252 с.
10. Дмитриев В. И. Информационные технологии обеспечения безопасности судоходства и их комплексное использование (e-NAVIGATION): учеб. пособие / В. И. Дмитриев. — М.: МОРКНИГА, 2013. — 176 с.
11. Пипченко А. Д. Теоретические аспекты судовождения: учеб. пособие / А. Д. Пипченко. — Одесса: ОНМА, 2013. — 144 с.
12. Лобастов В. М. Электронные картографические системы в судовождении: учеб. пособие / В. М. Лобастов. — Владивосток: Мор. госуд. ун-т, 2009. — 166 с.
13. Бездух М. О. Методика визначення ризиків та їх прийнятних рівнів для декларування об'єктів підвищеної небезпеки: навчальний посібник / М. О. Бездух. — К.: Основа, 2003. — 191 с.
14. Панамский канал: новое решение для борьбы с вредными выбросами. Работник моря // Всеукраинская морская газета. — 31 октября 2017. — № 20 (132). — С. 2.

REFERENCES

1. MARPOL Consolidated edition 2011: Articles, Protocols, Annexes and Unified Interpretations of the International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, 1973 as modified by the 1978 and 1997 Protocols. London: CPI Group (UK) Ltd, 2011.

2. *Ship Energy Efficiency Management Plan (SEEMP): SEEMP template for owners and operators*. London: Lloyd's Register, 2012.
3. Pivovarov, L.A. "Razrabotka plana upravleniya energo-effektivnost'yu sudna (PUEES) dlya tankerov." *Zbirka mater. Mizhn. Nauk. - Praktik. Konf. «Suchasni informa-tsiini ta innovatsiini tekhnologii na transporti»-MINTT-2013*. Vol. 1. Kherson: VTs KhDMA, 2013: 73–77.
4. *SOLAS. Consolidated text of the International Convention for the Safety of Life at Sea .1974 as amended, including the Protocol of 1988: articles, annexes and certificates*. London: IMO, 2004.
5. Bogdanov, V.I., S.A. Podporin, and A.S. Potapov. "Sinergeticheskiy podkhod k zadache optimizatsii kachestva upravleniya sudnom na kurse." *Problemy i metody razrabotki i ekspluatatsii vooruzheniya i voennoi tekhniki VMF 57* (2006): 29–34.
6. *MEPC 65/INF.17 IMO Model Course on Energy-Efficient Operation of Ships*. London: World Maritime University, 2013.
7. *Guidelines for voluntary use of the ship energy efficiency Operational indicator (EEOI)*. London: IMO, 2009.
8. Leonov, V.E., V.I. Dmitriev, O.N. Bezbakh, A.A. Gurov, V.B. Sys, and V.F. Khodakovskii. *Sovremennye informatsionnye tekhnologii obespecheniya bezopasnosti su-dokhodstva i ikh kompleksnoe ispol'zovanie. Monografiya*. Kherson: VTs KhDMA, 2014.
9. Leonov, V.E., and V.I. Dmitriev. *Zashchita okruzhayushchei sredy. pri ekspluatatsii sudov: Monografiya*. M.: MORKNIGA, 2017.
10. Dmitriev, V.I. *Informatsionnye tekhnologii obespecheniya bezopasnosti sudokhodstva i ikh kompleksnoe ispol'zovanie (e-NAVIGATION): Uchebnoe posobie*. M.: «MORKNIGA», 2013.
11. Pipchenko, A.D. *Teoreticheskie aspekty sudovozhdeniya: Uchebnoe posobie*. Odessa: ONMA, 2013.
12. Lobastov, V.M. *Elektronnye kartograficheskie sistemy v sudovozhdenii: Uchebnoe posobie*. Vladivostok: Mor. Gosud. Un-t, 2009.
13. Bezdukh, M.O. *Metodika viznachennya rizikiv ta ikh priinyatnikh rivniv dlya deklaruvannya ob'ektiv pidvishchenoi nebezpeki: navchal'ni posibnik*. K.: Osnova, 2003.
14. "Panamskii kanal: novoe reshenie dlya bor'by s vrednymi vybrosami. Rabotnik moray." *Vseukrainskaya morskaya gazeta* 20(132) (2017): 2.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Леонов Валерий Евгеньевич —
доктор технических наук, профессор
Херсонская Государственная морская академия
73000, Украина, Херсон, пр. Ушакова, 20
e-mail: Leonov_V_E@i.ua
Тимошенко Владислав Викторович —
старший помощник капитана, ассистент
Судоходная компания «NIESKO»
54017, Украина, Николаев, ул. Буденного, 44
Херсонская Государственная морская академия
73000, Украина, Херсон, пр. Ушакова, 20
e-mail: vladlian1977@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Leonov, Valery Ye. —
Dr. of Technical Sciences, professor
Kherson State Maritime Academy
20 Ushakova Av., Kherson, 73000, Ukraine
e-mail: Leonov_V_E@i.ua
Timoshenko, Vladislav V. —
Senior assistant to the captain, assistant
Shipping Company "NIESKO"
44 Budennogo Str., Nikolaev, 54017, Ukraine
Kherson State Maritime Academy
20 Ushakova Av., Kherson, 73000, Ukraine
e-mail: vladlian1977@gmail.com

Статья поступила в редакцию 26 января 2018 г.
Received: January 26, 2018.