

УДК 629.561.11+62-838
EDN EDXJCU

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТЕПЕНИ РЕАЛИЗУЕМОСТИ КЛИМАТИЧЕСКОГО ПРОЕКТА ЗАМЕНЫ ФЛОТА ПОРТОВЫХ БУКСИРОВ-КАНТОВЩИКОВ НА СУДА С ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКОЙ, ОБОРУДОВАННОЙ АККУМУЛЯТОРНЫМИ НАКОПИТЕЛЯМИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

А.С. Реуцкий, канд. техн. наук, Российский морской регистр судоходства, 191186 Россия, Санкт-Петербург, Миллионная ул., 7А, e-mail: reutskii.as@rs-class.org

Исследование зарубежной нормативной базы показывает, что надежным способом снизить до нуля выбросы парниковых газов буксирными судами является использование судов с полностью электрической энергетической установкой, состоящей из аккумуляторных батарей. Целью нашего исследования является определение реализуемости климатического проекта соответствующей замены флота портовых буксиров-кантовщиков, возможности регистрации планируемых действий в качестве климатического проекта и экономической целесообразности подобного проекта в России и в ЕС. В статье оценена применимость этого проекта и показаны условия, при которых появляется возможность получения позитивного эффекта, когда затраты на внедрение мероприятий могут частично компенсироваться за счет реализации углеродных единиц. Показано, что с технической точки зрения климатический проект перевода буксирного судна на аккумуляторную энергетическую установку является осуществимым, так как в настоящий момент находятся в свободном доступе сами комплектующие для переоборудования (аккумуляторные батареи с необходимыми характеристиками, аварийные дизель-генераторы и т.д.), а также существуют аналогичные образцы морской техники. Важным аспектом и главным минусом исследуемого климатического проекта в нашей стране является то, что для его регистрации необходимо доказать, что предпринимаемые действия сократят углеродный след компании на необходимую величину (т.е. на 50 000 т CO₂-экв./год), что потенциально может выполнить буксирная компания, тратящая примерно 16 тыс. т нефтяного топлива в год и / или владеющая флотом буксиров суммарной мощностью 38 МВт.

Результаты расчетов экономической целесообразности исследуемого климатического проекта применительно к ЕС и Российской Федерации демонстрируют, что, несмотря на благоприятный «климат» для создания и реализации климатических проектов в ЕС, значительная цена на электроэнергию практически полностью нивелирует выгоду от отсутствия необходимости платить значительные налоги на выбросы серы и продажи относительно дорогих углеродных единиц. Применительно к ЕС ожидаемое снижение эксплуатационных расходов составляет незначительную величину, сравнимую с погрешностью самого расчета, в остальных случаях расчет показал значительное удорожание эксплуатационных расходов (до 46 %). Несмотря на относительно низкую стоимость углеродной единицы в Российской Федерации, здесь в ряде случаев снижение эксплуатационных расходов превысило 20 %, что может объясняться низкой ценой на электроэнергию.

Ключевые слова: климатический проект, энергетическая установка, транспортная эффективность судна, альтернативные топлива, углеродная единица, аккумуляторная батарея, аварийный дизель-генератор, электрический буксир, буксир-кантовщик.

Для цитирования: Реуцкий А.С. Определение степени реализуемости климатического проекта замены флота портовых буксиров-кантовщиков на суда с электрической энергетической установкой, оборудованной аккумуляторными накопителями электроэнергии / А.С. Реуцкий. Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2026. — Т. 56, № 1. — С. 77–90. — EDN EDXJCU.

DETERMINATION OF THE FEASIBILITY OF A CLIMATE PROJECT FOR THE TRANSFER OF PORT TUGBOATS TO A FULLY ELECTRIC POWER PLANT EQUIPPED WITH ACCUMULATORS OF ELECTRIC POWER

A.S. Reutskii, PhD, Russian Maritime Register of Shipping, 191186 Russia, St. Petersburg, Millionnaya ul., 7A, e-mail: reutskii.as@rs-class.org

A study of the foreign regulatory framework has shown that a reliable way to reduce greenhouse gas emissions to zero by tugboats is to use vessels with a fully electric power plant consisting of rechargeable batteries. For this reason, the purpose of the study is to determine the feasibility of creating a climate project for the transfer of port tugboats to a fully electric power plant consisting of rechargeable batteries; the possibility of registering planned actions as a climate project; the economic feasibility of such a project in Russia and in the EU.

The article evaluates the applicability of this project and shows the conditions under which it becomes possible to obtain a positive effect, when the costs of implementing measures can be partially offset by the implementation of carbon units. The article shows that from a technical point of view, the climatic project of transferring a tugboat to a battery power plant is feasible, since at the moment the components themselves for conversion (batteries with the necessary characteristics, emergency diesel generators, etc.) are freely available, as well as similar samples of marine equipment. An important aspect and the main disadvantage of the climate project under study in our country is that for its registration it is

necessary to prove that the actions taken will reduce the company's carbon footprint by the required amount (i.e. by 50,000 tons of CO₂-eq/year), which can potentially be performed by a towing company spending about 16 thousand tons of petroleum fuel per year and/or owning a fleet of tugboats with a total capacity of 38 MW.

The results of calculations of the economic feasibility of the studied climate project in relation to the EU and the Russian Federation demonstrate that despite the favorable "climate" for the creation and implementation of climate projects in the EU, the significant price of electricity almost completely negates the benefits of not having to pay significant taxes on sulfur emissions and sales of relatively expensive carbon units. In relation to the EU, the expected reduction in operating costs is an insignificant amount, comparable to the error of the calculation itself, in other cases, the calculation showed a significant increase in the cost of operating costs (up to 46 %). Despite the relatively low cost of a carbon unit in the Russian Federation, in some cases the reduction in operating costs exceeded 20 %, which may be explained by the low price of electricity.

Key words: *climate project, power plant, ship transport efficiency, alternative fuels, carbon unit, battery, emergency diesel generator, electric tugboat, tugboat.*

For citation: Reutskii A.S. Determination of the feasibility of a climate project for the transfer of port tugboats to a fully electric power plant equipped with accumulators of electric power. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2025. Vol. 56, No. 1. P. 77–90. EDN EDXJCU. (In Russ.)

ВВЕДЕНИЕ

Одним из способов побуждения участников экономики к сокращению выбросов парниковых газов (далее — ПГ) внутри любой страны является повышение экономической привлекательности обычно дорогостоящих «зеленых» решений. Обычно это делается не путем прямого финансирования, а путем предоставления квот и одновременного создания нормативной базы [1], предусматривающей создание климатических проектов (далее — КП) и получение углеродных единиц, которые затем можно учитывать при оценке сокращения выбросов ПГ и зачислять на счет своей или какой-либо другой организации. Ожидается, что разработка КП заинтересует организации, которые ставят цели по сокращению своего углеродного следа в рамках добровольной сертификации или планируют заниматься продажей углеродных единиц.

Согласно своему определению, КП содержит действия, направленные на уменьшение (предотвращение) выбросов ПГ и/или увеличение их поглощения, на уровне государства или компании. Высокая степень актуальности КП в России продемонстрирована в исследованиях [2, 3], где представлены российские КП, прошедшие валидацию и зарегистрированные в реестре углеродных единиц. Большая часть КП (67 % от всех выпускаемых углеродных единиц) касаются модернизации цепочек поставок или модернизации оборудования в рамках технологического цикла компании, то есть являются технологическими, но есть и природные КП, направленные на восполнение утраченного в результате антропогенной деятельности баланса экосистем, а также восстановление утраченных экосистем (лесопосадки, осушение заболоченных участков в результате очистки русел рек и т.д.). Несмотря на озвучиваемое в настоящее время мнение [3], что для Российской Федерации реализация природных КП имеет наибольшие перспективы в части уменьшения последствий воздействия антропогенного влияния из-за естественных природно-климатических факторов, должны реализовываться и технологические КП на различных видах транспорта, поскольку это является не в последнюю очередь стимулирующей мерой для развития промышленности, техники и технологий [4].

Необходимость удовлетворять международным требованиям [5] по выбросам заставляет судовладельцев вносить существенные изменения в проекты строящихся судов и проводить модернизацию существующих судов различными способами. Таким образом, введение понятия климатического проекта в российскую нормативную базу может быть интересно отечественным судовладельцам отчасти по уже обозначенным выше причинам, а также и потому, что это дает возможность получения позитивного эффекта, когда затраты на внедрение мероприятий могут частично компенсироваться за счет реализации углеродных единиц [6].

ОПРЕДЕЛЕНИЕ АКТУАЛЬНОСТИ КЛИМАТИЧЕСКОГО ПРОЕКТА

Тема сокращения выбросов ПГ различными видами транспорта является в настоящий момент весьма животрепещущей, несмотря на то, что на долю судоходства приходится всего около 3 % всех мировых выбросов ПГ. Источниками выбросов ПГ на морских и речных судах являются двигатели внутреннего сгорания (двигатели главной энергетической установки, приводные дизель-генераторы, аварийные генераторы), инсинераторы (мусоросжигатели), а также котлы для выработки водяного пара, используемого для привода механизмов, обогрева помещений и/или груза. В соответствии с проведенным авторами [2] анализом, практически любое действие с транспортным судном, напрямую или косвенно приводящее к уменьшению выбросов ПГ или к повышению эффективности транспортной работы при сохранении или уменьшении уровня выбросов ПГ в атмосферу, может быть квалифицировано как климатический проект, но не каждый климатический проект выгоден для судовладельца.

В настоящее время большое количество исследований [7, 8] указывает на то, что снижение количества выбрасываемых в атмосферу ПГ служит в первую очередь улучшению качества жизни, особенно в городских густонаселенных районах с высокой концентрацией грузопотоков. Крупные города зачастую находятся в прибрежной зоне, ведь на приморские районы приходится около 40 % населения мира с плотностью, превышающей средний мировой показатель в 2,5 раза [9]. Проблема загазованности в крупных городах давно решается при помощи перевода общественного транспорта на альтернативные источники энергии, и морской транспорт не является исключением [10–12].

Работающие в порту суда, будь то транспортные или суда портового флота, выбрасывают в атмосферу ПГ, источником которых является их работающая энергетическая установка. Что касается транспортных судов, то работа их стояночного дизель-генератора в акватории порта также наносит вред окружающей среде из-за выбросов в атмосферу и шумового загрязнения акватории, и уже сейчас некоторые зарубежные портовые администрации прилагают значительные усилия к созданию инфраструктуры для обеспечения судов электроэнергией с берега [13], чтобы исключить потребность в работающем стояночном генераторе.

Для транспортного судна стоянка в порту в ожидании грузовых операций или во время грузовых операций является скорее вынужденной мерой, и усилия всех мировых логистических компаний направлены на минимизацию этого времени. Однако есть категория судов, которые работают в портовых условиях постоянно, обладают высокой удельной энерговооруженностью и мощностью и обеспечивают производительность порта путем выполнения буксирных и эскортных операций, — буксирные суда.

Зарубежный опыт борьбы с выбросами ПГ в атмосферу с буксирных судов включает использование СПГ [14, 15] (рис. 1а), спиртовых топлив [16] (рис. 1б), аммиака [17] (рис. 1в) и электроэнергии [18] (рис. 1г). В зависимости от даты реализации проекта и действующей на тот момент нормативной базы, степень сокращения выбросов ПГ варьируется от 40 % для буксира на СПГ [19] до практически 100 % у аммиачных и электрических буксиров.

Таким образом, один из надежных способов снизить выбросы ПГ буксирными судами до нуля — использовать суда с полностью электрической энергетической установкой. Схема эксплуатации буксиров, и в особенности портовых буксиров-кантовщиков, предполагает их работу на коротком плече, чередование относительно краткосрочных периодов интенсивной работы и длительных простоев, в ходе которых можно заряжать батарею или производить ее замену на заряженную. Таким образом, из всех типов судов использование чисто электрической энергетической установки больше всего подходит для буксиров-кантовщиков, что подтверждается исследованием [20], поэтому реализация такого КП выглядит весьма актуальной.

При выборе способа соответствовать ужесточаемым международным климатическим нормам для морского судна или для снижения выбросов судна, функционирующего на внутренних водных путях или в территориальных водах Российской Федерации, необходимо ориентироваться на возможность регистрации принимаемых мер в качестве КП. В решении этой задачи может помочь определенный набор критериев, сформулированный авторами в статье [21] и раскрывающий сущностную часть климатического проекта, а также позволяющий оценить его применимость на водном транспорте. Разработка КП актуальна для организаций, чья деятельность сопряжена с выбросами ПГ в количестве > 50 000 т CO₂-экв. в год (ст. 7 закона № 296-ФЗ [22]).

Помимо этого, введение критериев оценки осуществимости КП должно быть основано на:

- реализуемости проекта в данное время;
- возможности регистрации планируемых действий в качестве КП;
- экономической целесообразности проекта.

РЕАЛИЗУЕМОСТЬ КЛИМАТИЧЕСКОГО ПРОЕКТА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО БУКСИРНОГО ФЛОТА КОМПАНИИ

В соответствии с [21] критерий реализуемости показывает, насколько велики трудности (организационные, юридические и т.п.) реализации рассматриваемого проекта. Его компонентами являются: степень подготовленности технологий, обеспеченность материально-техническими ресурсами, условия инвестирования, наличие производственных мощностей, подготовленность проектно-сметной документации и т.д.

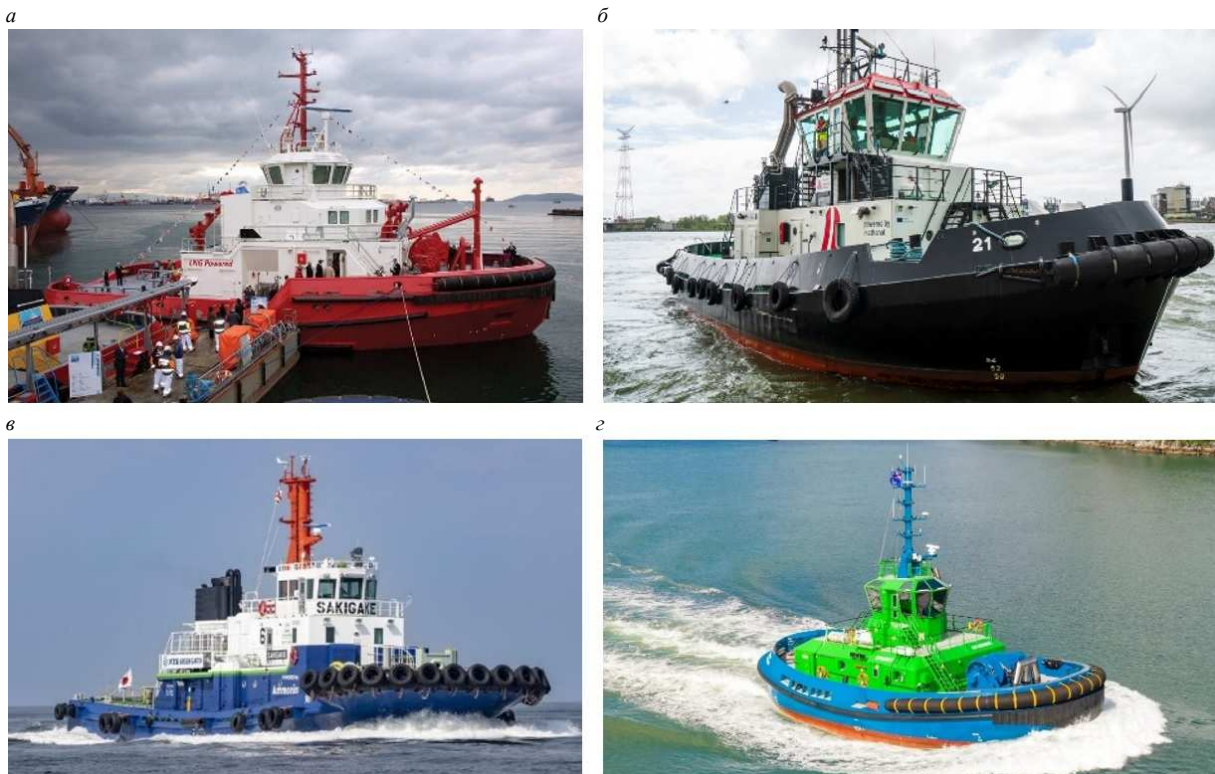


Рис. 1. Буксиры Borgøy на СПГ (а), Methatug на метаноле (б), Sakigake на аммиаке (в), Sparky — электроход (г)

Во многих зарубежных статьях рассматривается возможность создания электрических судов [23–25], а в нашей стране на класс Российского морского регистра судоходства строится пассажирский электроход «Байкал» проекта ТФРП700 [26], характеристики которого представлены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики пассажирского электрохода «Байкал»

Назначение	<ul style="list-style-type: none"> ● перевозка пассажиров, ● плавучий отель в межнавигационный период
Класс	Российский морской регистр судоходства
Длина наиб., L_{oa} , м	69,8
Ширина наиб., B , м	15,5
Осадка, d , м	2,5
Водоизмещение масс., Δ , т	1903
Скорость, v_s , уз	10,8
Автономность, сут	7
Мощность гребных электродвигателей, кВт	3×400 кВт
Экипаж + персонал, чел	10 + 31
Пассажировместимость, чел	152

Дальше всех в создании электрических портовых буксиров продвинулась компания Damen, построившая в 2023 г. судно Sparky проекта Stern Drive Tug 2513 Electric (рис. 1, 2), характеристики которого представлены в табл. 2. Батареи судна расположены под верхней палубой (рис. 2) и подзаряжаются от берега, однако в случае необходимости для выработки электричества на борту судна могут быть использованы вспомогательные дизель-генераторы, которые смогут обеспечить питанием электроэнергией гребные электродвигатели и все судовые потребители, в том числе насосы пожарного оборудования скоростью до 2400 м³/ч. Для удовлетворения нормам IMO Tier III дизель-генераторы оборудованы системой снижения содержания опасных оксидов азота в отработавших газах Damen SCR System. Автономность судна на электробатареях составляет около 12 часов.

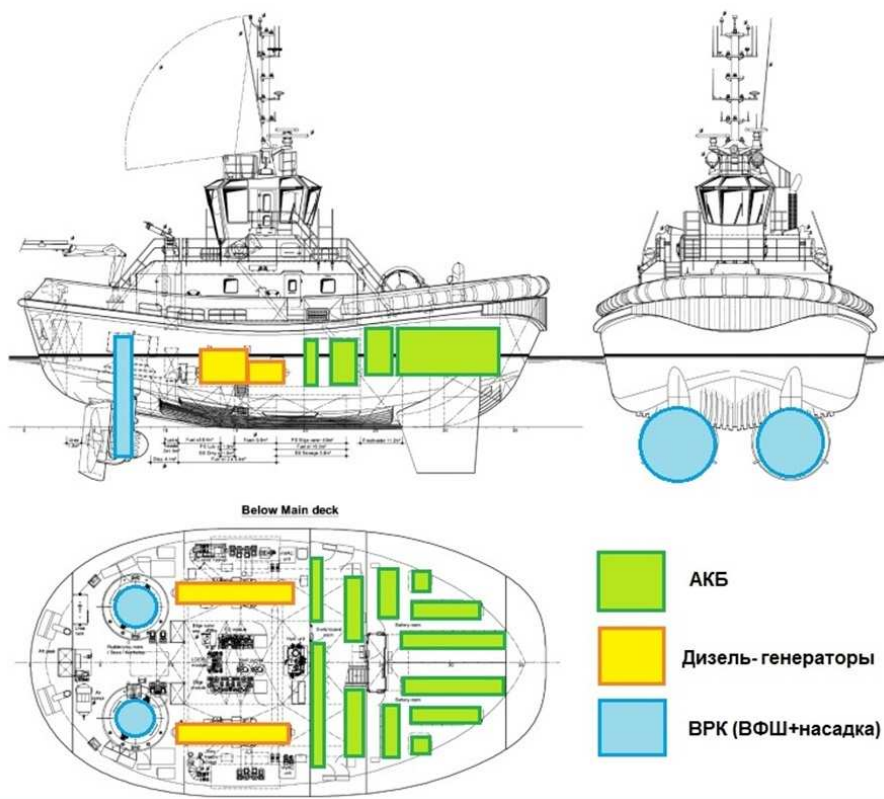


Рис. 2. Общее расположение буксира Sparky от компании Damen

Таблица 2

Характеристики буксира Sparky

Назначение	<ul style="list-style-type: none"> • буксирование самоходных и несамоходных судов, • несение аварийно-спасательного дежурства, • борьба с пожаром
Класс Длина наиб., <i>Loa</i> , м Ширина наиб., <i>B</i> , м Осадка, <i>d</i> , м Высота борта, <i>H</i> , м Водоизмещение масс., Δ , т Тяга на пер. ходу, <i>BP</i> , тс Скорость, <i>v_s</i> , уз Гребные электродвигатели Мощность гребных электродвигателей, кВт Винторулевые колонки Емкость батарей, кВт·ч Диаметр гребного винта, мм Вспомогательные дизель-генераторы Экипаж, чел.	Bureau Veritas 24,73 13,13 4,95 6,5 607 70 12 2 × Ramme TW 1400 2 × 1850 кВт при 500 об/мин 2 × Kongsberg Maritime US 255 L-Dive 2782 3000 2 × Caterpillar C32TA, 1175 кВА, 690 В, 60 Гц 6

На судах, оборудованных электрической или гибридной силовой установкой, система аккумуляторных батарей имеет первостепенное значение, поскольку служит основным источником питания для всех электрических и электронных систем, а также источником энергии для движения судна.

Традиционно основными недостатками аккумуляторных батарей как источника энергии на судне считались их большие габариты, значительный вес, низкая энергоемкость и высокая цена. Однако уже сейчас, с развитием беспилотных технологий, габариты и вес современных аккумуляторных батарей уменьшаются, а энергоемкость растет. Наилучшими показателями здесь обладают аккумуляторы с литий-ионными и литий-полимерными ячейками. В статьях [27, 28] авторами были рассмотрены существующие в настоящий момент принципиальные решения по электрическим батареям в морском исполнении (табл. 3, рис. 3).

Таблица 3

Характеристики АКБ в морском исполнении различных систем

Параметр АКБ	НПК МСА ¹	BR ²	AT ³	SWE ⁴	AT ⁵	FB ⁶	SPS ⁷
Тип ячейки	Lithium-ion	Lithium-polymer	Nickel-metal hydride	Lithium-ion	Lead-acid	Lead-carbon technology	Lithium-titanate
Длина, мм	386	384	500	1910	457	508	580
Ширина, мм	635	133	400	1890	305	303	320
Высота, мм	213	210	450	650	327	172	380
Площадь, мм ²	0,245	0,051	0,2	3,61	0,139	0,154	0,186
Объем, м ³	0,05	0,011	0,09	2,346	0,046	0,026	0,071
Масса (сух), кг	68	14,3	46	75	49	75	90
Энергоемкость, кВт·ч	8,3	1,5	0,95	3,2	–	2	3,5
Плотность энергии, т/МВт·ч	8,2	9,5	48,4	23,4	–	37,5	25,7
Использ. площадь, м ² /МВт·ч	29,53	34	211	1 128	–	77	53

¹НПК Морсвязьавтоматика — UniPower модули LTO (Россия);

²Bluefin's Robotics (США);

³Ashtead Technology — CDL Subsea Battery Pack (Сингапур, ОАЭ, Великобритания, США);

⁴Southwest Electronic Energy Group (США);

⁵Ashtead Technology — Deepsea Power & Light (Сингапур, ОАЭ, Великобритания, США);

⁶Furukawa Battery (Япония);

⁷Spear power systems — PBES Lithium Industrial Batteries (США).

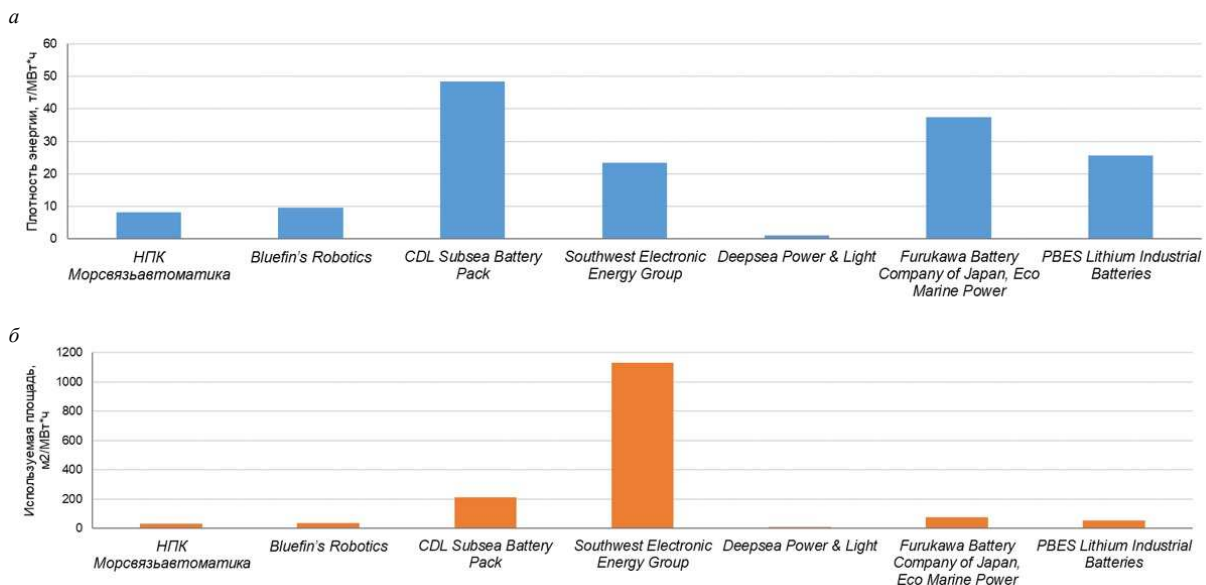


Рис. 3. Характеристики АКБ в морском исполнении от различных производителей:

a — плотность энергии; *б* — используемая площадь

Из табл. 3 становится ясно, что масса аккумуляторной системы в морском исполнении энергоемкостью около 3 МВт·ч в зависимости от технологии изготовления может составить от 20 до 145 т. В статье [2] авторы привели формулу расчета потребного количества аккумуляторных батарей:

$$n = \frac{P \cdot t}{V \cdot k \cdot Q_{\text{ном}}} = 24 \text{ ед.}, \quad (1)$$

где $P = 2784$ кВт — нагрузка двух электродвигателей буксира Sparky [30];
 $V = 5994$ В — напряжение накопителей энергии типа НЭ-650-160 [31];
 $t = 12$ ч — приемлемая автономность портового буксира-кантовщика, с энергоустановкой, оборудованной аккумуляторными батареями;
 $Q_{\text{ном}} = 0,16$ кА·ч — номинальная емкость батарей;
 $k = 1,428$ — коэффициент использования емкости аккумуляторов.

Таким образом, если масса одного НЭ-650-160 составляет 1,16 т [31], то суммарная масса батарей составит около 28 т. Такая величина вполне соотносится с суммарной массой заменяемых при переоборудовании позиций нагрузки масс аналогичного буксира с тягой на гаке 60 тс [32], а значит, с технической точки зрения климатический проект перевода буксирного судна на аккумуляторную энергетическую установку является осуществимым, в настоящий момент находятся в свободном доступе комплектующие, а также существуют аналогичные образцы морской техники.

ВОЗМОЖНОСТЬ РЕГИСТРАЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ БУКСИРОВ В КАЧЕСТВЕ КП

Главным формальным критерием возможности регистрации климатического проекта, заключающегося в использовании буксиров с гибридной энергетической установкой, оборудованной аккумуляторными батареями, является количество ПГ, выбрасываемых заменяемыми традиционными буксирами. Вопрос сводится к тому, сколько ископаемого топлива за отчетный период нужно потратить компании, чтобы достичь цифры в 50 000 т CO₂-экв./год. В Приложении 2 Резолюции Подкомитета КЗМС ИМО [33] представлена величина углеродоемкости каждого вида морского топлива, имеющая размерность «г CO₂-экв./г топлива». На рис. 4 показано количество различных типов судового топлива [34], которое необходимо израсходовать, чтобы достичь искомой величины. Исходя из представленной информации, масса потраченного нефтяного топлива лежит в диапазоне от 15 500 до 16 500 т. Не каждая буксирная компания тратит в год сколько топлива, определенный интерес представляет определение минимального порога удовлетворения компании требованиям к новому КП. Здесь эту величину удобно выразить через суммарную мощность ГД всех буксиров компании, работающих на традиционном нефтяном топливе:

$$\sum_{i=1}^n N_{\text{ГД}} = \frac{P_{\text{топл}}}{K_{\text{ИМ}} \cdot C_{\text{уд}} \cdot A \cdot 10^{-6}}, \text{ кВт}, \quad (2)$$

где $P_{\text{топл}}$ — количество израсходованного нефтяного топлива (рис. 4), т;
 $K_{\text{ИМ}}$ — коэффициент использования мощности буксира, то есть среднее значение в % от $Ne_{\text{ном}}$ всех ГД;
 $C_{\text{уд}}$ — удельный расход топлива, г/кВт·ч;
 A — бюджет рабочего времени буксира, час/год.

В исследовании [35] авторы провели натурные испытания на буксирах, оборудованных высокооборотными двигателями производства фирмы Caterpillar модели CAT 3500В номинальной мощностью до 1230 кВт и номинальной частотой вращения до 1850 мин⁻¹. В результате анализа данных, накопленных за 10 лет работы этих двигателей, авторы выяснили, что значительную часть эксплуатационного времени они работали в диапазоне нагрузок до 50 % от номинальной мощности, причем для работы на нагрузках до 10–15 % $Ne_{\text{ном}}$ приходилось до 80 % эксплуатационного времени судна. Поэтому примем значение $K_{\text{ИМ}}$ равным среднему медианному, равному 25 % $Ne_{\text{ном}}$. Удельный расход топлива примем равным 220 г/кВт·ч [35]. Бюджет рабочего времени буксира A , час/год, может быть определен по СП [36] и равен произведению 625 час/мес на 12 месяцев = 7500 час/год.

$$\sum_{i=1}^n N_{\text{ГД}} = \frac{15868}{0,25 \cdot 220 \cdot 7500 \cdot 10^{-6}} \approx 38,5 \text{ МВт.}$$

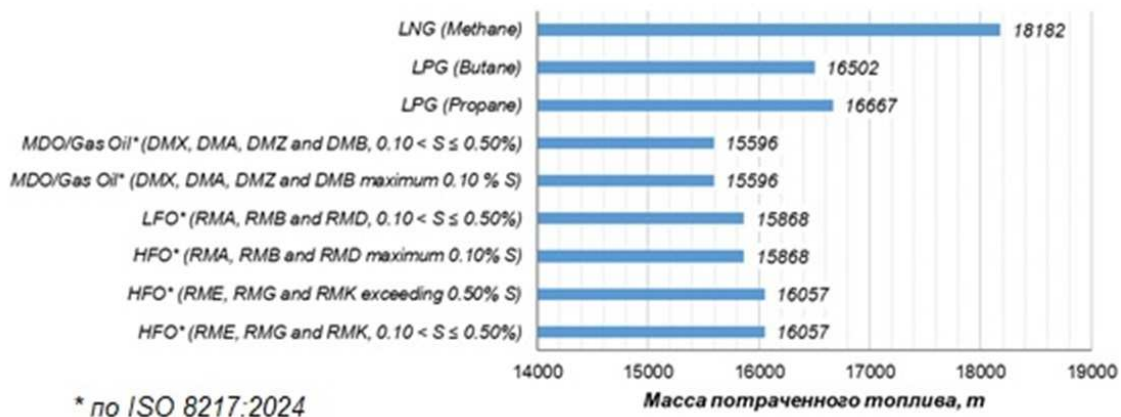


Рис. 4. Количество потраченного судового топлива [34], достигнув которого можно зарегистрировать КП (50 000 т CO₂-экв./год)

Таким образом, если масса потраченного компанией нефтяного топлива лежит в диапазоне от 15 500 до 16 500 т и/или суммарная мощность всех буксиров компании превышает величину $\sum N_{ГД} \approx 38$ МВт, то КП может представлять собой результат обновления флота буксиров компании путем модернизации буксиров, использующих жидкое нефтяное топливо, или постройки новых судов, оборудованных аккумуляторной энергетической установкой. Модернизация судов представляет собой комплекс мероприятий, направленных на замену пропульсивной системы, состоящей из высокооборотных дизельных двигателей с прямой передачей на винторулевую колонку на гибридную силовую установку, состоящую из аккумуляторных батарей, систем их управления, гребных электродвигателей и аварийных дизель-генераторов, обеспечивающих питание в случае разряда батарей или их выхода из строя. Прототипом может послужить буксир Sparky (табл. 1).

Важным аспектом и главным минусом этого КП в Российской Федерации является то, что для его регистрации необходимо доказать, что предпринимаемые действия сократят углеродный след компании на необходимую величину (т.е. на 50 000 т CO₂-экв./год), что потенциально может выполнить буксирная компания, тратящая примерно 16 000 т нефтяного топлива в год и/или владеющая флотом буксиров суммарной мощностью 38 МВт, что эквивалентно примерно 14 буксирам-кантовщикам мощностью 2782 кВт каждый.

ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТЬ КЛИМАТИЧЕСКОГО ПРОЕКТА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО БУКСИРНОГО ФЛОТА КОМПАНИИ

Экономическую целесообразность можно оценить через полученное снижение эксплуатационных расходов флота буксирных судов за отчетный период. Выполним оценку ожидаемого снижения эксплуатационных расходов буксирного флота применительно к условиям ЕС и Российской Федерации по формуле:

$$Profit = OPEX_{new} - PEX_{old}, \% \quad (3)$$

где $OPEX_{new}$ — годовые эксплуатационные расходы обновленного флота буксиров;
 $OPEX_{old}$ — эксплуатационные расходы флота буксиров до обновления.

В обоих случаях эксплуатационные расходы складываются из затрат на топливо C_{fuel} , содержание экипажа C_{crew} и прочих затрат C_{other} , включающих расходы на ремонт, различные сборы и классификационные услуги. Тогда годовые эксплуатационные расходы флота буксиров до обновления:

$$OPEX_{old} = (C_{fuel} + C_{crew} + C_{other}) \cdot n, \quad (4)$$

где n — количество буксиров.

Представим результаты расчетов в табличном виде. Результаты расчетов применительно к ЕС представлены в табл. 4, применительно к РФ — в табл. 5.

Таблица 4
Расчет изменения эксплуатационных расходов флота буксирных судов в результате создания КП применительно к ЕС

Тип судового топлива	Содержание серы, т серы/т топл.	Углеродоемкость топлива, т CO ₂ /т топл.	Потраченное топливо**, т/год	Кол-во буксиров в КП	Цена топлива, €	Затраты 1 буксира на топливо, €	Налог на выбросы серы, € /год	OPEX старого флота, €	Стоимость электроэнергии 1 буксира, €	OPEX нового флота (с учетом КП), €	Ожидаемое снижение экспл. расх., % OPEX
HFO* (RME, RMG, RMK, 0,1<S≤0,5 %)	0,005	3,11	16 057	14	435	49 9206	625 260	24 142 524	1 458 124	24 688 474	+2
HFO* (RME, RMG, RMK, 0,5 % S)	0,005	3,11	16 057	14	440	50 4944	625 260	24 222 856	1 458 124	24 688 474	+2
HFO* (RMA, RMB, RMD max. 0,1 % S)	0,001	3,15	15 868	14	440	50 4944	123 580	17 199 336	1 458 124	25 190 154	+46
LFO* (RMA, RMB, RMD, 0,1<S≤0,5 %)	0,005	3,15	15 868	14	606	69 5446	617 900	26 786 844	1 458 124	24 695 834	-8
MDO/Gas Oil* (DMX, DMA, DMZ, DMB 0,1 % S)	0,001	3,21	15 596	14	622	71 3807	121 462	20 093 766	1 458 124	25 192 272	+25
MDO/Gas Oil* (DMX, DMA, DMZ, DMB, 0,1<S≤0,5 %)	0,005	3,21	15 596	14	606	69 5446	607 308	26 638 556	1 458 124	24 706 426	-7
LNG (Methane)	0	2,75	18 182	16	835	95 8246	0	24 931 936	1 458 124	29 429 981	+18

* По ISO 8217:2024 Products from petroleum, synthetic and renewable sources — Fuels (class F) — Specifications of marine fuels [34].
** Количество топлива, эквивалентное выбросам ПГ 50 000 т CO₂-экв.

Таблица 5
Расчет изменения эксплуатационных расходов флота буксирных судов в результате создания КП применительно к РФ

Тип судового топлива	Содержание серы, т серы/т топл.	Углеродоемкость топлива, т CO ₂ /т топл.	Потраченное топливо**, т/год	Кол-во буксиров в КП	Цена топлива, руб.	Затраты 1 буксира на топливо, руб.	OPEX старого флота, руб.	Стоимость электроэнергии 1 буксира, руб.	OPEX нового флота (с учетом КП), руб.	Ожидаемое снижение экспл. расх., % OPEX
HFO* (RME, RMG, RMK, 0,1<S≤0,5 %)	0,005	3,11	16 057	14	34 000	39 018 400	1 194 737 600	48 523 256	1 277 805 581	+7
HFO* (RME, RMG, RMK, 0,5 % S)	0,005	3,11	16 057	14	34 000	39 018 400	1 194 737 600	48 523 256	1 277 805 581	+7
HFO* (RMA, RMB, RMD max. 0,1 % S)	0,001	3,15	15 868	14	47 000	53 937 200	1 403 600 800	48 523 256	1 277 805 581	-9
LFO* (RMA, RMB, RMD, 0,1<S≤0,5 %)	0,005	3,15	15 868	14	60 000	68 856 000	1 612 464 000	48 523 256	1 277 805 581	-21
MDO/Gas Oil* (DMX, DMA, DMZ, DMB 0,1 % S)	0,001	3,21	15 596	14	63 000	72 298 800	1 660 663 200	48 523 256	1 277 805 581	-23
MDO/Gas Oil* (DMX, DMA, DMZ, DMB, 0,1<S≤0,5 %)	0,005	3,21	15 596	14	60 000	68 856 000	1 612 464 000	48 523 256	1 277 805 581	-21

* По ISO 8217:2024 Products from petroleum, synthetic and renewable sources — Fuels (class F) — Specifications of marine fuels [34].
** При цене 1 угл. ед. 1000 руб.

В табл. 4 представлены расчеты $OPEX_{old}$ для ЕС, значения которых хорошо коррелируются с представленным в докладе [37] значением, в соответствии с которым стоимость годовых эксплуатационных затрат буксирного судна с тягой на гаке 60–70 тс в странах ЕС составляет около 1,65 млн. € в год. Применительно к новому и старому флоту буксиров значения затрат на экипаж ($C_{crew_{EU}}$, $C_{crew_{RF}}$) и прочих расходов ($C_{other_{EU}}$, $C_{other_{RF}}$) носят постоянные значения и определяются по формулам:

$$C_{crew_{EU}} = n_{crew} \cdot O_{crew} \cdot 12 = 6 \text{ чел.} \cdot 5000 \text{ €} \cdot 12 \text{ мес.} = 360\,000 \text{ €/год,}$$

$$C_{crew_{RF}} = n_{crew} \cdot O_{crew} \cdot 12 = 6 \text{ чел.} \cdot 250\,000 \text{ руб.} \cdot 12 \text{ мес.} = 18\,000\,000 \text{ руб./год.}$$
(5)

Значения прочих расходов ($C_{other_{EU}}$, $C_{other_{RF}}$) носят постоянные значения и в текущем исследовании приняты равными 3 % от стоимости нового буксира вне зависимости от страны постройки (3 % от 8 млн € = 240 000 € = 28,32 млн руб.). Стоимость нефтяного топлива в зависимости от места реализации КП является переменной величиной и определяется по формуле:

$$C_{fuel} = Price_{fuel} \cdot P_{fuel} \cdot n, \quad (6)$$

где $Price_{fuel}$ — цена соответствующего вида топлива [38–40];
 $OPEX_{old}$ — эксплуатационные расходы флота буксиров до обновления;
 P_{fuel} — количество потраченного буксиром топлива, определяемое по формуле (2), т.

Годовые эксплуатационные расходы флота буксиров после обновления:

$$OPEX_{new} = (C_{el} + C_{crew} + C_{other}) \cdot n - (KPI_{CO_2} \cdot price_{CO_2} - KPI_s \cdot price_s), \quad (7)$$

где C_{el} — стоимость электричества, потраченного новым буксиром;
 $KPI_{CO_2} = 50\,000$ ед. CO_2 -экв. — количество климатических единиц;
 $price_{CO_2}$ — стоимость климатической единицы, в ЕС составляет 70 €, в РФ — 1000 руб.;
 KPI_s — предотвращенное количество выброшенной серы (в зависимости от типа топлива), т/год;
 $price_s$ — стоимость квоты на выброс тонны серы в ЕС 7788 € [41], в РФ налогами не облагается.

Стоимость электричества для обновленного флота буксиров в зависимости от места реализации КП является переменной величиной и определяется по формуле:

$$C_{el} = Price_{el} \cdot (P_{el} / \eta_{el}) \cdot n, \quad (8)$$

где $Price_{el}$ — цена электричества в ЕС или РФ [42, 43];
 $OPEX_{old}$ — эксплуатационные расходы флота буксиров до обновления;
 $\eta_{el} = 0,86$ — КПД передачи электроэнергии от источника (сети) к аккумуляторной батарее;
 P_{el} — количество потраченной буксиром электроэнергии, определяемое по формуле (9), т:

$$P_{el} = Ne_{ном} \cdot K_{ИМ} \cdot A = 2782 \cdot 0,25 \cdot 7500 = 5\,216\,250 \text{ кВт/год}. \quad (9)$$

Результаты расчетов демонстрируют, что, несмотря на благоприятный «климат» для создания и реализации климатических проектов в ЕС, значительная цена на электроэнергию практически полностью нивелирует выгоду от продажи относительно дорогих углеродных единиц и отсутствия необходимости платить высокие налоги на выбросы серы. В двух случаях ожидаемое снижение эксплуатационных расходов составляет незначительную величину, сравнимую с погрешностью самого расчета, в остальных случаях расчет показал существенное удорожание эксплуатационных расходов (до 46 %). Несмотря на относительно низкую стоимость углеродной единицы в Российской Федерации, здесь в ряде случаев снижение эксплуатационных расходов превысило 20 %, что может объясняться низкой ценой на электроэнергию. Конечно, без учета капитальных затрат на строительство или модернизацию флота буксиров и создание соответствующей инфраструктуры судить о целесообразности проекта преждевременно, однако тот факт, что эксплуатационные затраты подобного проекта сравнимы с эксплуатационными затратами привычных для нас портовых буксиров-кантовщиков, сам по себе опровергает распространенный тезис о дороговизне альтернативных источников энергии.

ВЫВОДЫ

В работе была рассмотрена нормативная база климатических проектов на водном транспорте. Надежным способом снизить до нуля выбросы ПГ буксирными судами является использование судов с полностью электрической энергетической установкой, состоящей из аккумуляторных батарей. В статье была оценена применимость этого проекта и показаны условия, при которых появляется возможность получения позитивного эффекта, когда затраты на внедрение мероприятий могут частично компенсироваться за счет реализации углеродных единиц. В статье показано, что с технической точки зрения КП перевода буксирного судна на аккумуляторную энергетическую установку является осуществимым, так как в настоящий момент находятся в свободном доступе сами комплектующие для переоборудования (аккумуляторные батареи с необходимыми характеристиками, аварийные дизель-генераторы и т.д.), а также существуют аналогичные образцы морской техники. Важным аспектом и главным минусом исследуемого КП в нашей стране является то, что для его регистрации необходимо доказать, что предпринимаемые действия сократят углеродный след компании на необходимую величину (т.е. на 50 000 т CO_2 -экв./год), что потенциально может выполнить

буксирная компания, тратящая примерно 16 000 т нефтяного топлива в год и/или владеющая флотом буксиров суммарной мощностью 38 МВт.

Результаты расчетов экономической целесообразности исследуемого КП применительно к ЕС и Российской Федерации демонстрируют, что несмотря на благоприятный «климат» для создания и реализации климатических проектов в ЕС, значительная цена на электроэнергию в ЕС практически полностью нивелирует выгоду от отсутствия необходимости платить высокие налоги на выбросы серы и продажи относительно дорогих углеродных единиц. Применительно к ЕС ожидаемое снижение эксплуатационных расходов составляет незначительную величину, сравнимую с погрешностью самого расчета, в остальных случаях расчет показал существенное удорожание эксплуатационных расходов (до 46 %). Несмотря на относительно низкую стоимость углеродной единицы в Российской Федерации, здесь в ряде случаев снижение эксплуатационных расходов превысило 20 %, что может объясняться низкой ценой на электроэнергию.

Без учета капитальных затрат на строительство или модернизацию флота буксиров и создание соответствующей инфраструктуры, судить о целесообразности проекта преждевременно, однако тот факт, что эксплуатационные затраты подобного проекта сравнимы с эксплуатационными затратами привычных для нас портовых буксиров-кантовщиков, сам по себе опровергает распространенный тезис о дороговизне альтернативных источников энергии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Постановление Правительства РФ от 24 марта 2022 г. № 455 «Об утверждении Правил верификации результатов реализации климатических проектов».
2. Реуцкий А.С. Определение основных путей реализации климатических проектов на водном транспорте / А.С. Реуцкий, Д.С. Семионичев, А.А. Михеева // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2024. — № 75. — С. 4–15. — EDN FJQQTС.
3. Пинаев В.Е. Направления, опыт и перспективы реализации климатических проектов в России / В.Е. Пинаев, В.Н. Ухова, Т.Н. Ледашева // Отходы и ресурсы. — 2023. — Т. 10. — № 2. — [Электронный ресурс] URL: <https://resources.today/PDF/17ECOR223.pdf> (дата обращения 10.09.2024). — DOI 10.15862/17ECOR223.
4. Реуцкий А.С. Анализ положений руководящих принципов ИМО по оценке интенсивности выбросов парниковых газов на протяжении жизненного цикла для всех видов судового топлива / А.С. Реуцкий, В.К. Шурпяк, С.А. Толмачев // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2025. — № 79. — С. 14–25. — EDN FBVVJV.
5. Толмачев С.А. Последствия применения требований МАРПОЛ к эксплуатационной углеродоемкости (СИ) и предлагаемые подходы к их совершенствованию / С.А. Толмачев, А.А. Серов, А.А. Михеева, Д.С. Семионичев, А.С. Реуцкий // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2024. — № 77. — С. 24–32. — EDN FXBYEL.
6. Реуцкий А.С. Оценка влияния типа используемого судового топлива на величину углеродного следа транспортной услуги / А.С. Реуцкий, В.В. Якимов, А.А. Буцанец // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2024. — № 76. — С. 87–95. — EDN ICJSDQ.
7. Fuentes García G. Sea port SO2 atmospheric emissions influence on air quality and exposure at Veracruz, Mexico / G. Fuentes García, R. Sosa Echeverría, A. García Reynoso, J.M. Baldasano Recio et al. // Atmosphere. — 2022. — Vol. 13. — P. 1950. — DOI 10.3390/atmos13121950.
8. Fuentes García G. Atmospheric emissions in ports due to maritime traffic in Mexico / G. Fuentes García, R. Sosa Echeverría, J.M. Baldasano Recio, J.D. Kahl et al. // Journal of Marine Science and Engineering. — 2021. — Vol. 9. — P. 1186. — DOI 10.3390/jmse9111186.
9. Михайлов А.С. Побережья, на которых мы живем: может ли быть единое определение приморской зоны? / А.С. Михайлов, А.П. Плотникова // Балтийский регион. — 2021. — Т. 13, № 4. — С. 36–53. — DOI 10.5922/2079-8555-2021-4-3.
10. Павловский В.А. Теплофизические основы морской транспортировки и бункеровки сжиженного природного газа / В.А. Павловский, А.С. Реуцкий. — СПб.: ФГУП КГНЦ, 2019. — 88 с. — EDN EZHRNH.
11. Буянов А.С. Анализ опыта применения метанола и этанола в качестве топлива на судах / А.С. Буянов, О.Н. Леонова, А.С. Реуцкий // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2021. — № 64/65. — С. 91–97. — EDN MIMXNW.
12. Кондратенко А.А. Особенности проектирования СПГ бункеровщиков / А.А. Кондратенко, А.С. Реуцкий // Труды Крыловского государственного научного центра. — 2019. — Специальный выпуск 1. — С. 216–222. — DOI 10.24937/2542-2324-2019-1-S-1-216-222. — EDN EHHYJ.
13. CMA CGM and SIPP ink long-term onshore power cooperation // Seatrade Maritime. — [Электронный ресурс] URL: <https://www.seatrade-maritime.com/sustainability/cma-cgm-and-sipp-ink-long-term-onshore-power-cooperation> (дата обращения 25.12.2025).
14. Borgøy: the world's first LNG-fueled tug // MarineLink. — [Электронный ресурс] URL: <https://www.marinelink.com/news/lngfueled-worlds-first364856.aspx#> (дата обращения 25.12.2025).
15. Реуцкий А.С. Особенности проектирования судов-бункеровщиков сжиженным природным газом: дисс. ... канд. техн. наук / А.С. Реуцкий; СПбГМТУ. — 2021. — 346 с. — EDN CCFESV.
16. First methanol-fueled tug launches at port of Antwerp // The Maritime Executive. — [Электронный ресурс] URL: <https://www.maritime-executive.com/article/first-methanol-fueled-tug-launches-at-port-of-antwerp> (дата обращения 25.12.2025).
17. NYK completes world's first commercial-use ammonia-fueled vessel // The Maritime Executive. — [Электронный ресурс] URL: <https://www.maritime-executive.com/article/nyk-completes-world-s-first-commercial-use-ammonia-fueled-vessel> (дата обращения 25.12.2025).
18. Guinness world record for power set by Damen-built electric tug in UAE // The Maritime Executive. — [Электронный ресурс] URL: <https://www.maritime-executive.com/article/guinness-world-record-for-power-set-by-damen-built-electric-tug-in-uae> (дата обращения 25.12.2025).

19. The role of LNG in emission reduction: Exploring the potential and limitations of LNG as a transition fuel for the shipping industry // *Diverse Daily*. — [Электронный ресурс] URL: <https://diversedaily.com/the-role-of-lng-in-emission-reduction-exploring-the-potential-and-limitations-of-lng-as-a-transition-fuel-for-the-shipping-industry/> (дата обращения 25.12.2025).
20. Ivanov G. Efficient application range of electric cargo ships / G. Ivanov // *International Journal of Maritime Engineering*. — 2023. — Vol. 165, No. A1. — P. 1–10.
21. Реуцкий А.С. Определение критериев целесообразности создания климатических проектов на водном транспорте / А.С. Реуцкий, Д.С. Семионичев, А.А. Михеева // *Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства*. — 2025. — № 78. — С. 16–22. — EDN ZURMGR.
22. Федеральный закон от 02.07.2021 г. № 296-ФЗ «Об ограничении выбросов парниковых газов».
23. Minhazul Islam. Concept of an electric-powered passenger vessel in Bangladesh / Minhazul Islam, Saad Alif-A. Zaman, Md Mashiur Rahaman // *Journal of Maritime Research*. — 2023. — Vol. 20, No. 3. — P. 68–71.
24. Koričan M. Electrification of fishing vessels and their integration into isolated energy systems with a high share of renewables / M. Koričan, L. Frković, N. Vladimir // *Journal of Cleaner Production*. — 2023. — Vol. 425. — P. 138997.
25. Percić M. Environmental and economic assessment of batteries for marine applications: Case study of all-electric fishing vessels / M. Percić, M. Koričan, I. Jovanović, N. Vladimir // *Batteries*. — 2024. — Vol. 10, Issue 7. — DOI 10.3390/batteries10010007.
26. «Зеленый флот» для Байкала: заложен киль круизного электросудна проекта «Байкал» // *Водоход*. — [Электронный ресурс] URL: <https://vodohod.com/about/news/zelenyy-flot-dlya-baykala-zalozhen-kil-kruiznogo-elektrosudna-proekta-baykal/> (дата обращения 25.12.2025).
27. Koumentakos A.G. Developments in electric and green marine ships / A.G. Koumentakos // *Applied System Innovation*. — 2019. — Vol. 2, No. 4. — P. 34.
28. Roy R.B. Impact analysis on distribution network due to coordinated electric ferry charging / R.B. Roy, S. Alahakoon, P. Janse Van Rensburg, E. Basher et al. // *IET Energy Systems Integration*. — 2024. — Vol. 6, No. 4. — P. 638–663.
29. Васильев А.А. Анализ проектных характеристик судов снабжения ледового класса при применении альтернативных источников энергии / А.А. Васильев, К.Д. Овчинников // *Морские интеллектуальные технологии*. — 2024. — № 1, часть 1. — С. 11–19.
30. RSD Tug 2513 Electric // *Damen Shipyards Group*. — [Электронный ресурс] URL: <https://www.damen.com/vessels/tugs/electric-tugs/rsd-tug-2513-electric#specifications> (дата обращения 25.12.2025).
31. Накопители энергии НЭ-650-160 // *ЕЦС СКО*. — [Электронный ресурс] URL: <https://ecs-sko.ru/catalog/equipment/detail/nakopiteli-energii-ne-650-160/> (дата обращения 25.12.2025).
32. [Госзакупки: Характеристики буксира мощностью ~2800 кВт] // *ЕИС Закупки*. — [Электронный ресурс] URL: <https://zakupki.gov.ru/erp/order/notice/ok504/view/documents.html?regNumber=0172200002519000078> (дата обращения 25.12.2025).
33. Резолюция МЕРС.376(80) (принята 7 июля 2023 года): Руководство по интенсивности выбросов ИГ на протяжении жизненного цикла судового топлива (руководство по ОЖЦ).
34. ISO 8217:2024 Products from petroleum, synthetic and renewable sources — Fuels (class F) — Specifications of marine fuels.
35. Николаев Н.И. Анализ экспериментальных данных по нагрузкам современных высокооборотных двигателей CAT 3500 серии морских буксиров / Н.И. Николаев, В.В. Герасиди, А.В. Лисаченко // *Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова*. — 2014. — № 6(28). — С. 49–55.
36. СП 350.1326000.2018 Нормы технологического проектирования морских портов. — М.: Стандартинформ, 2018.
37. Bossche M. van den. Economic impact of the European Towing sector / M. van den Bossche, R. Janse, O. de Jong, U. Mehmood. — Rotterdam, 29 October 2019.
38. Цены на бункерное топливо в Роттердаме // *OilMonster*. — [Электронный ресурс] URL: <https://www.oilmonster.com/bunker-fuel-prices/west-northern-europe/rotterdam/133> (дата обращения 25.12.2025).
39. Rotterdam bunker prices // *Ship & Bunker*. — [Электронный ресурс] URL: <https://www.shipandbunker.com/prices/emea/nwe/nl-rtm-rotterdam> (дата обращения 25.12.2025).
40. Стоимость бункерного топлива по итогам ноября 2023 года // *АСРФ*. — [Электронный ресурс] URL: <https://fsarf.ru/analytics/stoimost-bunkernogo-topliva-po-itogam-noyabrya-2023-goda/> (дата обращения 25.12.2025).
41. Wang H. Life cycle analysis of hydrogen powered marine vessels — Case ship comparison study with conventional power system / H. Wang, M.Z. Aung, X. Xu, E. Boulougouris // *Sustainability*. — 2023. — Vol. 15. — No. 17. — P. 12946. — DOI 10.3390/su151712946.
42. Список стран Европы по стоимости электроэнергии // *Википедия*. — [Электронный ресурс] URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Список_стран_Европы_по_стоимости_электроэнергии (дата обращения 25.12.2025).
43. Цена на электроэнергию для бизнеса по субъектам РФ // *АО «Газпром Энергосбыт»*. — [Электронный ресурс] URL: <https://energosbyt.gazprom.ru/> (дата обращения 06.04.2026).

REFERENCES

1. Resolution of the Government of the Russian Federation No. 455 of March 24, 2022 'On Approval of the Rules for Verification of the Results of Climate Project Implementation'. (In Russ.)
2. Reutskii A.S., Semionichev D.S., Mikheeva A.A. Identification of the main ways to implement climate projects in waterborne transport. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2024. No. 75. P. 4–15. EDN FJOQTC. (In Russ.)
3. Pinaev V.E., Ukhova V.N., Ledashcheva T.N. Napravleniya, opyt i perspektivy realizatsii klimaticheskikh proektov v Rossii [Directions, experience and prospects for the implementation of carbon projects in Russia]. *Russian Journal of Resources, Conservation and Recycling*. 2023. T. 10. No. 2. URL: <https://resources.today/en/17ecor223.html> (accessed 10.09.2024). DOI 10.15862/17ECOR223.
4. Reutskii A.S., Shurpyak V.K., Tolmachev S.A. Analysis of the IMO guidelines for estimating the intensity of greenhouse gas emissions over the life cycle for all types of marine fuels. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2025. No. 79. P. 14–25. EDN FBBBJV. (In Russ.)
5. Tolmachev S.A., Serov A.A., Mikheeva A.A., Semionichev D.S., Reutskii A.S. Consequences of applying MARPOL requirements to operational carbon intensity (CII), and approaches for their improvement. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2024. No. 77. P. 24–32. EDN FXBYEL. (In Russ.)
6. Reutskii A.S., Yakimov V.V., Butsanets A.A. Assessment of the impact of the type of marine fuel used on the carbon footprint of the transport service. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2024. No. 76. P. 87–95. EDN ICJSDQ. (In Russ.)
7. Fuentes García G., Echeverría R.S., Reynoso A.G., Baldasano Recio J.M. et al. Sea port SO₂ atmospheric emissions influence on air quality and exposure at Veracruz, Mexico. *Atmosphere*. 2022. Vol. 13. P. 1950. DOI 10.3390/atmos13121950.
8. Fuentes García G., Sosa Echeverría R., Baldasano Recio J.M., Kahl J.D. et al. Atmospheric emissions in ports due to maritime traffic in Mexico. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2021. Vol. 9. P. 1186. DOI 10.3390/jmse9111186.
9. Mikhaylov A.S., Plotnikova A.P. The coasts we live in: can there be a single definition for a coastal zone? *Baltic Region*. 2021. Vol. 13, No. 4. P. 36–53. DOI 10.5922/2079-8555-2021-4-3. (In Russ.)
10. Pavlovskii V.A., Reutskii A.S. Teplofizicheskie osnovy morskoi transportirovki i bunkerovki szhizhennogo prirodnogo gaza [Thermophysical principles of maritime transportation and bunkering of liquefied natural gas]. St. Petersburg: FGUP KGNTs, 2019. 88 p. EDN EZHRNH.
11. Buyanov A.S., Leonova O.N., Reutsky A.S. Methanol and ethanol as ship fuel: analysis of application experience. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2021. No. 64–65. P. 91–97. EDN MIMXNW. (In Russ.)
12. Kondratenko A.A., Reutsky A.S. Design specifics of LNG bunkering ships. *Transactions of the Krylov State Research Centre*. 2019. Special Edition 1. P. 216–222. DOI 10.24937/2542-2324-2019-1-S-I-216-222. EDN EHHYJ. (In Russ.)
13. CMA CGM and SIPG ink long-term onshore power cooperation. *Seatrade Maritime*. URL: <https://www.seatrade-maritime.com/sustainability/cma-cgm-and-sippg-ink-long-term-onshore-power-cooperation> (accessed 25.12.2025).
14. Borgøy: the world's first LNG-fueled tug. *MarineLink*. URL: <https://www.marinelink.com/news/lngfueled-worlds-first364856.aspx#> (accessed 25.12.2025).
15. Reutskii A.S. Osobennosti proektirovaniya sudov-bunkerovshchikov szhizhennym prirodnym gazom [Design peculiarities of LNG bunkering ships: PhD thesis] / St. Petersburg State Marine Technical University. 2021. 346 p. EDN CCFESV.
16. First methanol-fueled tug launches at port of Antwerp. *The Maritime Executive*. URL: <https://www.maritime-executive.com/article/first-methanol-fueled-tug-launches-at-port-of-antwerp> (accessed 25.12.2025).
17. NYK completes world's first commercial-use ammonia-fueled vessel. *The Maritime Executive*. URL: <https://www.maritime-executive.com/article/nyk-completes-world-s-first-commercial-use-ammonia-fueled-vessel> (accessed 25.12.2025).
18. Guinness world record for power set by Damen-built electric tug in UAE. *The Maritime Executive*. URL: <https://www.maritime-executive.com/article/guinness-world-record-for-power-set-by-damen-built-electric-tug-in-uae> (accessed 25.12.2025).
19. The role of LNG in emission reduction: Exploring the potential and limitations of LNG as a transition fuel for the shipping industry. *Diverse Daily*. URL: <https://diversedaily.com/the-role-of-lng-in-emission-reduction-exploring-the-potential-and-limitations-of-lng-as-a-transition-fuel-for-the-shipping-industry/> (accessed 25.12.2025).
20. Ivanov G. Efficient application range of electric cargo ships. *International Journal of Maritime Engineering*. 2023. Vol. 165, No. A1. P. 1–10.
21. Reutskii A.S., Semionichev D.S., Mikheeva A.A. Determining reasonability criteria for climate projects in water transport. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2025. No. 78. P. 16–22. EDN ZURMGR. (In Russ.)
22. Federal Law No 296 On Limiting Greenhouse Gas Emissions, of July 2, 2021.
23. Minhazul Islam, Saad Alif-A. Zaman, Md Mashiur Rahaman. Concept of an electric-powered passenger vessel in Bangladesh. *Journal of Maritime Research*. 2023. Vol. 20, No. 3. P. 68–71.
24. Koričan M., Frković L., Vladimir N. Electrification of fishing vessels and their integration into isolated energy systems with a high share of renewables. *Journal of Cleaner Production*. 2023. Vol. 425. P. 138997
25. Percić M., Koričan M., Jovanović I., Vladimir N. Environmental and economic assessment of batteries for marine applications: Case study of all-electric fishing vessels. *Batteries*. 2024. Vol. 10, Issue 7. DOI 10.3390/batteries10010007.
26. A "green fleet" for Lake Baikal: The keel of the Baikal project's electric cruise ship is laid. *Vodokhod*. URL: <https://vodokhod.com/about/news/zelenyy-flot-dlya-baykala-zalozhen-kil-kruiznogo-elektrosudna-proekta-baykal/> (accessed 25.12.2025).
27. Koumentakos A.G. Developments in electric and green marine ships. *Applied System Innovation*. 2019. Vol. 2, No. 4. P. 34.
28. Roy R.B., Alahakoon S., Janse Van Rensburg P., Basher E. et al. Impact analysis on distribution network due to coordinated electric ferry charging. *IET Energy Systems Integration*. 2024. Vol. 6, No. 4. P. 638–663.
29. Vasiliev A.A., Ovchinnikov K.D. Analysis of design characteristics of ice-class supply vessels with alternative energy sources. *Marine Intellectual Technologies*. 2024. No. 1, part 1. P. 11–19. (In Russ.)

30. RSD Tug 2513 Electric. *Damen Shipyards Group*. URL: <https://www.damen.com/vessels/tugs/electric-tugs/rsd-tug-2513-electric#specifications> (accessed 25.12.2025).
31. Nakopiteli energii NE-650-160 [Energy storage devices NE-650-160]. *ECS SKO*. URL: <https://ecs-sko.ru/catalog/equipment/detail/nakopiteli-energii-ne-650-160/> (accessed 25.12.2025).
32. [Goszakupki: Kharakteristiki buksira moshchnost'yu ~2800 kVt] [Public procurement: Characteristics of a ~2800 kW tugboat]. *EIS Zakupki [Unified information system for procurement]*. URL: <https://zakupki.gov.ru/epz/order/notice/ok504/view/documents.html?regNumber=0172200002519000078> (accessed 25.12.2025).
33. Resolution MEPC.376(80) (adopted on 7 July 2023): Guidelines on life cycle GHG intensity of marine fuels (LCA guidelines).
34. ISO 8217:2024 Products from petroleum, synthetic and renewable sources — Fuels (class F) — Specifications of marine fuels.
35. Nikolaev N.I., Gerasidi V.V., Lisachenko A.V. Modern high-speed engines CAT 3500 series of marine tugs analysis of loads experimental data. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S.O. Makarova*. 2014. No. 6(28). P. 49–55.
36. SP 350.1326000.2018 Normy tekhnologicheskogo proektirovaniya morskikh portov [Code 350.1326000.2018 Norms for technological design of sea ports]. Moscow: Standartinform, 2018. (In Russ.)
37. Bossche M. van den, Janse R., Jong O. de, Mehmood U. Economic impact of the European towage sector. Rotterdam, 29 October 2019.
38. Rotterdam bunker fuel price. *OilMonster*. URL: <https://www.oilmonster.com/bunker-fuel-prices/west-northern-europe/rotterdam/133> (accessed 25.12.2025).
39. Rotterdam bunker prices. *Ship & Bunker*. URL: <https://www.shipandbunker.com/prices/emea/nwe/nl-rtm-rotterdam> (accessed 25.12.2025).
40. Stoimost' bunkernogo topliva po itogam noyabrya 2023 goda [Bunker fuel prices as of November 2023]. *FSA*. URL: <https://fsarf.ru/analytics/stoimost-bunkernogo-topliva-po-itogam-noyabrya-2023-goda/> (accessed 25.12.2025).
41. Wang H., Aung M.Z., Xu X., Boulougouris E. Life cycle analysis of hydrogen powered marine vessels — Case ship comparison study with conventional power system. *Sustainability*. 2023. Vol. 15, No. 17. P. 12946. DOI 10.3390/su151712946.
42. Spisok stran Evropy po stoimosti elektroenergii [List of European countries by electricity cost]. *Wikipedia*. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Список_стран_Европы_по_стоимости_электроэнергии/ (accessed 25.12.2025).
43. Tsena na elektroenergiyu dlya biznesa po sub'ektam RF [Electricity prices for businesses by region of the Russian Federation]. *AO Gazprom Energosbyt*. URL: <https://energobyt.gazprom.ru/> (accessed 06.04.2026).

Статья поступила в редакцию 26.01.2026.

Принята к публикации 24.02.2026.