



МЕХАНИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ДВИЖИТЕЛИ

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ТИПА ИСПОЛЬЗУЕМОГО СУДОВОГО ТОПЛИВА НА ВЕЛИЧИНУ УГЛЕРОДНОГО СЛЕДА ТРАНСПОРТНОЙ УСЛУГИ

А.С. Реуцкий, канд. техн. наук, ФАУ «Российский морской регистр судоходства», 191181 Россия, Санкт-Петербург, Миллионная ул., 7А, e-mail: reutskii.as@rs-class.org

В.В. Якимов, МВА, АО «ЦНИИМФ», 191015 Россия, Санкт-Петербург, Кавалергардская ул., 6А, e-mail: YakimovVV@cniimf.ru

А.А. Буцанец, ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова», 198035 Россия, Санкт-Петербург, Двинская ул., 5/7, e-mail: butsanetsaa@gumrf.ru

В работе рассматривается существующая международная и отечественная нормативная база контроля углеродного следа, оставляемого морским транспортом. Целью исследования являлась оценка влияния типа используемого судового топлива на углеродный след транспортной услуги, определяемый через коэффициент энергетической эффективности транспортного судна. В качестве используемых материалов и методов послужили обобщенные и проанализированные материалы исследований отечественных и зарубежных ученых, а также профильных руководящих документов. В статье представлены результаты расчета углеродного следа транспортных судов различных типов с ледовыми усилениями класса Arc7 на участках СМП с использованием ими различных типов судовых топлив. Использование представленной методики оценки углеродного следа позволило количественно оценить влияние типа используемого судового топлива на углеродный след транспортной услуги, определяемый через коэффициент энергетической эффективности транспортного судна. Представленные в исследовании расчеты позволяют сделать несколько важных выводов: с использованием альтернативных топлив появляется возможность значительно снизить количество выбрасываемых в атмосферу парниковых газов; наилучшие результаты продемонстрировали метанол и аммиак — снижение количества выбрасываемого CO₂-экв. составило 57 % и 96 % соответственно.

Ключевые слова: углеродный след, корпоративный учет, углеродный след транспортной услуги, коэффициенты энергоэффективности судов, ЕКПИ.

ASSESSMENT OF THE IMPACT OF THE TYPE OF MARINE FUEL USED ON THE CARBON FOOTPRINT OF THE TRANSPORT SERVICE

A.S. Reutskii, PhD, FAI Russian Maritime Register of Shipping, 191181 Russia, St. Petersburg, Millionnaya ul., 7A, e-mail: reutskii.as@rs-class.org

V.V. Yakimov, Marine&MBA, Central Marine Research and Design Institute (CNIIMF), 191015 Russia, St. Petersburg, Kavalergardskaya ul., 6A e-mail: YakimovVV@cniimf.ru

A.A. Butsanets, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, 198035 Russia, St. Petersburg, Dvinskaya ul. 5/7, butsanetsaa@gumrf.ru

The paper examines the existing international and domestic regulatory framework for the control of the carbon footprint of sea transport. The aim of the study was to assess the impact of the type of marine fuel used on the carbon footprint of the transport service, determined through the energy efficiency coefficient of the transport vessel. The materials and methods used were generalized and analyzed research materials of domestic and foreign scientists, as well as relevant guidance documents. The article presents the results of calculating the carbon footprint of transport vessels of various types with ice reinforcements of class Arc7 on sections of the Northern Sea Route using various types of marine fuels. The use of the presented methodology for estimating the carbon footprint made it possible to quantify the impact of the type of marine fuel used on the carbon footprint of a transport service, determined through the energy efficiency coefficient of a transport vessel. The calculations presented in the study allow us to draw several important conclusions: the use of alternative fuels can significantly reduce the amount of greenhouse gases emitted into the atmosphere, the best results were demonstrated by methanol and ammonia — the amount of CO₂ equivalent emitted decreased by 57 % and 96 %, respectively.

Keywords: carbon footprint, carbon footprint of transport services, ship energy efficiency coefficients, EKPI.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящий момент одновременно с возникновением отечественной и международной нормативной базы по оценке углеродного следа происходит активное освоение Северного морского пути (далее — СМП) и становятся актуальными вопросы определения углеродного следа транспортных услуг при использовании судов с ледовым классом, эксплуатирующихся на арктических трассах или на чистой воде. Отдельным и немаловажным вопросом остается способ снижения углеродного следа путем уменьшения количества выбрасываемых в атмосферу судовыми энергоустановками парниковых газов. В целях нормативного регулирования снижения количества выбросов парниковых газов с морского транспорта МАРПОЛ ввела группу понятий, таких как план по управлению энергоэффективностью судна (Ship Energy Efficiency Management Plan, SEEMP), эксплуатационный показатель углеродоемкости морских судов (Carbon Intensity Indicator, CII), а также коэффициенты конструктивной энергетической эффективности (Energy Efficiency Design Index, EEDI) и энергетической эффективности существующих судов (Energy Efficiency Existing Ship Index, EEXI).

Основным документом ИМО, регулирующим выбросы вредных веществ в атмосферу с морских судов, является Приложение VI «Правила предотвращения загрязнения воздушной среды с судов» к Международной конвенции по предотвращению загрязнения с судов 1973 г., измененной Протоколом 1978 г. к ней (МАРПОЛ 73/78) [1]. Коэффициент конструктивной энергетической эффективности представляет собой постоянную для рассматриваемого судна величину, выражающую отношение количества произведенного судовой энергетической установкой парникового газа (CO_2) к осуществленной морским судном транспортной работе. При этом транспортная работа представляет собой произведение массы перевезенного груза на пройденный путь и измеряется в тонно-милях. В исследованиях [2] и [3] среди прочего указано, что использование индексов энергоэффективности представляет интерес не только с точки зрения регулирования отрасли, но и с точки зрения решения прикладных задач по оценке углеродного следа транспортных услуг. В статье [2] указано, что существующая нормативная база оценки углеродного следа преследует прежде всего цели государственного учета и неудобна для решения внутренних задач транспортных компаний, в первую очередь прогнозирования выбросов с целью управления ими, так как существующие инструменты оценки выбросов парниковых газов в основном предполагают оперирование данными о количестве потраченного топлива за отчетный период с последующим переводом количества этого топлива в тонны CO_2 -экв.

Использование коэффициента конструктивной эффективности EEDI для определения углеродного следа, оставляемого судном в ходе грузового рейса, возможно только для неледовых судов на простых с навигационной точки зрения маршрутах. При этом углеродный след на таком маршруте может быть определен по следующей зависимости:

$$CF_{TO} = \sum_{i=1}^b CF_i = \sum_{i=1}^b Capacity \cdot EKPI_i \cdot L_i, \quad (1)$$

где CF_{TO} — углеродный след на всем маршруте, т CO_2 -экв.;

CF_i — углеродный след на участке маршрута i , т CO_2 -экв.;

i — участок маршрута;

$Capacity$ — характеристика полезной грузоподъемности судна на рассматриваемом маршруте, принимаемая для навалочных судов, танкеров, газовозов и всех видов сухогрузных судов, включая Ро-Ро, равной дедвейту (DWT), для пассажирских судов — равной валовой вместимости (GT), а для контейнеровозов — как 70 % дедвейта;

$EKPI_i$ — коэффициент энергоэффективности судна на участке i , т $\text{CO}_2/\text{т-мор.миль}$;

L_i — длина участка маршрута i , мор. миль;

b — количество участков с различными навигационными условиями.

Для линейного судоходства большая часть маршрута проходит с постоянной скоростью и характеризуется одинаковой картиной потребления мощности энергетической установки на пропульсию, а маневрирование и другие режимы работы энергетической установки составляют малую часть времени работы установки во время рейса. Таким образом, определяя углеродный след для маршрутов, проходящих в условиях чистой воды, параметр b следует принять равным 1, а значение коэффициента энергоэффективности $EKPI$ имеет постоянное значение для всего маршрута. В таком случае, углеродный след транспортной перевозки, выполняемой в условиях чистой воды, может быть определен в соответствии с формулой (1), где для судов, имеющих сертификат ИЕЕ, коэффициент энергоэффективности $EKPI_i$ следует принять равным достигнутому конструктивному коэффициенту энергоэффективности $EEXI$ судна. В том случае, если используемое судно не имеет сертификата ИЕЕ, но исходя из общих условий для него возможно произвести расчет коэффициента энергоэффективности $EEDI_{Attained}$ в соответствии с [4], а маршрут его следования проходит по чистой воде, следует принять $EKPI_i = EEDI_{Attained}$.

Однако в условиях Северного морского пути суда движутся с переменной скоростью и имеют разнообразную картину потребления мощности и в сложных с навигационной точки зрения условиях потребляют больше топлива. К тому же для ледовых судов характерен меньший дедевит при большей мощности ЭУ. По этой причине для определения углеродного следа судов с ледовыми усилениями предлагается использовать коэффициент энергоэффективности $EKPI$, который имеет переменный характер для учета сезонных условий окружающей среды:

$$EKPI_i = \frac{(\sum_{j=1}^{n_{ME}} P_{ME} \cdot C_{FME(j)} \cdot SFC_{ME(j)}) + (P_{AE} \cdot C_{FAE} \cdot SFC_{AE})}{Capacity \cdot V_i}, \quad (2)$$

где P_{ME} — мощность главных двигателей на скорости V_i , кВт;

n_{ME} — количество главных двигателей, ед.;

$C_{FME(j)}$ — переводной коэффициент количества израсходованного главными двигателями топлива в г CO_2 -экв. (табл. 1);

$SFC_{ME(j)}$ — удельный расход топлива главными двигателями, г/кВт·ч;

P_{AE} — мощность вспомогательного дизель-генератора, кВт;

C_{FAE} — переводной коэффициент количества израсходованного вспомогательным дизель-генератором топлива в г CO_2 -экв. (табл. 1);

SFC_{AE} — удельный расход топлива вспомогательного дизель-генератора, г/кВт·ч;

$Capacity$ — характеристика полезной грузоподъемности, принимаемая для навалочных судов, танкеров, газовозов и всех видов сухогрузных судов, включая Ро-Ро, равной дедевиту, для пассажирских судов — равной валовой вместимости (GT), а для контейнеровозов — как 70 % дедевита;

V_i — средняя скорость судна на участке i , уз.

Обозначим различия между коэффициентом энергетической эффективности судна $EKPI$ в постановке данного исследования и конструктивным коэффициентом энергоэффективности судна $EEDI_{Attained}$. В постановке [2] различия выражаются как в намеренном исключении из формулы коэффициентов, не имеющих под собой физическую природу, — f_j , f_w и других, а также разделение маршрута следования на участки с различными навигационными условиями и с соответствующими значениями средних скоростей движения на этих участках, а также переменными значениями потребляемой мощности энергетической установки.

Введение индексов энергоэффективности, являющихся не в последнюю очередь рычагом экономического давления на судовладельцев и промышленность, приводит к поиску новых технических решений для удовлетворения новым экологическим нормам. Одним из очевидных и уже давно используемых за рубежом решений по снижению значений $EEDI$ и $EEXI$ является использование топлив, выделяющих при сжигании пониженное количество оксидов серы, азота и углекислого газа, — дистиллянтных топлив, а также природного газа и спиртовых топлив — метанола и этанола. Согласно процедуре по расчету значений коэффициентов энергоэффективности, помимо прочего, выполняется перевод количества потраченного судовой энергоустановкой топлива в натуральную величину выбросов CO_2 , для этого применяется соответствующий коэффициент C_F . В упомянутом документе [4] представлены значения C_F для различных видов судовых топлив, что позволяет сделать наглядный вывод о необходимости применения альтернативных (по отношению к жидким нефтяным) видов топлива (рис. 1) для снижения количества выбрасываемых в атмосферу парниковых газов.

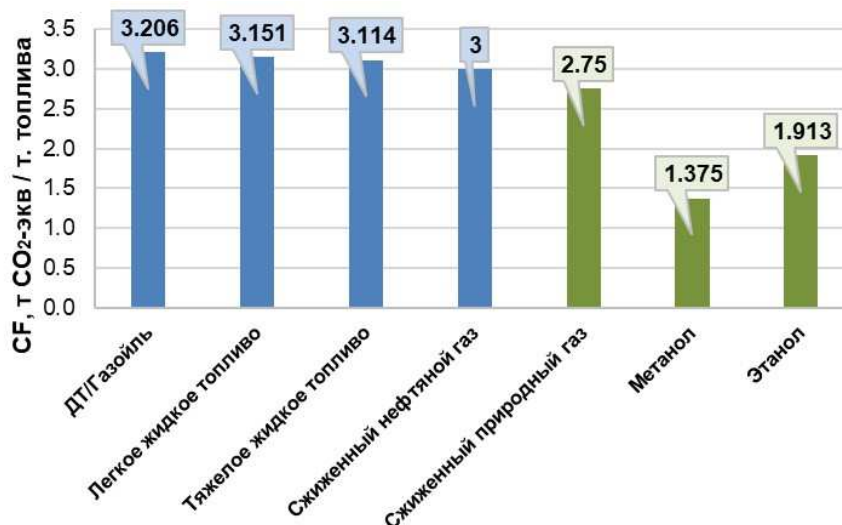


Рис. 1. Коэффициент перевода количества потраченного судовой энергоустановкой топлива в натуральную величину выбросов парниковых газов в CO_2 -экв., тонн CO_2 -экв / тонну топлива

Таким образом, целью исследования становится влияние типа используемого судового топлива на значение ЕКРІ и, соответственно, на величину углеродного следа применительно к судам с высокими категориями ледовых усилений, эксплуатирующимся на маршрутах СМП.

1. ХАРАКТЕРИСТИКИ РАСЧЕТНЫХ СУДОВ

Для проведения исследования установим следующие исходные данные: транспортировка грузов осуществляется судами с категорией ледовых усилений Arc7 из акватории Обской губы в восточном направлении. В качестве грузов выступают продукты переработки природного газа и газового конденсата — метанол, аммиак, сжиженный природный газ и карбамид. Таким образом, исследуемыми типами судов являются танкер-химовоз (HX-40-Arc7), газовоз LPG (LPG-30-Arc7), газовоз СПГ (LNG-60-Arc7) и универсальное сухогрузное судно (CO-20-Arc7) с классом ледовых усилений Arc7. Характеристики исследуемых судов были получены различными способами. Для получения характеристик расчетного танкера-химовоза за судно-прототип был взят ледовый дизель-электрический нефтяной танкер «Schturman Albanov», чьи характеристики были пересчитаны для перевозки метанола. Для остальных типов судов характеристики были найдены на основе неледовых судов-прототипов, в нагрузку масс которых включалась масса ледовых усилений, определяемая в соответствии с [5], и рассчитывалась потребная пропульсивная мощность ЭУ по методике [6] и Правилам РС. Совокупность этих задач решалась в классической постановке методом последовательных приближений. В процессе выполнения приближений многократно последовательно решалась задача уравнения плавучести, до тех пор, пока водоизмещение последнего приближения не будет равно водоизмещению предпоследнего. Вариации водоизмещений достигались приращением длины судна, так как вариации отношения длины к ширине L/B лежат в более широком диапазоне, чем отношение ширины к осадке B/d . Тем более что для судов ледового класса ширина B часто является лимитирующим фактором наравне с осадкой d . Характеристики расчетных судов представлены в табл. 1.

Таблица 1

Основные характеристики расчетных судов

Характеристика	HX-40-Arc7	LPG-30-Arc7	LNG-60-Arc7	CO-20-Arc7
Грузовместимость (98 %), Q , м ³	51 748	34 513	60 000	32 857*
Грузоподъемн. при летней осадке, $M_{ГР}$, т	40 933	23 517	27 050	19 459
Экипаж, $n_{ЭК}$, чел	26	32	32	30
Тип СЭУ	ДЭЭУ			
Тип и число ГД	2 × STX MAN 14V32/40, 7000 kW 2 × STX MAN 18V32/40, 9000 kW	4 × Wartsila 6L50DF, 5700 kW	2 × Wartsila 12V50DF, 11 700kW at 514rpm 2 × Wartsila x 6L50DF 5850kW at 514rpm	
Длина наибольшая, L_{OA} , м	248,92	185,69	222,00	176,60
Длина между перпендикулярами, L_{BP} , м	232,00	176,80	211,30	167,42
Ширина, B , м	34,00	28,00	33,00	27,50
Осадка летн., $d_{летн.}$, м	9,50	11,00	9,50	9,50
Дедвейт летн., т	41 801	28 766	30 050	22 000
Водоизм. летн., $\Delta_{летн.}$, т	63 201	44 539	49 250	34 297
Водоизм. порожнем, $\Delta_{пор.}$, т	21 350	15 772	19 200	12 297
Скорость экспл., v_S , уз	14,00	16,50	17,15	16,70
Кол-во и тип пропульсивной установки	2 × Azipod VI 1800	2 × Azipod VI 2300		2 × Azipod VI 1800
Мощность на валах полная, $Pd_{полн.}$, кВт	22 000	19 180	19 600	17 080
Мощность ЭУ суммарная, Ne , кВт	32 000	22 800	35 100	21 960
Валовая регистровая вместимость судна, GT	44 345	25 833	43 560	16 634
Чистая регистровая вместимость судна, NT	13 306	7686	12 680	9726
* — Grain вместимость трюмов.				

2. РАСЧЕТ УГЛЕРОДНОГО СЛЕДА ПРИ ПОМОЩИ КОЭФФИЦИЕНТОВ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ДЛЯ ТРАНСПОРТНОЙ УСЛУГИ, ОСУЩЕСТВЛЯЕМОЙ РАСЧЕТНЫМИ СУДАМИ В СЛОЖНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ УСЛОВИЯХ

Трасса плавания судов во льдах в восточном направлении, от Обской губы до кромки льда в Беринговом море, включает девять последовательных участков, которым присвоены соответственные числовые индексы i от 1 до 9:

1. Обская губа — Северная оконечность острова Белый;
2. Северная оконечность острова Белый — Меридиан острова Диксон;
3. Меридиан острова Диксон — Меридиан мыса Челюскин;
4. Меридиан мыса Челюскин — Меридиан островов Дунай;
5. Меридиан островов Дунай — Меридиан мыса Кигилях;
6. Меридиан мыса Кигилях — Меридиан устья реки Колыма;
7. Меридиан устья реки Колыма — 180-й меридиан;
8. 180-й меридиан — Восточная граница акватории СМП;
9. Восточная граница акватории СМП — Кромка льда в Беринговом море.

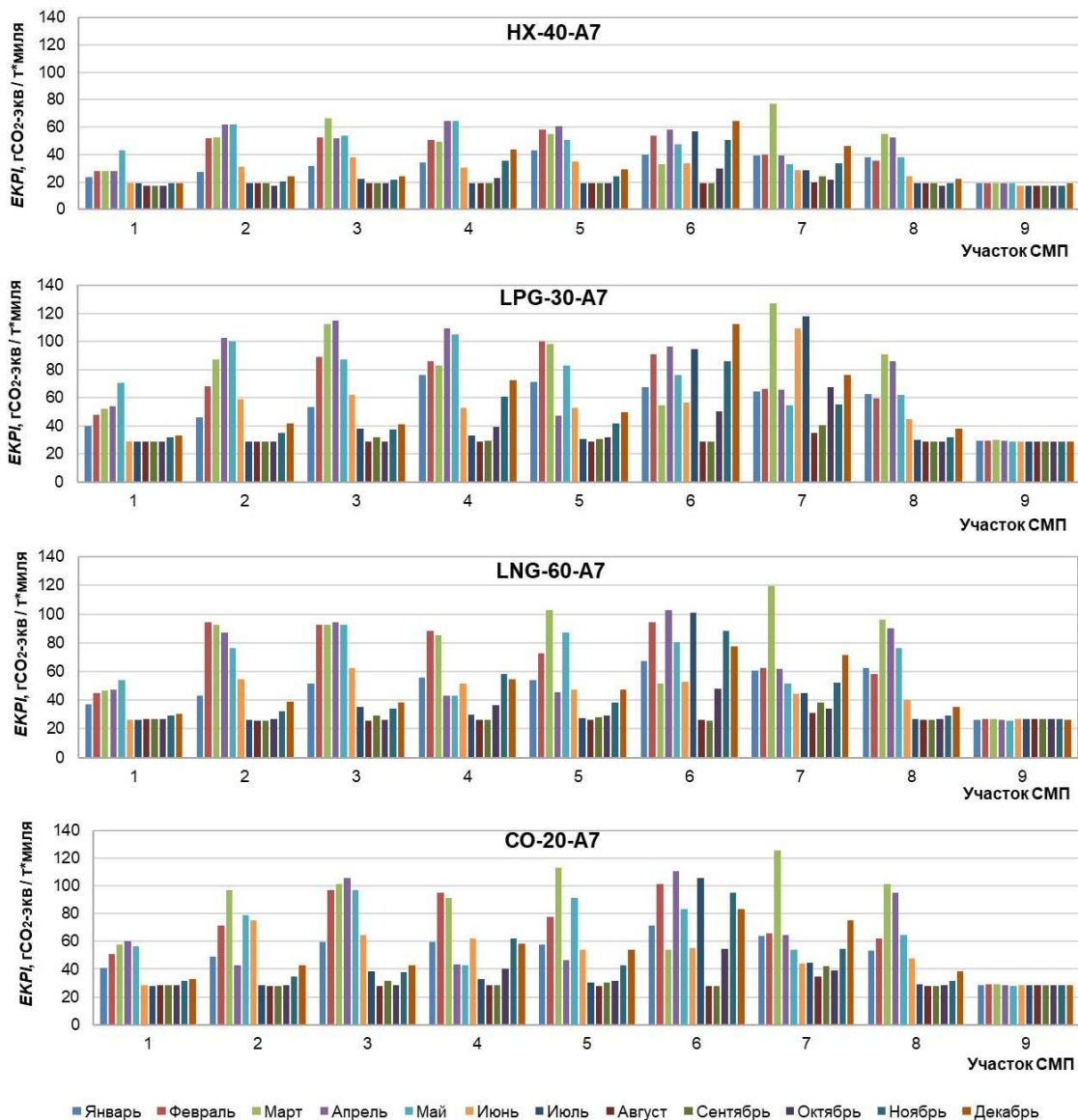


Рис. 2. Значение коэффициента энергоэффективности для расчетных судов при выполнении круглогодичных рейсов по СМП в восточном направлении от Обской губы

Движение во льдах подразумевает частую смену режимов работы пропульсивного комплекса, а также целый ряд тактических мероприятий по преодолению ледовых условий СМП, что однозначно сказывается на потреблении топлива энергетической установкой, а также снижает среднюю скорость движения. Так как обе величины напрямую учитываются в формуле (2), возможно оценить динамику углеродного следа в зависимости от времени года и навигационных условий на маршруте СМП от Обской губы до кромки льда в Беринговом море для расчетных судов (табл. 1). Расчетные значения средних скоростей хода судна во льдах получены из сопоставления результатов оценки гидрометеорологических и ледовых условий на рассматриваемых участках и значений скоростей хода, определенных по требованиям к ледовой ходкости судна и к ледовой прочности его корпуса и соответствующим минимальным из них [7]. В качестве средней скорости хода расчетного транспортного судна во льдах по требованиям к ледовой прочности принята допустимая скорость хода, то есть максимальная скорость хода, с которой судно может двигаться в заданных ледовых условиях, не получая никаких ледовых повреждений.

При плавании судов во льдах коэффициент использования мощности, характеризующий степень утилизации номинального потенциала пропульсивного комплекса судна, принят постоянным и равным 0,85, за исключением случаев, когда скорость хода судна во льдах ограничивается в соответствии с требованиями к ледовой прочности или скоростью хода впереди идущего ледокола. Результаты расчета ЕКРП для расчетных судов при их эксплуатации на традиционных сортах нефтяных топлив, совершающих грузовой переход по СМП от Обской губы в восточном направлении, представлены на рис. 2.

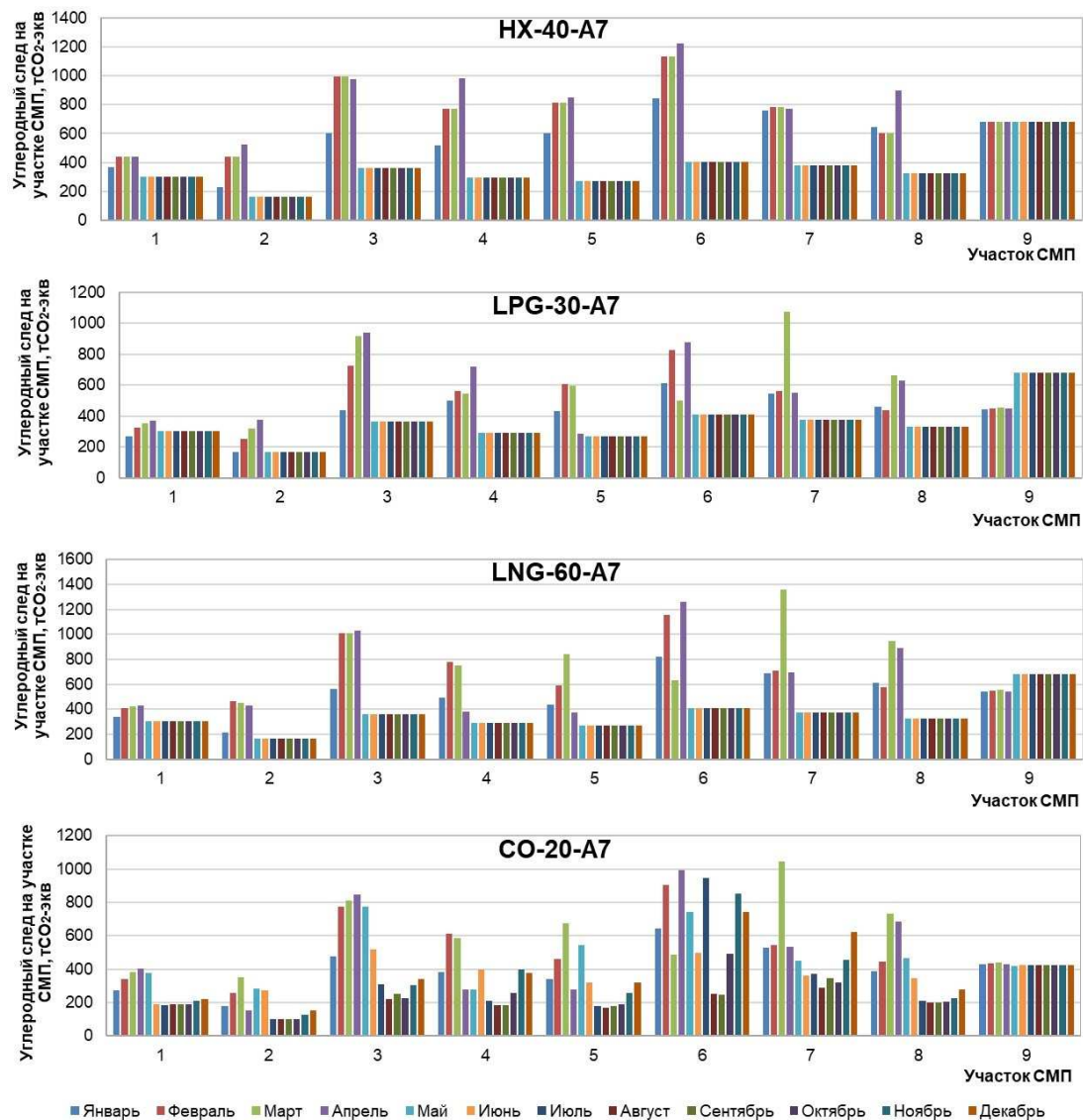


Рис. 3. Углеродный след транспортной услуги для расчетных судов при выполнении круглогодичных рейсов по СМП в восточном направлении от Обской губы

Картина распределения ЕКРІ в течение года для различных судов имеет схожий характер, так как скорости их движения повторяют матрицу внешних гидрометеорологических условий на рассматриваемом участке СМП. Особенно наглядна разница между летне-осенним и зимне-весенним периодами. Пиковые значения ЕКРІ приходятся на зимне-весенний период, а участок № 9 характеризуется практически постоянным значением ЕКРІ для всех расчетных судов, что обусловлено отсутствием на этом участке тяжелых ледовых условий.

По этой же причине аналогичную картину демонстрирует и рис. 3, на котором показан углеродный след, оставляемый расчетными судами.

Суммарный углеродный след при прохождении трассы СМП в восточном направлении от Обской губы показан на рис. 4.

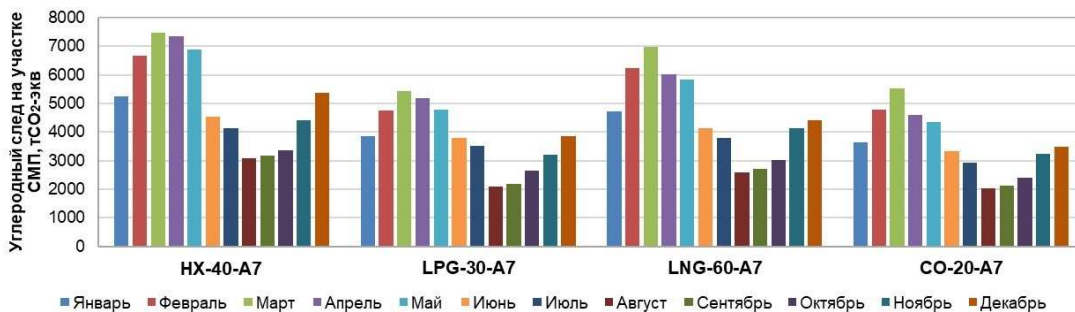


Рис. 4. Углеродный след транспортной услуги для расчетных судов при выполнении круглогодичных рейсов по СМП в восточном направлении от Обской губы

Таким образом, можно заключить, что если речь идет о количественном исчислении углеродного следа, то для принятого в качестве примера судна HX-40-A7 эта величина составляет от 7454 тонн CO₂-экв в марте до 3083 тонн CO₂-экв в августе за один рейс от Обской губы на восток. Как уже упоминалось, наиболее действенным средством снижения выбросов парниковых газов судовыми энергоустановками является использование топлив с пониженным содержанием углерода, оксидов серы, азота и других парниковых газов.

3. СНИЖЕНИЕ УГЛЕРОДНОГО СЛЕДА ТРАНСПОРТНОЙ УСЛУГИ ПУТЕМ ПРИМЕНЕНИЯ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ СУДОВЫХ ТОПЛИВ

Методика, описанная в [2] и [3], предполагает использование коэффициента C_F отображающего количество тонн CO₂-экв. в тонне топлива и определяемого в соответствии с [4] (табл. 2).

Таблица 2

Углеродосодержание и переводной коэффициент C_F для судовых топлив

Тип топлива	Углеродосодержание	C_F (т CO ₂ -экв./т топлива)
MDO / MGO (марки DMX...DMB)*	0,8744	3,206
LFO (марки RMA...RMD)*	0,8594	3,151
HFO (марки RME...RMK)*	0,8493	3,114
Бутан	0,8182	3,000
Пропан	0,8264	3,030
СПГ	0,7500	2,750
Метанол	0,3750	1,375
Этанол	0,5217	1,913

* — по ГОСТ Р 54299-2010^[8].

Для каждого расчетного судна кроме газозова СПГ (LNG-60-A7) возможно применение альтернативного топлива: для химовоза HX-40-A7 это метанол, для газовоза LPG-30-A7 — аммиак, а для универсального сухогрузного судна CO-20-A7 — сжиженный природный газ. В случае химовоза и газовоза метанол и аммиак являются грузами этих судов по умолчанию. В случае универсального сухогрузного судна СПГ хранится в криогенной емкости на палубе (рис. 5).

Рассчитаем углеродный след, образующийся в результате использования альтернативных видов топлива, и сравним результаты с предыдущим расчетом (рис. 6).

Оценка результатов расчета показывает, что при использовании в качестве топлива метанола величина углеродного следа, оставляемого танкером-химовозом НХ-40-А7, снизилась на 56,9 %, использование пропана в качестве топлива на газовозе LPG-30-А7 позволяет уменьшить углеродный след на 6,42 %, аммиака — на 96 %, использование СПГ в качестве топлива на универсальном сухогрузном судне СО-20-А7 позволило снизить углеродный след на 14 %.



Рис. 5. Размещение СПГ-емкостей на палубе контейнеровоза Isla Bella [9]

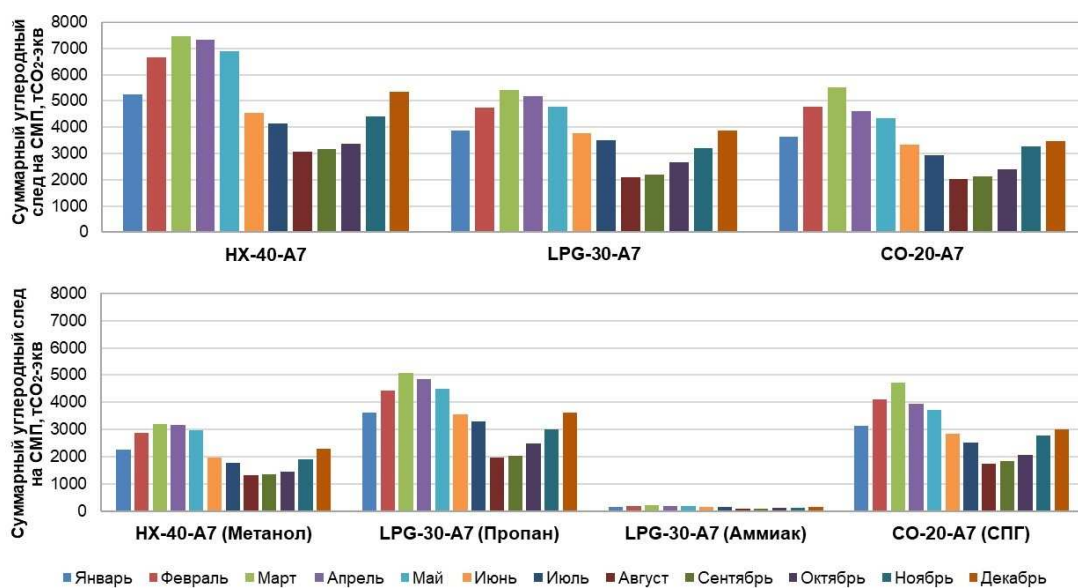


Рис. 6. Углеродный след транспортной услуги с применением альтернативных топлив

ВЫВОДЫ

Использование представленной методики оценки углеродного следа позволило количественно оценить влияние типа используемого судового топлива на углеродный след транспортной услуги, определяемый через коэффициент энергетической эффективности транспортного судна.

Представленные в исследовании расчеты позволяют сделать несколько важных выводов: использование альтернативных топлив позволяет значительно снизить количество выбрасываемых в атмосферу парниковых газов; наилучшие результаты продемонстрировали метанол и аммиак — снижение количества выбрасываемого CO₂-экв. составило 57 % и 96 % соответственно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Приложение VI Международной конвенции по предотвращению загрязнения с судов 1973 года, измененная Протоколом 1978 года к ней (МАРПОЛ 73/78). ИМО, актуальная версия.
2. Буянов А.С. Формирование методологического подхода к процессу определения углеродного следа транспортной услуги с использованием коэффициентов энергоэффективности судна / А.С. Буянов, А.С. Реуцкий // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2023. — № 70/71. — С. 13 — 28.
3. Буянов А.С. Коэффициент энергоэффективности как инструмент определения углеродного следа от работы морских судов ледовых классов / А.С. Буянов, В.В. Якимов, А.С. Реуцкий // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2023. — № 72/73. — С. 21 — 31.
4. 2020 Industry Guidelines for calculation and verification of the Energy Efficiency Design Index (EEDI) (IACS PR38 Rev.3).
5. Таровик О.В. Методика определения масс конструкций ледовых усилений транспортных судов на ранних стадиях проектирования: дис. ... канд. техн. наук / О.В. Таровик. — СПб., 2015.
6. Косоротов А.В. Метод оценки буксировочного сопротивления современных ледоколов и судов ледового плавания на чистой воде / А.В. Косоротов // Труды Крыловского государственного научного центра. — 2020. — № 1(391). — С. 29 — 41.
7. Апполонов Е.М. Ледовая прочность судов, предназначенных для круглогодичной арктической навигации / Е.М. Апполонов. — СПб.: Изд-во СПбГМТУ, 2016. — 288 с.
8. ГОСТ Р 54299-2010 (ИСО 8217:2010) Топлива судовые. Технические условия.
9. Breskin I. Business of shipping: The LNG bunkering era is here. [Электронный ресурс] URL: <https://gcaptain.com/business-of-shipping-the-lng-bunkering-era-is-here/>

REFERENCES

1. Annex VI to the International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, 1973 as modified by the Protocol of 1978 (MARPOL 73/78). IMO current version.
2. Buyanov A.S., Reutsky A.S. Formation of a methodology for determining the carbon footprint of a transport service using ship energy efficiency coefficients. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2023 (70/71): 13 — 28.
3. Buyanov A.S., Yakimov V.V., Reutsky A.S. Energy efficiency coefficient as a tool for determining the carbon footprint from the operation of sea-going ships of ice classes. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2023 (72/73): 21 — 31.
4. 2020 Industry Guidelines for calculation and verification of the Energy Efficiency Design Index (EEDI) (IACS PR38 Rev.3).
5. Tarovik O.V. Metodika opredeleniya mass konstruktssii ledovykh usilenii transportnykh sudov na rannikh stadiyakh proektirovaniya: dis. ... kand. tekhn. nauk [Methodology for determining the masses of ice reinforcement structures for transport vessels at early stages of design]. St. Petersburg, 2015. (In Russ.)
6. Kosorotov A.V. Towing resistance assessment method for modern icebreakers and ice-going vessels in open water]. *Transactions of the Krylov State Research Centre*. 2020. № 1(391): 29 — 41. (In Russ.)
7. Appolonov E.M. Ledovaya prochnost' sudov, prednaznachennykh dlya kruglogodichnoi arkticheskoi navigatsii [Ice strength of vessels designed for year-round Arctic navigation]. St. Petersburg: SPbGMTU, 2016. (In Russ.)
8. GOST P 54299-2010 (ISO 8217:2010) Marine fuels. Specifications. (In Russ.)
9. Breskin I. Business of shipping: The LNG bunkering era is here. URL: <https://gcaptain.com/business-of-shipping-the-lng-bunkering-era-is-here/>