

УДК 629.5.01, 629.5.016, 629.5.089.6
EDN CVNGFP

ДЕКАРБОНИЗАЦИЯ МОРСКОГО СУДОХОДСТВА: ТЕНДЕНЦИИ, РЕГУЛЯТОРНЫЕ ИНСТРУМЕНТЫ, АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ ТОПЛИВА, ВЫЗОВЫ И ДОСТИЖЕНИЕ НУЛЕВЫХ ВЫБРОСОВ

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

А.А. Буцанец, канд. техн. наук, Российский морской регистр судоходства, 191186 Россия, Санкт-Петербург, Миллионная ул., 7А, e-mail: butsanets.aa@rs-class.org; Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова, 198035 Россия, Санкт-Петербург, Двинская ул., 5/7, e-mail: butsanetsaa@gumrf.ru

Несмотря на все усилия, абсолютные выбросы парниковых газов в морском судоходстве продолжают расти, достигнув 121 % к 2024 г. от уровня 2008 г. из-за увеличения мировой торговли и тоннажа флота. Динамика отрасли определяется не только экологическими инициативами, но и геополитическими, макроэкономическими и рыночными факторами. В статье анализируется динамика выбросов за последние 20 лет, оценивается экономическая целесообразность и техническая готовность к внедрению на морском транспорте альтернативных топлив (метанол, аммиак, водород, биотопливо) до 2040 г. Рассматриваются действующие и перспективные нормативно-правовые механизмы, включая стратегию ИМО по нулевым выбросам к 2050 г. с промежуточными целями на 2030 и 2040 гг., а также региональные меры ЕС (EU ETS, FuelEU Maritime). Показаны реалистичные переходные решения, такие как СПГ в сочетании с технологиями энергоэффективности (ЭЭТ) и бортовым улавливанием CO₂ (OCCS), а также затронуты долгосрочные перспективы ядерной энергетики. Сформулированы системные риски и барьеры, включая ограниченную доступность низкоуглеродных топлив, рост операционных расходов (до 45 000 долл. США в день для судов в ЕС к 2035 г.) и дефицит судостроительных мощностей. Преобладающая рыночная динамика показывает отсутствие экономической выгоды от «зеленых» топлив из-за высокой стоимости и инфраструктурных ограничений. Регуляторные меры выступают как дополнительные торговые барьеры, перекладывая затраты на конечных потребителей. Отрасль сталкивается с разрывом между амбициозными целями и реальными возможностями; без синхронизации политики, технологий и капитала достижение нулевых выбросов к 2050 г. остается под вопросом. Наиболее вероятный сценарий — массовое использование биотоплив, в том числе био-СПГ как переходного топлива с постепенным внедрением ядерных установок в 2030-х гг.

Ключевые слова: декарбонизация, национальные меры, международные меры, ИМО, EEDI, EEXI, CII.

Для цитирования: Реуцкий А.С. Международный опыт декарбонизации водного транспорта / А.С. Реуцкий, А.А. Буцанец // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2026. — Т. 56, № 1. — С. 17–37. — EDN CVNGFP.

DECARBONIZATION OF MARITIME SHIPPING: TRENDS, REGULATORY INSTRUMENTS, ALTERNATIVE FUELS, AND CHALLENGES IN ACHIEVING NET-ZERO EMISSIONS

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

A.A. Butsanets, PhD, Russian Maritime Register of Shipping, 191186 Russia, St. Petersburg, Millionnaya ul., 7A, e-mail: butsanets.aa@rs-class.org, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, 198035 Russia, St. Petersburg, Dvinskaya ul. 5/7, e-mail: butsanetsaa@gumrf.ru

Despite efforts to optimize ships and operations, absolute greenhouse gas emissions in maritime shipping continue to rise, reaching 121 % of the 2008 level by 2024 due to the growth in global trade and fleet tonnage. The industry's dynamics are driven by macroeconomic and market factors, not solely environmental initiatives. The article analyzes emission trends over the past 20 years and evaluates the economic feasibility and technical readiness implementation of alternative fuels (methanol, ammonia, hydrogen, biofuels) up to 2040. It examines current and prospective regulatory mechanisms, including the IMO strategy for net-zero emissions by 2050 with interim targets for 2030 and 2040, as well as EU regional measures (EU ETS, FuelEU Maritime). Realistic transitional solutions are identified, such as LNG combined with energy efficiency technologies (EET) and onboard carbon capture (OCCS), along with long-term prospects for nuclear energy. Systemic risks and barriers are formulated, including limited availability of low-carbon fuels, rising operational costs (up to \$45,000 per day for ships in the EU by 2035), and shipbuilding capacity shortages. Prevailing market dynamics show a lack of economic benefits from "green" fuels due to high costs and infrastructure constraints. Regulatory measures act as additional trade barriers, shifting costs to end consumers. The industry faces a gap between ambitious goals and real capabilities; without synchronizing policy, technology, and capital, achieving net-zero by 2050 remains questionable. The most likely scenario is widespread biofuels, in particular bio-LNG use as a transitional fuel with gradual nuclear implementation in the 2030s.

Keywords: decarbonization, national measures, international measures, IMO, EEDI, EEXI, CII.

For citation: Reutskii A.S., Butsanets A.A. International experience of decarbonization of water transport. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2026. Vol. 56, No. 1. P. 17–37. EDN CVNGFP. (In Russ.)

ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на усилия по снижению удельных выбросов за счет оптимизации морских судов и их операционной деятельности, предпринимаемые в отрасли в последние 20 лет, общий объем выбросов парниковых газов (далее — ПГ) в судоходстве продолжает расти (рис. 1). В настоящий момент выбросы CO₂ увеличились на 121 % по сравнению с 2008 г. из-за роста мировой торговли и тоннажа флота. Динамика судоходной отрасли определяется макроэкономическими, геополитическими и рыночными факторами, а не только экологическими инициативами. Применение ИМО методологии «от скважины до винта» (Well-to-Wake — WtW) выявляет эту тенденцию и демонстрирует растущую сложность достижения отраслевых климатических целей.

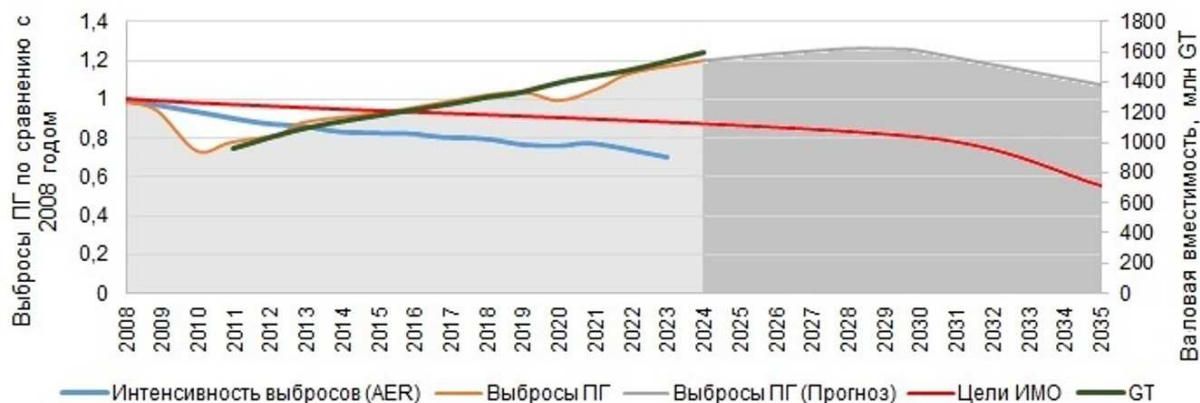


Рис. 1. Прогноз и динамика изменения выбросов парниковых газов с морских судов

Очевидно, что полная оценка влияния регуляторных мер на декарбонизацию судоходства невозможна и что основные затраты на соблюдение этих требований понесут конечные потребители логистических услуг. Таким образом, нормативные ограничения становятся дополнительными переменными в системе грузоперевозок, а не определяют рыночную динамику. *В условиях ограниченной доступности низкоуглеродных решений затраты на принятие и соблюдение требований будут фактически выполнять функцию торговых тарифов.* Данная ситуация уже сейчас оказывает существенное влияние на эффективность и конкурентоспособность мировой морской торговли.

Целью статьи является сформировать перечень действующих на конец 2025 г. международных и национальных (региональных) инструментов для декарбонизации морского транспорта и выявить основные тренды и сложности глобальной трансформации на пути к сокращению выбросов судов. Для достижения цели в данной работе:

- проанализирована динамика выбросов парниковых газов в судоходстве за последние 20 лет и показано, что, несмотря на технический прогресс, выбросы в абсолютном выражении продолжают расти;
- дана оценка экономической целесообразности и технической готовности альтернативных видов топлива (метанол, аммиак, водород, биотопливо) на горизонте до 2040 г.;
- рассмотрены действующие и готовящиеся нормативно-правовые и регуляторные механизмы;
- выявлены наиболее реалистичные переходные решения (СПГ + ЭЭТ + OCCS) и долгосрочные перспективы (ядерная энергетика);
- сформулированы системные риски и барьеры достижения целей ИМО к 2030–2050 гг.

Преобладающая динамика рынка показывает, что с точки зрения стоимости внедрения и использования экологически чистые виды топлива в настоящее время не несут экономической выгоды из-за высокой стоимости и ограниченной доступности. При этом затраты на соблюдение законодательных требований по выбросам ПГ в некоторых странах резко возрастают. Наглядно демонстрируют растущую финансовую нагрузку на отрасль приведенные в исследовании примеры. Так, для судна, выполняющего рейсы в пределах ЕС, ежедневные эксплуатационные расходы могут увеличиться с 15 000 в 2028 г. до 45 000 долл. США к 2035 г. при условии ежедневного потребления 30 т низкосернистого мазута марки VLSFO. Анализ стоимости владения балкером типа Panamax (рис. 2) демонстрирует отсутствие экономической целесообразности перехода на экологически чистые виды топлива ввиду их высокой цены и ограниченной доступности.

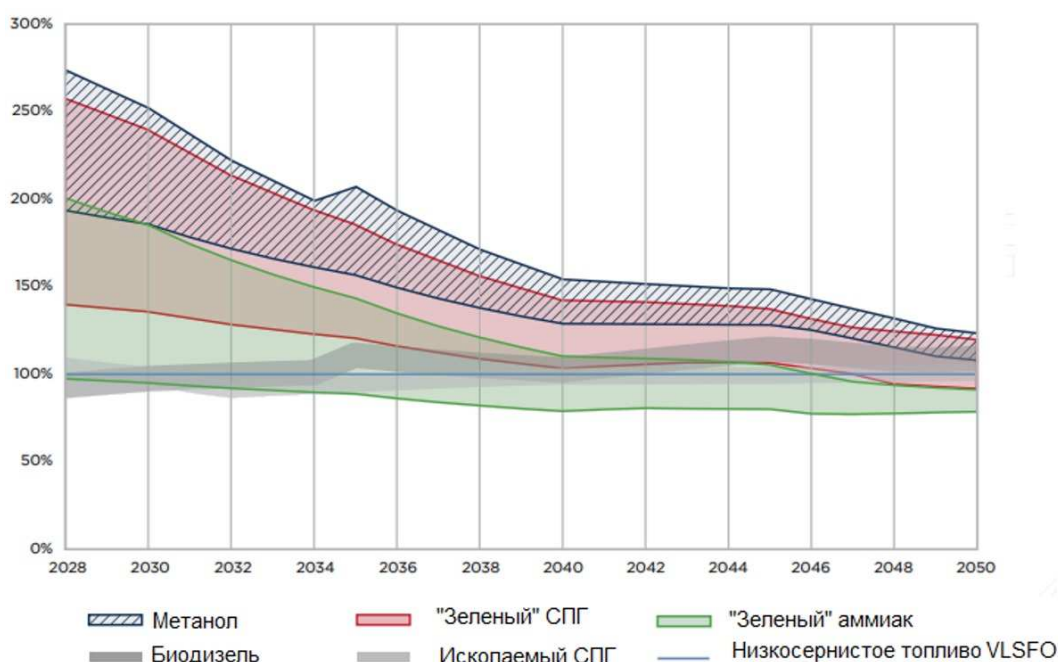


Рис. 2. Долгосрочный прогноз стоимости владения балкером типа Panamax, использующим различные виды альтернативных топлив

Метанол. Экологичность метанола напрямую зависит от медленно развивающихся технологий улавливания углерода и доступности возобновляемого водорода, применяемых при его производстве. Его производство сопряжено с растущими затратами на электролизеры и дефицитом биогенного CO_2 . В результате стоимость экологически чистого метанола оценивается в 2–4 раза выше, чем у традиционного ископаемого топлива.

Аммиак. Несмотря на статус альтернативного топлива с нулевыми выбросами, аммиак обладает рядом опасных свойств, включая токсичность и коррозионную активность. В настоящий момент его производство реализуется крупными энергетическими компаниями, ориентированными на мировые энергетические рынки, а не на судовой бункерный рынок. Совокупность этих факторов ограничивает его потенциальное применение в морской отрасли.

Водород. Водород как топливо с нулевым уровнем выбросов ПГ несет в себе серьезные проблемы, обусловленные его физико-химическими свойствами. Они включают высокие риски для безопасности и отсутствие готовых решений для применения на судах, что, в свою очередь, препятствует развитию его бункеровочной инфраструктуры.

Эти альтернативные виды топлива (метанол, аммиак, водород) не обеспечат значительной декарбонизации до 2040 г. и не могут служить надежной основой для планирования судостроения в ближайшей перспективе. Их внедрение остается стратегическим фактором для мониторинга. Принудительное регулирование в случае этих топлив в совокупности с отсутствием единого применимого для всех судовладельцев решения повлечет за собой лишь высокие затраты на соблюдение требований и в будущем и искажение конкурентной динамики рынка.

СПГ. Как показывает статистика портфеля заказанных судов (рис. 3, 4), сжиженный природный газ (далее — СПГ) представляет собой прагматичную и экологически более чистую альтернативу традиционному судовому топливу, предлагая относительно низкие первоначальные капитальные затраты и развитую глобальную цепочку поставок. Его прогнозируемая экономика и растущая инфраструктура, включающая более 190 портов, в которых реализована услуга бункеровки СПГ, делают его надежным решением для последующего внедрения безуглеродных судовых топлив. Это подтверждается тем, что около 70 % заказанных судов на альтернативном топливе будут использовать СПГ в качестве топлива. Кроме того, СПГ создает стратегический задел для будущего перехода на устойчивые топлива, выступая сырьем для производства водорода и аммиака.



Рис. 3. Доля судов в портфеле заказов, использующих альтернативные виды топлив



Рис. 4. Доля различных видов альтернативных топлив в портфеле заказанных судов

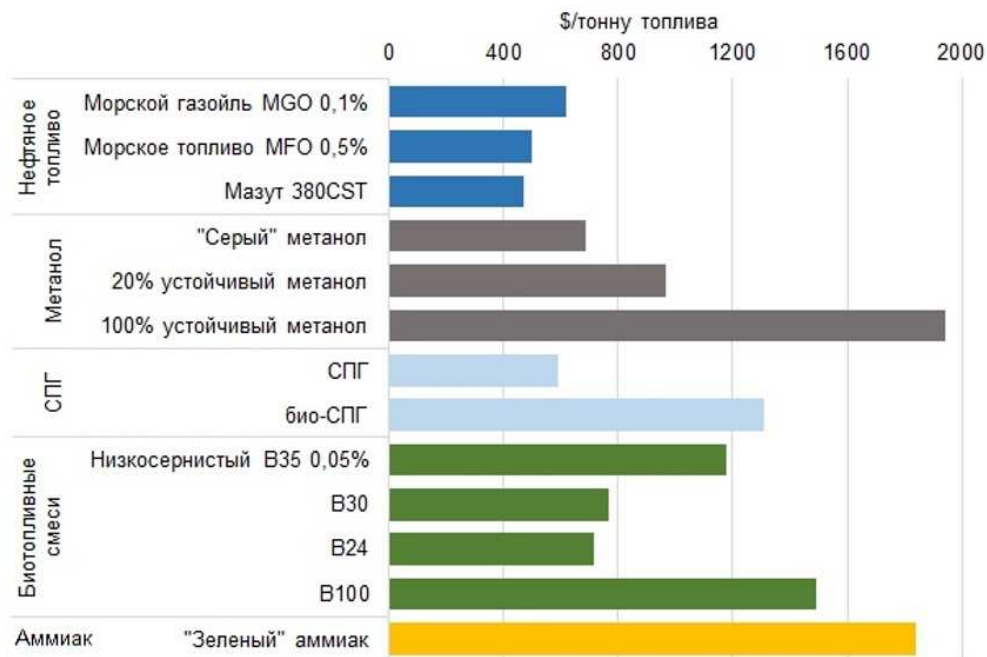


Рис. 5. Стоимость морских бункерных топлив (апрель 2025 г.)

Технологии повышения энергоэффективности (ЭЭТ) и улавливания CO₂ (OCCS) расширяют возможности использования СПГ

СПГ, не являясь топливом с нулевыми выбросами, служит практичным переходным решением в рамках долгосрочной стратегии декарбонизации. Различные технологии повышения энергоэффективности (energy efficiency technology — EET, далее — ЭЭТ), уже примененные почти на половине нефтеналивных, контейнерных и навалочных судов [1–4] (рис. 6), и развивающиеся технологии улавливания углерода на судах (onboard carbon capture systems — OCCS) призваны обеспечить снижение выбросов ПГ с судов до момента появления масштабируемых безуглеродных решений.

Несмотря на растущую нормативную поддержку, например со стороны FuelEU Maritime (безуглеродное регулирование ЕС, которое вступило в силу с 1 января 2025 г.), готовность судоходной и судостроительной отраслей к внедрению этих технологий существенно варьируется в зависимости от типа транспортного судна.

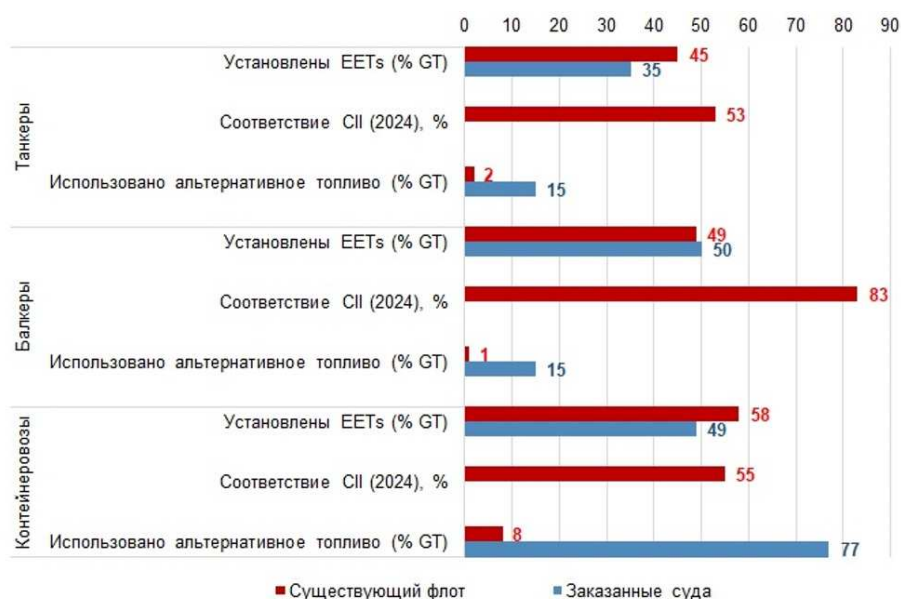


Рис. 6. Статистика готовности некоторых типов судов к декарбонизации по выбранным критериям применения ЭЭТ, соответствия СИ и использования альтернативных топлив

Еще одним негативным фактором, который необходимо принимать во внимание, является ограниченность доступных мировых мощностей судостроительных предприятий. Согласно реалистичным сценариям от ABS, к 2028–2030 гг. мировые судостроительные мощности по модернизации будут полностью загружены. Без появления новых мощностей это потенциально создаст проблему, из-за которой многие владельцы могут остаться без возможности соблюдения требований, если они не заключат контракт на постройку уже сейчас.

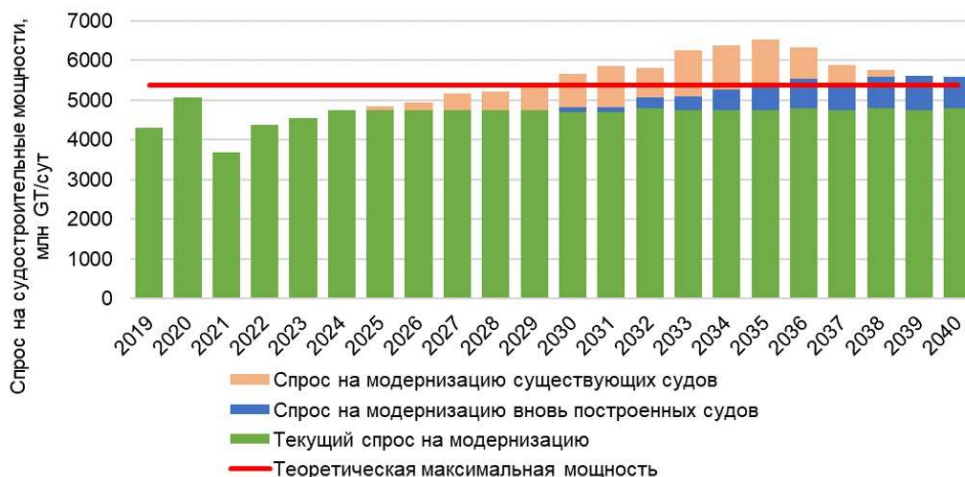


Рис. 7. Прогнозируемый дефицит производственных мощностей судостроительных предприятий

Ядерная энергетика — многообещающий способ сократить выбросы ПГ на морских судах

Ядерные технологии [5], в частности разрабатываемые сейчас газоохлаждаемые, солевые и малые модульные реакторы, характеризуются практически нулевым уровнем выбросов и устойчивостью к колебаниям рынка экологически чистого топлива. Разработка плавучих атомных электростанций создает предпосылки для их интеграции в судоходство, с перспективой практического внедрения в 2030-х гг. Однако масштабированию технологии препятствуют необходимость развития страховых механизмов, обновления нормативной базы и обеспечения общественного признания. Важным шагом в этом направлении стало решение ИМО о пересмотре Кодекса по безопасности ядерных торговых судов, который был принят Ассамблеей ИМО в 1981 г. Преодоление указанных барьеров остается ключевым условием коммерческого применения атомных решений в коммерческом судоходстве.

ДЕКАРБОНИЗАЦИЯ МОРСКОГО СУДОХОДСТВА

Декарбонизация судоходства в настоящий момент представляется в виде слабо организованной гонки, в рамках которой за четверть века необходимо добиться существенного снижения выбросов ПГ с судов, что потребует значительных средств и, что самое сложное, в настоящий момент не имеет конкретных технических решений. Между климатическими целями и жизненными реалиями существует разрыв, и неясно, возможно ли в ближайшем будущем синхронизировать политику, технологии и капитал, чтобы этот разрыв преодолеть.

В данном подразделе анализируются факторы, определяющие происходящую трансформацию судоходной отрасли: нормативная база, количественная оценка несоответствия текущего уровня выбросов ПГ глобальным целям, рыночные сигналы и архитектура рисков. Представленная оценка выявляет системные проблемы и определяет практические пути соответствия отраслевым требованиям.

1. Ужесточающаяся система регулирования, глобальные, региональные и местные меры по декарбонизации

Ожидается, что нормативно-правовая база в 2026 г. будет одновременно более динамичной, фрагментированной и действенной, чем когда-либо прежде. В табл. 1 представлено текущее состояние дел [6–8].

Таблица 1

Нормативно-правовая база декарбонизации в 2025 г.

Уровень	Ключевые меры	Цели (2025–2030)
Глобальный	Программа «чистого нуля» ИМО (Net Zero Framework) с целями снижения выбросов ПГ на 20 % и 70 % в 2030 и 2040 гг. соответственно	Устанавливает обязательные меры по снижению выбросов ПГ для морских судов, совершающих международные рейсы, валовой вместимостью более 5000
	Интенсивность топливных выбросов парниковых газов (далее — ИТПВГ — GFI). Топливный стандарт «от скважины до винта» (WtW)	Внедряет отчетность о выбросах ПГ в течение всего жизненного цикла судового топлива во всем мире, стимулируя переход с любого ископаемого на т.н. «устойчивое» (sustainable) судовое топливо
Региональный	Система торговли выбросами ЕС (EU ETS) учитывает 100 % внутренних перевозок и 50 % внешних перевозок в ЕС	Штрафы на выбросы ПГ для рейсов, связанных с ЕС, существенно повышают эксплуатационные расходы для судов, использующих ископаемое топливо
	FuelEU Maritime имеет целью снижение выбросов в рамках цепочки WtW для судовых топлив от –2 % в 2025 г. до –80 % в 2050 г.	Меры вынуждают судовладельцев переходить на блендинговые сорта топлива с постепенным замещением ископаемого топлива углеродно-нейтральным биотопливом
	Система торговли выбросами Великобритании, UK ETS, в методическом смысле аналогична EU ETS	Штрафы на выбросы ПГ на рейсах, связанных с Великобританией, существенно повышают эксплуатационные расходы на ископаемое топливо

Принятая в июле 2023 г. пересмотренная стратегия ИМО устанавливает в качестве официальной цели достижение судоходством нулевых выбросов ПГ к 2050 г. с промежуточными ориентирами: сокращение на 20 % к 2030 г. и на 70 % к 2040 г. относительно уровня 2008 г. (рис. 8).

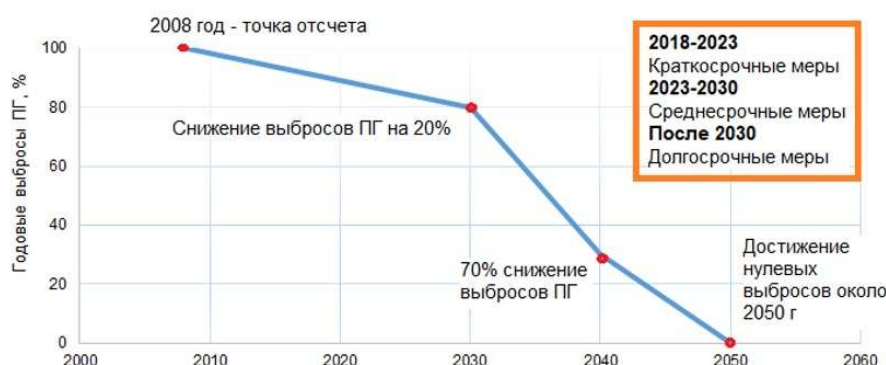


Рис. 8. Контрольные точки и цели ИМО

Хотя текущее регулирование, используемое в ИМО (показатель эксплуатационной эффективности существующих судов ЕЕХИ и коэффициент выбросов углерода СИ), закладывает основу для декарбонизации отрасли, данные меры охватывают только технические и эксплуатационные аспекты морских судов. Несмотря на то, что введение этих мер привело к снижению выбросов ПГ, их недостаточно, чтобы добиться весьма амбициозных целей ИМО. Поэтому в настоящий момент выполняется резкий переход к системе «чистого нуля ИМО» (IMO Net-Zero Framework — IMO NZF), основанной на WtW-методологии учета выбросов ПГ для оценки выбросов полного жизненного цикла для всех видов судовых топлив [6–8]. Ключевым показателем в этой системе станет индекс топливных выбросов парниковых газов (ИТВПГ — GFI), смещающий фокус регулирования с операционной эффективности судна на углеродоемкость используемого им топлива. Стандарт ИТВПГ — GFI — это регулирование углеродоемкости топлива, применяемое к судам валовой вместимостью 5000 т и выше. ИТВПГ представляет собой основополагающий элемент более широкой программы ИМО по декарбонизации. При его определении используется методология WtW, учитывающая выбросы ПГ на протяжении всего жизненного цикла судового топлива (от производства и транспортировки до сжигания на борту), что создает всеобъемлющую основу для оценки соответствия (рис. 9). Судам необходимо будет ежегодно рассчитывать значения фактической годовой интенсивности топливных выбросов ПГ, выражаемой в CO_2 -эквиваленте / МДж энергии.



Рис. 9. Интенсивность выбросов ПГ для цепочки производства и поставки судового топлива¹

¹ Изображения из открытых источников сети интернет: <https://tass.ru/opinions/7784345>, <https://prommoscow.info/exhibition/gasolineplant-mnpz>, https://world.lib.ru/t/trahtenberg_r_m/gorodaigody-69.shtml, https://www.researchgate.net/publication/329809693_Bunkering_Incidents_and_Safety_Practices_in_Turkey_Oil_Spill_Alone_The_Turkish_Straits_Sea_Area_Accidents_Environmental_Pollution_Socio-Economic_Impacts_and_Protection/figures?lo=1, <https://www.istic.illinois.edu/research/energy> (дата обращения 21.05.2025).

При расчете ИТВПГ учитываются количество и интенсивность выбросов за весь жизненный цикл каждого вида потребленного на судне топлива. Фактическая интенсивность выбросов ИТВПГ сравнивается с двумя значениями: целевым годовым ИТВПГ — «базовым целевым показателем» — и «целевым показателем прямого действия» (значения ежегодно ужесточаются и установлены в Правиле 35 Приложения VI МАРПОЛ на период с 2028 до 2035 г., а также для 2040 г.), таким образом будет определяться баланс соответствия судна.

В тех случаях, когда фактическая ИТВПГ судна больше целевой ИТВПГ прямого действия, но меньше базовой ИТВПГ (т.н. дефицит уровня 1 — желтая зона на рис. 10) или когда она больше базовой целевой ИТВПГ (т.н. дефицит уровня 2 — красная зона на рис. 10), судно должно компенсировать в Фонд чистых нулевых выбросов ИМО (IMO Net-Zero Fund) разницу компенсационными единицами. Стоимость компенсационных единиц на период 2028–2030 гг. установлена в Правиле 36 Приложения VI в размере:

- 100 долл. США за тонну CO₂-эквивалента для уровня 1;
- 380 долл. США за тонну CO₂-эквивалента для уровня 2.

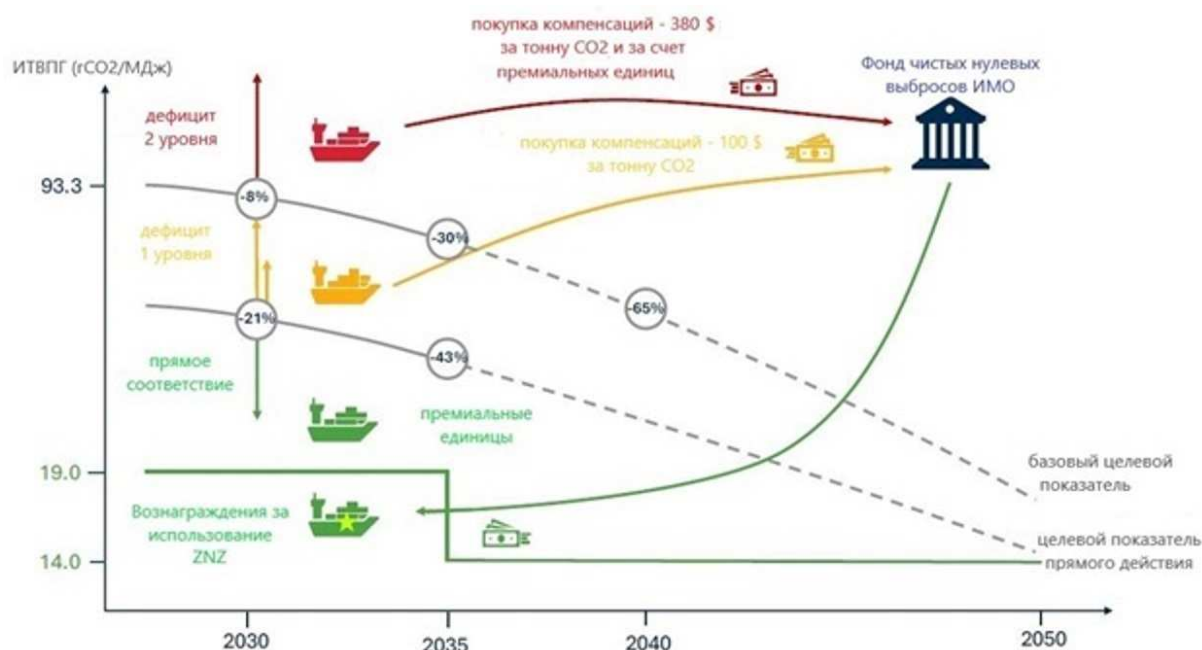


Рис. 10. Регулирование углеродоемкости судового топлива ИМО

В тех случаях, когда фактическая ИТВПГ судна меньше целевой ИТВПГ прямого действия (прямое соответствие — зеленая зона на рис. 10), судно считается соответствующим, и ему начисляются премиальные единицы. Ими можно покрывать дефицит соответствия на уровне 2 в последующие отчетные периоды или передавать другим судам для покрытия соответствия.

Суда, использующие топливо с нулевым или близким к нулевому уровнем выбросов ПГ (Zero or Near-Zero — ZNZ), могут претендовать на финансовые компенсации из Фонда чистых нулевых выбросов ИМО (на рис. 10 — зеленая зона ниже зеленой линии).

Помимо компенсаций, средства из Фонда предполагается расходовать на научные исследования, содействие справедливому энергопереходу и т.п.

В рамках реализации стратегии ИМО предполагается необходимость подачи отчетных документов, включая План управления энергоэффективностью судна (SEEMP — ПУЭС), в Администрацию или признанную организацию для проверки расчетов, подтверждения соответствия, выдачи подтверждающего судового документа и поставки в ИМО данных о премиальных единицах, подлежащих учету.

Кроме того, примечательной особенностью системы ИТВПГ является интеграция в нее системы финансирования в области климата. Выручка от продажи компенсационных единиц зарезервирована для проектов, связанных с изменением климата, в развивающихся странах. По мере того как продолжают реализовываться глобальные планы по декарбонизации, региональные нормативные акты уже оказывают ощутимое влияние на эксплуатацию судов. Система торговли квотами Европейского союза с 2025 г. включает морской транспорт, применяя цены на выбросы углерода как к перевозкам внутри ЕС (со 100%-ным охватом выбросов), так и к международным перевозкам в порты ЕС или из них (с 50%-ным охватом). Поэтапное

внедрение, охватывающее 40 % выбросов ПГ в 2024 г. и выходящее на полный охват к 2026 г., глубоко меняет экономический ландшафт для ведения деятельности в европейских водах.

Параллельно с этим в 2025 г. вступил в силу закон ЕС FuelEU Maritime, предусматривающий постепенное ужесточение мер по снижению выбросов ПГ в отношении энергии, используемой на судне (основанный на подходе WtW). Как показано на рис. 11, начиная с 2%-ного сокращения в 2025 г. регулирование направлено на достижение 80%-ного сокращения выбросов к 2050 г., что по задумке авторов должно привести к переходу на топливо с нулевыми или почти нулевыми выбросами ПГ.



Рис. 11. Траектория снижения выбросов ПГ FuelEU Maritime

Таким образом, влияние все более усложняющейся нормативно-правовой базы больше не является чем-то отдаленным. По мере того как нормативные акты вступают в силу, а правоприменительная практика ужесточается, соблюдение этих требований становится реальным фактором, препятствующим принятию коммерческих решений. От проектирования судов и выбора топлива до условий фрахтования и инвестиционных потоков соблюдение этих требований является неотъемлемой частью любого стратегического выбора.

2. Рынок морских перевозок усиливает регулирующее воздействие

Грузовладельцы, финансисты, фрахтователи и поставщики топлива формируют рынок, на котором показатели выбросов ПГ являются конкурентной переменной (табл. 2). Формируемое ими давление на морской рынок перевозок превращает процесс декарбонизации из затрат на соблюдение требований в стратегический источник дохода и финансирования [9].

Таблица 2

Реакция рынка на регулирующие меры

Участники рынка	Меры в 2024–2025 гг.	Влияние в 2025–2030 гг.
Грузовладельцы	«Коалиция грузовладельцев за суда с нулевым выбросом» (coZEV) в настоящее время охватывает флот контейнеровозов грузоместимостью более 35 млн TEU, некоторые бренды спонсируют создание «зеленых коридоров» между портами	Контракты на перевозку грузов расширяются, что приводит к снижению затрат
Финансовый сектор	> 70 % долговых обязательств судоходства связаны с кредитованием, обусловленным декарбонизацией судоходства	Экологичные суда приносят более низкий доход
Инвесторы	Удвоилось число чартерных договоров, а чартерные ставки начинают учитывать выбросы ПГ для конкретных судов	Прогнозируется, что разрыв в чартерных ставках между судами с рейтингами СП А, В и судами с рейтингами С, D составит 10–15 %
Поставщики топлива	В настоящее время в 15 портах осуществляется бункеровка метанолом, в 2024 г. подписано 13 соглашений о перевалке бункерного СПГ и аммиака	К 2030 г. доля альтернативного топлива может вырасти с 2 % до 10 % от всего рынка бункерного топлива.

3. Сближение политики, рынка и технологий

К середине десятилетия принимаемые в ЕС региональные меры могут повысить стоимость обычного топлива на европейских рынках примерно на 90–120 долл. США за тонну. В случае введения глобальных мер ИМО сборы ИТВПГ еще больше удорожают судовое топливо. Операторы, которые переходят на соответствующее требованиям топливо и/или получают дополнительные компенсационные единицы, окажутся в более выгодном положении только в том случае, если стоимость альтернативного топлива вкупе с его экономией и выгодой от реализации премиальных единиц смогут покрыть эти сборы.

3.1. Изменение стоимости судов

Более 50 % тоннажа строящихся судов будут использовать альтернативное топливо, что отражает усилия отрасли по обеспечению надежности новых активов в будущем. Суда, использующие различные технологии по повышению эффективности, как правило, имеют наценку при перепродаже порядка 5–10 % по сравнению с традиционными судами. При этом последние подвержены риску снижения стоимости на вторичном рынке и преждевременного списания.

3.2. Расширение масштабов применения технологий

Расширение масштабов применения ЭЭТ, связанных с использованием ветра, воздушной смазки и др., происходит в соответствии с требованиями законодательства для поддержания старого тоннажа в соответствии с нормативными требованиями (рис. 12). В настоящее время вводятся в эксплуатацию двухтопливные двигатели на аммиаке и метаноле, а первые пилотные проекты по улавливанию CO₂ на борту указывают на будущие пути снижения выбросов.

ЛОГИСТИКА	ГИДРОДИНАМИКА	ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ	ИСПОЛЬЗУЕМАЯ ЭНЕРГИЯ	ПОСЛЕДУЮЩЕЕ УЛАВЛИВАНИЕ	СОЛНЕЧНАЯ И ВЕТРОВАЯ ЭНЕРГЕТИКА
СНИЖЕНИЕ СКОРОСТИ	АНТИОБРАСТАЮЩИЕ ПОКРЫТИЯ КОРПУСА	ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДВИГАТЕЛЕЙ	СПГ	СИСТЕМЫ УЛАВЛИВАНИЯ И ХРАНЕНИЯ УГЛЕРОДА НА СУДАХ	СОЛНЕЧНЫЕ БАТАРЕИ, РОТОРНЫЕ ПАРУСА, ЖЕСТКИЕ ПАРУСА
ОПТИМИЗАЦИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СУДОВ	ОПТИМИЗАЦИЯ ФОРМЫ КОРПУСА И РАБОТЫ ВИНТА	РЕКУПЕРАЦИЯ ОТРАБОТАННОГО ТЕПЛА	БИОТОПЛИВО		
УКРУПНЕНИЕ СУДОВ	ВОЗДУШНАЯ СМАЗКА КОРПУСА	ОГРАНИЧЕНИЕ МОЩНОСТИ ДВИГАТЕЛЯ	МЕТАНОЛ		
АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ МАРШРУТЫ	ОЧИСТКА КОРПУСА	ГИБРИДНЫЕ АККУМУЛЯТОРНЫЕ СИСТЕМЫ	АММИАК		
			ВОДОРОД		
		ТОПЛИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ	БЕРЕГОВОЕ ПИТАНИЕ		
			ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГИЯ		
>20%	5 – 15%	5 – 20%	0 – 100%	0 – 90%	0 – 15%

Рис. 12. Способы сокращения выбросов ПГ и потенциал их снижения

3.3. Фонд чистых нулевых выбросов ИМО (IMO Net-Zero Fund)

По задумке ИМО, Фонд финансово поддержит исследования и разработки, инфраструктуру и справедливые переходные меры, которые потенциально позволяют реализовать новые проекты. Поскольку морская отрасль находится на пороге серьезных преобразований и в связи с ужесточением регулирования в области декарбонизации во всем мире и введением налога на выбросы углерода, затраты на соблюдение требований, по прогнозам, существенно возрастут уже к 2035 г. Это регуляторное давление изменит структуру потребления топлива и инвестиции в существующий флот судов, стимулируя расширение использования экологически чистых видов топлива и передовых технологий по мере того, как «зеленое» финансирование набирает обороты, предлагая стратегическую поддержку активным заинтересованным сторонам. Исследование содержит основанную на данных перспективу в пяти ключевых областях: регулирование, топливо, технологии, инфраструктура и динамика рынка, — которая позволяет составить

прогноз на предстоящее десятилетие. В нем содержится критический анализ прогресса морской отрасли в достижении нулевого уровня выбросов, а также оценка баланса между амбициозными целями и фактической реализацией.

4. Достижение целей по сокращению выбросов ПГ реально?

Несмотря на амбициозные цели, установленные ИМО и региональными властями, морская отрасль сталкивается со значительными трудностями в сокращении выбросов ПГ. Далее будет рассмотрена и представлена оценка текущих тенденций в области выбросов углекислого газа (CO₂), модернизации флота и внедрения альтернативных видов топлива. Также рассматриваются технологические, нормативные и экономические барьеры, препятствующие процессу.

4.1. Система показателей декарбонизации

Оценка прогресса судоходной отрасли в области снижения выбросов ПГ должна учитывать следующие критерии:

- внедрение ЭЭТ;
- переход на альтернативные виды топлива;
- соблюдение нормативов выбросов по показателю углеродоемкости (СИ);
- сравнительный анализ выбросов ПГ.

В табл. 3 каждому из этих аспектов присвоена оценка. Выбросы в судоходстве продолжают расти. В 2024 г. уровень выбросов CO₂ в атмосферу достиг 121 % от уровня 2008 г., несмотря на повышение интенсивности [10–13], что свидетельствует о том, что рост спроса опережает повышение операционной эффективности. Следующие пять лет определят, можно ли скорректировать траекторию или будет пропущен контрольный пункт ИМО, установленный к 2030 г.

Таблица 3

Реакция рынка на регулирующие меры в 2024 г.

Критерий	Показатель	Оценка, %	Источник
Применение ЭЭТ	Суда	11,3	Clarksons Research
	валовая вместимость	57	
Применение альтернативных топлив*	Суда	3	
	валовая вместимость	8	
Соответствие нормативной базе (СИ)	рейтинг СИ	66 (рейтинги А, В, С)	ABS
Сравнительный анализ выбросов	выбросы в рамках цепочки WtW	121 (по сравнению с 2008)	
* Включая нотацию «... ready» в символе класса.			

4.2. Текущий прогресс: выбросы CO₂, модернизация судов в эксплуатации и внедрение новых видов топлив

На долю морских перевозок приходится примерно 3 % глобальных выбросов ПГ [6–8]. Сокращение этих выбросов остается сложной задачей для отрасли, как показано на рис. 13. Несмотря на повышение энергоэффективности судов, углеродный след в отрасли сохраняется. Если смотреть с точки зрения операционной эффективности, то уровень выбросов в зависимости от грузоподъемности и расстояния (транспортной работы) за последние несколько лет практически не изменился.

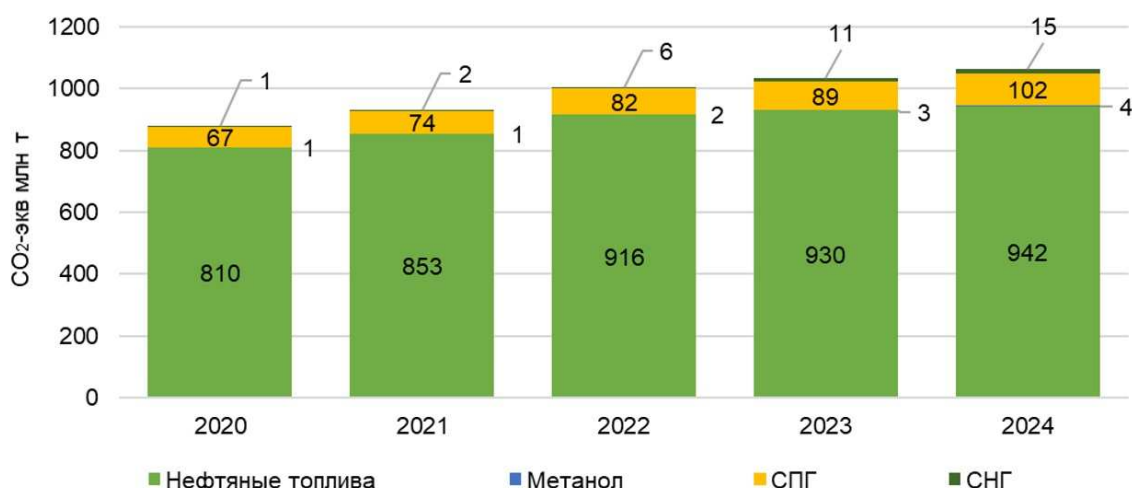


Рис. 13. Выбросы ПГ морским транспортом в 2020–2024 гг.

Данные рис. 14а показывают, что 65–67 % мирового флота соответствуют требованиям индекса СП, имея рейтинги А, В или С. В целях выполнения нормативных требований, включая FuelEU Maritime и систему «чистого нуля» ИМО, судовладельцы активно модернизируют суда путем установки двухтопливных двигателей, использующих СПГ или метанол в качестве топлива. Утверждение на КЗМС 83 плана разработки нормативной базы для бортовых систем улавливания углерода (OCCS) создает дополнительные стимулы для внедрения данных технологий в отрасли.

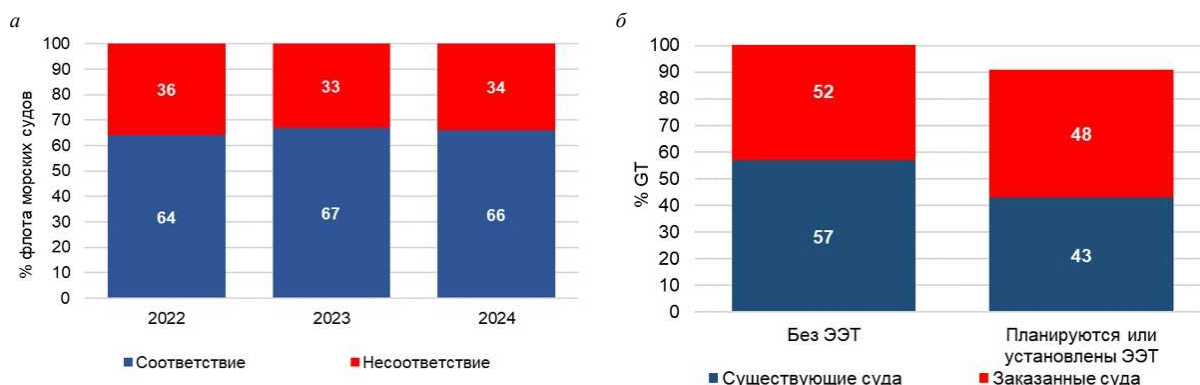


Рис. 14. Процент соответствия СП судов мирового флота (а); применение ЭЭТ на существующих и строящихся судах (б)

Модернизация судов при помощи ЭЭТ давно стала отраслевым стандартом для соблюдения экологических норм и снижения расхода топлива. Широко внедряются ветропропульсивные установки (далее — ВПУ) и системы воздушной смазки, позволяющие снизить нагрузку на главные двигатели, а также применяются операционные меры, такие как оптимизация маршрутов движения судна и дифферента. Согласно данным Clarkson Research, около 11 % судов мирового флота (почти 43 % по тоннажу) уже оснащены ЭЭТ, что демонстрирует растущий тренд на экологизацию отрасли.

Анализ текущего портфеля заказов свидетельствует о структурном сдвиге в сторону экологизации судоходства. Около 34 % заказанных судов планируется оснастить ЭЭТ, что составляет 48 % от общего тоннажа новых судов. Доля альтернативных видов топлива в новых заказах достигла 35 % в 2024 г. [13], при этом СПГ сохраняет лидирующие позиции с 70 % в сегменте силовых установок, использующих альтернативное топливо. В 2024 г. было заказано около 400 судов на СПГ, что существенно превышает показатели метанола (130 заказов) и аммиака (30 проектов). Метанол привлекателен благодаря совместимости с существующими энергетическими установками, тогда как аммиак рассматривается как перспективное решение с нулевым уровнем выбросов, несмотря на его опасность (токсичен). Указанные тенденции наглядно отражены на рис. 15.



Рис. 15. Доля различных видов альтернативных топлив в портфеле заказов

Регуляторные инициативы становятся ключевым драйвером перехода на альтернативные виды топлива в судоходстве. Наряду с международными стандартами, значительную роль играют региональные программы, такие как требование Норвегии к нулевым выбросам паромов в фьордах, внесенных в список Всемирного наследия ЮНЕСКО, к 2026 г. Данный мандат уже стимулировал внедрение гибридных аккумуляторных систем и позволил местным операторам паромных линий добиться существенного снижения выбросов CO₂ на местных маршрутах. Этот пример демонстрирует эффективность целевых региональных мер в ускорении технологической трансформации отрасли.

4.3. Прогноз спроса на энергию и выбросы CO₂ морским транспортом

Основной прирост мирового населения в ближайшие десятилетия будет обеспечиваться развивающимися странами (рис. 16). Поскольку для реализации их демографического потенциала и роста доходов потребуются десятилетия, это окажет сдерживающее влияние на рост спроса на грузоперевозки. Ожидается, что данный фактор в сочетании с внедрением низкоуглеродных технологий и топлив приведет к стабилизации общего объема потребления топлива и снижению выбросов CO₂ к 2050 г. Достижение целей ИМО по нулевым выбросам будет напрямую зависеть от скорости внедрения альтернативных видов топлива и развития сопутствующей инфраструктуры.

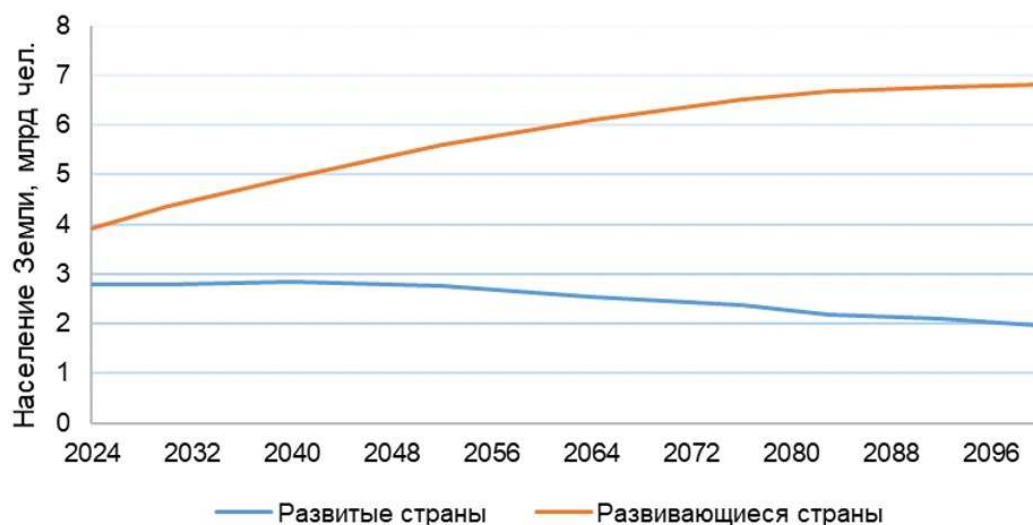


Рис. 16. Прогноз роста населения Земли в развитых и развивающихся странах

4.4. Препятствия на пути сокращения выбросов: проблемы развития, нормативно-правовая база и экономика

А. Технологические ограничения.

Внедрение безуглеродных видов топлива, таких как аммиак и водород, сдерживается технологическими сложностями и неразвитой бункеровочной инфраструктурой. В то время как мировая сеть бункеровки СПГ охватывает около 190 портов, создание аналогичных цепочек для новых видов топлива находится на начальной стадии, что создает ключевой инфраструктурный барьер, как это было с СПГ около 10–15 лет назад.

В. Неопределенность в регулировании.

Несмотря на амбициозность целей ИМО по сокращению выбросов, механизмы их достижения требуют дальнейшей детализации.

С. Экономические ограничения.

Широкому переходу на альтернативные виды топлива препятствует значительная разница в цене: стоимость экологичного метанола и аммиака в 2–3 раза превышает цену традиционного топлива. Дополнительным фактором являются низкие темпы пополнения и вывода из эксплуатации флота транспортных судов, где длительный жизненный цикл судов (25–30 лет) замедляет эффект от обновления.

4.5. Готовность судоходной отрасли

Анализ готовности ключевых сегментов морского флота транспортных судов (контейнеровозы, сухогрузы, танкеры) выявляет разнородную картину. Наибольший прогресс наблюдается в контейнерных перевозках, где до 80 % новых судов в портфеле заказов проектируются под альтернативные виды топлива, тогда как другие сегменты демонстрируют более медленные темпы адаптации.

Широкое внедрение ЭЭТ на существующих судах мирового флота является ключевым достижением, однако в списке заказанных судов их доля снижается. Это свидетельствует о том, что судовладельцы рассматривают ЭЭТ и переход на альтернативное топливо как частично взаимоисключающие инвестиции в контексте выполнения нормативных требований.

Несмотря на текущее соответствие большинства судов индексу СП, сама по себе эта мера является временной. Начиная с 2030 г., дальнейшее ужесточение целей ИМО по сокращению выбросов потребует не просто соответствия, а масштабного перехода на безуглеродные топлива, для чего текущих отраслевых усилий остается недостаточно.

5. Роль регулирования и затраты на соблюдение требований

Регуляторные механизмы ИМО и ЕС по декарбонизации судоходства используют один и тот же методический подход «от скважины до винта», включающий укрупненный учет выбросов «от скважины до танка» (WtT), оценивающий выбросы по всему жизненному циклу топлива (произведенные до того, как топливо попало на судно), и «от танка до винта» (TtW), учитывающий прямые выбросы судна (рис. 17, табл. 4).

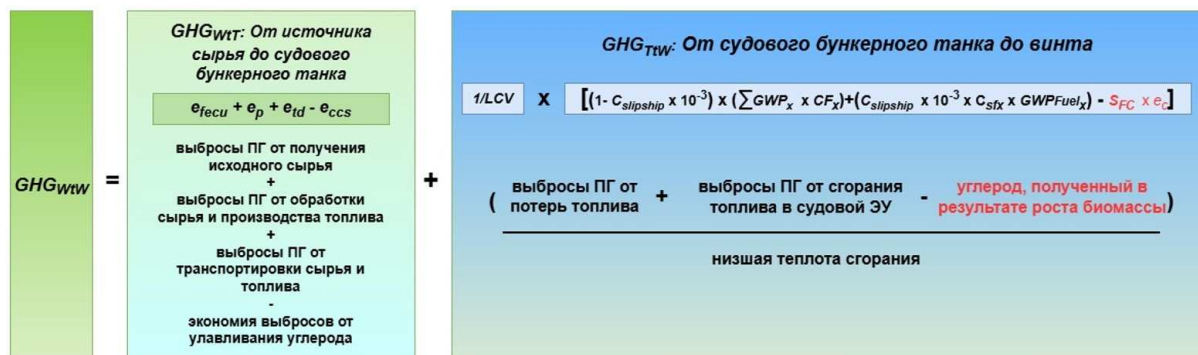


Рис. 17. Суммарное значение выбросов ПГ для топлива или его составляющих, образующихся в результате его жизненного цикла

Таблица 4

Категории нормативного регулирования, направленного на декарбонизацию морского судоходства	
Меры для реализации методологии TtW	Меры для реализации методологии WtW
Показатель эксплуатационной углеродоемкости ИМО (СИ)	Регламент Европейского союза по декарбонизации морского судоходства (FuelEU Maritime)
Система торговли углеродными квотами Евросоюза (EU ETS)	Система «чистого нуля» ИМО (IMO NZF), Интенсивность топливных выбросов ПГ (ИТВПГ — GFI)

Хотя меры TtW проще в реализации, именно переход на WtW-совместимое топливо является необходимым условием для достижения долгосрочных климатических целей ИМО. Отдельные решения, такие как бортовое улавливание углерода (Onboard carbon capture systems — OCCS) или использование ветропропульсивных установок (Wind Propulsion System — WPS — ВПУ), учитывают путем введения специальных редуцированных коэффициентов в нормативных актах и методиках (например, в FuelEU Maritime), что создает дополнительные стимулы для инвестирования в них.

6. Тенденции международного судоходства ИМО по выбросам ПГ

Краткосрочные меры ИМО, включающие коэффициент энергоэффективности существующих судов (EEXI) и показатель углеродоемкости (СИ), поспособствовали снижению углеродоемкости судоходства. Несмотря на рост общих выбросов ПГ с 886 млн т в 2008 г. до 900 млн т в 2018 г., углеродоемкость по показателю эксплуатационной эффективности судов (Annual Efficiency Ratio — AER) снизилась на 21 %, а по показателю энергетической эффективности во время работы судна (Energy Efficiency Operational Indicator — EEOI) — на 29 %. Дальнейшее применение этих мер в 2021–2023 гг. привело к дополнительному снижению углеродоемкости на 4–8 %. По данным системы сбора данных ИМО (IMO DCS) за 2023 г., более 75 % судов мирового флота соответствуют требованиям СИ, имея рейтинг «С» или выше. Важно отметить, что СИ основан на показателе (Annual Efficiency Ratio — AER) (рис. 18, 19), отражающем интенсивность выбросов, а не абсолютный объем потребляемого топлива.

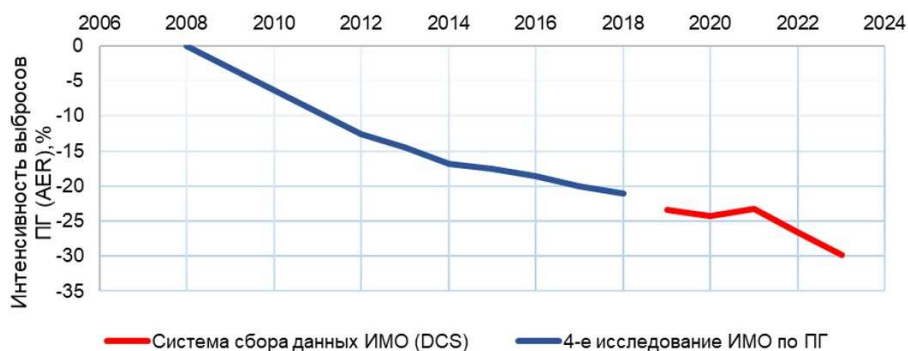


Рис. 18. Снижение выбросов ПГ на судах по данным ИМО



Рис. 19. Рейтинги СИ на судах в 2023 г.

Согласно данным ИМО DCS, представленным на рис. 20а, потребление мазута в 2023 г. сократилось на 1 %, тогда как использование биотоплив продемонстрировало рост на 73 %. Несмотря на значительные темпы роста, доля биотоплив в общем энергобалансе отрасли остается незначительной и составляет лишь 0,2 %.

Действующие меры регулирования ЕС, включая систему ETS и FuelEU Maritime, имеют ограниченное влияние на судовладельцев в силу следующих факторов:

- географическая ограниченность действия;
- возможность переложения затрат по ETS на фрахтователей;
- неопределенность гармонизации с перспективными мерами ИМО.

В этой связи ключевое значение приобретает анализ глобальных последствий готовящихся среднесрочных мер ИМО, которые, как ожидается, станут системным драйвером для широкомасштабного внедрения низкоуглеродных технологий, альтернативных видов топлива и развития соответствующей инфраструктуры [14, 15].

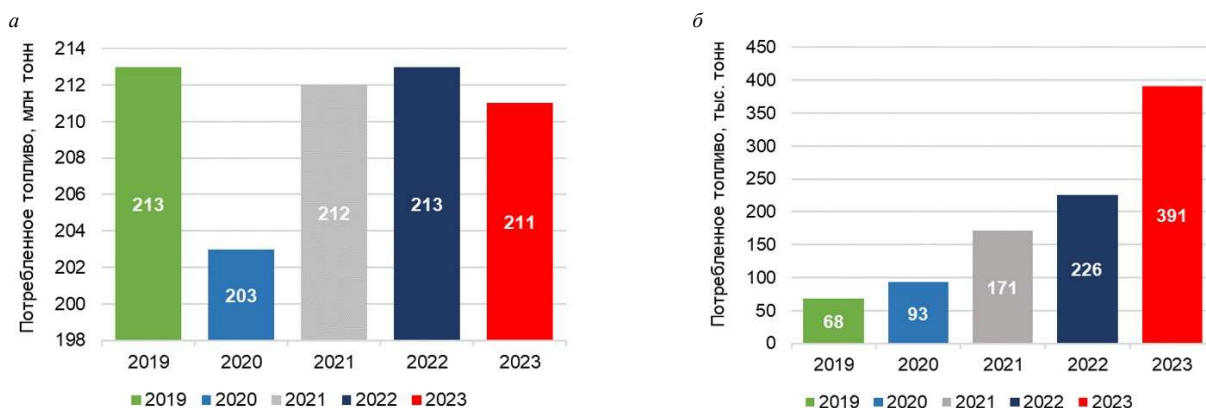


Рис. 20. Данные ИМО по потребленному нефтяному топливу (а) и потребленному биотопливу (б)

6.1. Среднесрочные меры ИМО по соблюдению глобальных требований. Система «чистого нуля» ИМО

Глобальный механизм ценообразования на выбросы ИМО, разработанный в рамках системы «чистого нуля» ИМО (IMO Net Zero Framework), станет ключевым драйвером перехода на низкоуглеродные виды топлива в судоходстве. В отличие от региональных аналогов, NZF использует двухуровневую систему компенсационных единиц по фиксированным ценам до 2030 г.: 100 долл. США за тонну CO₂-экв. для прямых выбросов и 380 долл. США за тонну CO₂-экв. для базовых. Дополнительным стимулом служит премирование использования топлива с углеродоемкостью ниже 19 г CO₂-экв./МДж. Прогнозная динамика штрафных санкций демонстрирует существенное влияние на операционные расходы: при суточном потреблении VLSFO 30 т/сут суточные операционные расходы вырастут с примерно 4200 долл. США в 2028 г. до 15 000 долл. США к 2035 г. Для крупнотоннажных судов с расходом 50 т топлива в сутки соответствующие расходы составят 6000 долл. США и 25 000 долл. США; результаты расчетов представлены на рис. 21.

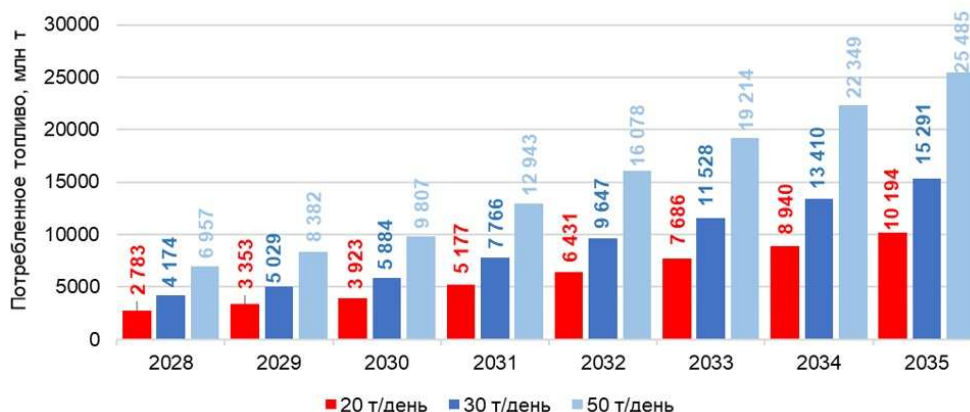


Рис. 21. Прогноз увеличения суточных операционных расходов к 2035 г. в случае принятия системы «чистого нуля» ИМО (кроме ЕС)

Отсутствие определенности в отношении стоимости компенсационных единиц после 2030 г. ограничивает долгосрочное прогнозирование, однако очевидно, что дальнейший рост цен на углеродные единицы приведет к дополнительному увеличению финансовой нагрузки на судовладельцев.

Сравнение финансовой нагрузки регуляторных механизмов декарбонизации

Для судов, работающих в юрисдикции ЕС, с 2028 г. совокупная финансовая нагрузка будет формироваться под воздействием трех ключевых мер: глобального механизма ИМО (NZF), системы ETS ЕС и регламента FuelEU Maritime. Согласно прогнозу для судна с суточным потреблением 30 т/сут VLSFO, динамика затрат имеет следующую структуру: EU ETS доминирует в начальный период (до 2031 г.), достигая ~8700 долл. США в день при цене квоты 80 евро/т CO₂-экв. ИМО NZF становится основным драйвером затрат в 2032–2034 гг., составляя от 9600 до 13 400 долл. США в день. FuelEU Maritime создает наибольшую нагрузку к 2035 г., с прогнозируемыми ежедневными затратами около 21 000 долл. США. Суммарный эффект этих мер является трансформационным: совокупные ежедневные расходы на соблюдение нормативов возрастают с 15 000 долл. США в 2028 г. до 45 000 долл. США в 2035 г. Данный уровень финансовой нагрузки создает существенные риски для конкурентоспособности малых и средних судоходных компаний, результаты соответствующих расчетов представлены на рис. 22.

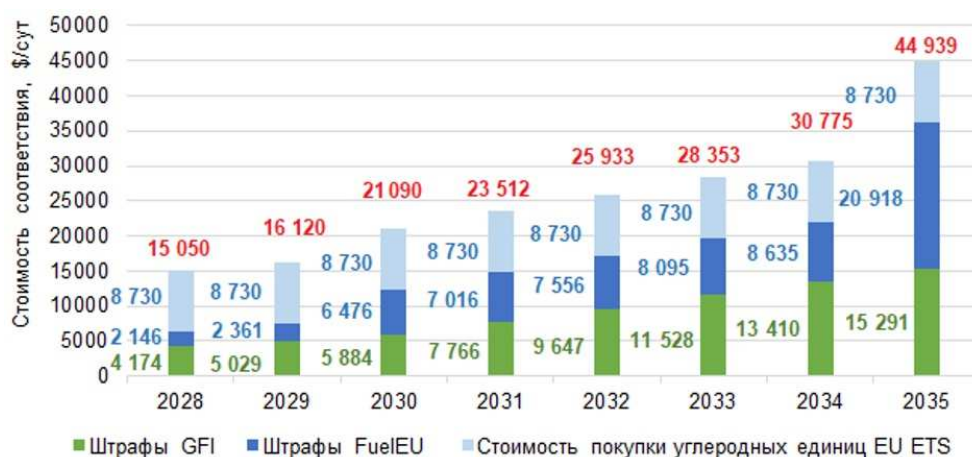


Рис. 22. Прогноз увеличения суточных операционных расходов к 2035 г. для судна с расходом топлива 30 т/сут, совершающего внутренние рейсы в ЕС с прогнозированным увеличением штрафов FuelEU на 10 % в год и стоимостью углеродной единицы 80 евро/т CO₂-экв.

В связи с этим усиливается давление на институты ЕС с целью пересмотра дублирующего регулирования — исключения судоходства из EU ETS и отмены FuelEU Maritime — для предотвращения тройного финансового бремени и минимизации негативных последствий для европейской торговли и конечных потребителей в случае принятия глобальной системы «чистого нуля» ИМО.

6.2. Эффективность системы «чистого нуля» ИМО

На основе эволюции базовых и прямых показателей соответствия, а также интенсивности выбросов различных видов топлива можно оценить нормативный баланс, как показано на рис. 23, в то время как рис. 24 также включает стоимость топлива, принимая во внимание интенсивность выбросов и разницу в затратах, приведенную в табл. 5. Единицы вознаграждения (которые будут присуждаться топливам с интенсивностью выбросов ниже 19 г CO₂-экв./МДж до 2034 г.) ИМО еще не установлены, и они не включены в настоящее рассмотрение, где в качестве эталонного экологически чистого топлива взят экологически чистый «зеленый» метанол, для оценки уровня вознаграждения. Само по себе вознаграждение требуется для того, чтобы сделать экологически чистое топливо конкурентоспособным в промежутке до 2035 г.

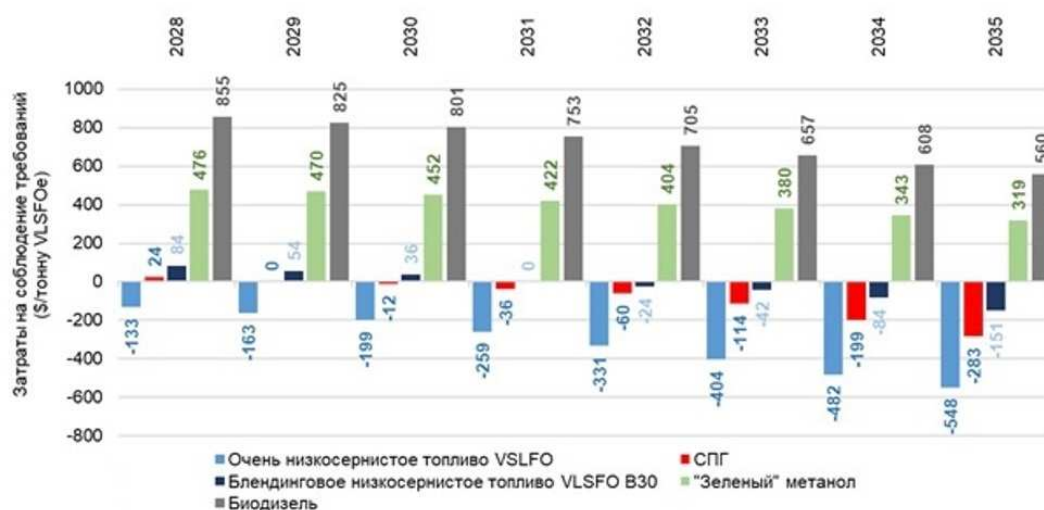


Рис. 23. Затраты на соблюдение требований (цена самого топлива не учитывается)

Таблица 4

Приведенная стоимость альтернативных топлив (к цене низкосернистого мазута)

Топливо	WtW CO ₂ -экв. (г CO ₂ -экв./МДж)	Приведенная стоимость (долл. США)
VLSFO	95,48	0
СПГ	76,13	80
LSFO B30	71,17	200
Биодизель	16,37	943
«Зеленый» метанол	13,67	1465

На рис. 23 и 24 положительные значения — это экономия, в то время как отрицательные значения — это затраты. При этом экономия, выраженная в терминах NZF, может быть использована для компенсации штрафных санкций, связанных с увеличением количества судов, загрязняющих окружающую среду. Очевидно, что и СПГ, и LSFO B30 являются надежными решениями на среднесрочную перспективу, в то время как биодизель и другие топлива являются долгосрочными альтернативами для соответствия требованиям Фонда чистых нулевых выбросов ИМО. Уже сейчас очевидно, что система IMO NZF принесет значительные доходы для заинтересованных сторон, в первую очередь для ИМО. Однако до тех пор, пока деятельность Фонда не будет прозрачной и справедливой, выбросы углерода станут лишь дополнительным фактором затрат для судовладельцев.

Дополнительную ясность можно получить, добавив стоимость топлива к затратам на удовлетворение нормативных требований (рис. 24).

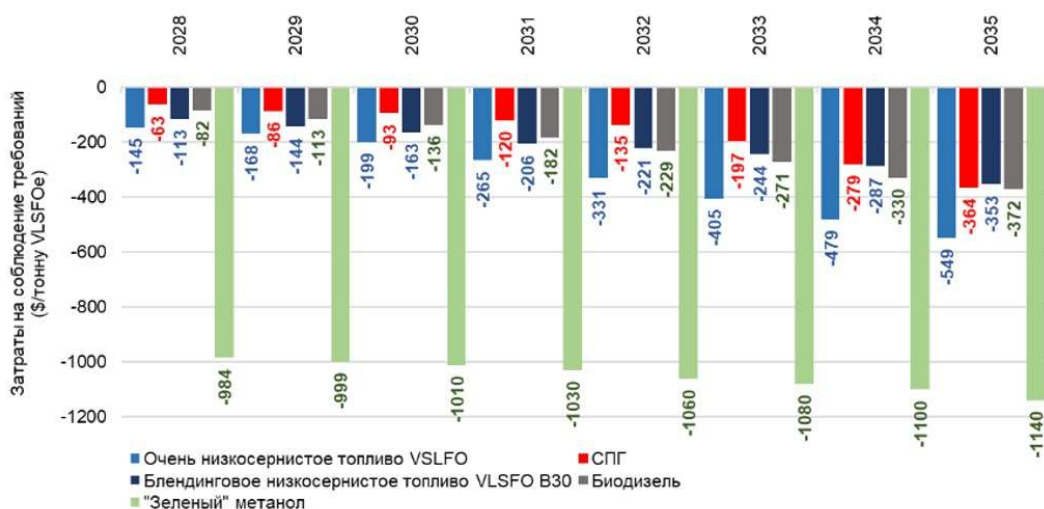


Рис. 24. Затраты на соблюдение требований с учетом цены самого топлива

Приведенные здесь результаты демонстрируют, что ни один из рассматриваемых экологически чистых видов топлива не приносит прибыль, а определяющим фактором при рассмотрении экономической целесообразности низкоуглеродных альтернативных видов топлива является сочетание интенсивности выбросов и стоимости топлива. В частности, для топлива с интенсивностью выбросов ниже 19 г CO₂-экв./МДж (здесь — «зеленому» метанолу) потребуется соответствующая единица вознаграждения ИМО, составляющая примерно 1000 долл. США, чтобы компенсировать разницу в цене между метанолом и низкосернистым топливом марки VLSFO.

ВЫВОДЫ

Краткосрочные мероприятия ИМО (ЕЕХI и СИ) уже доказали свою эффективность: углеродоемкость судоходства снизилась, однако абсолютные выбросы CO₂ продолжают расти и в 2024 г. составили 121 % от уровня 2008 г. Эти меры носят временный характер и не способны обеспечить выполнение амбициозных целей ИМО. Однако введение глобального механизма NZF ИМО потенциально создаст значительную финансовую нагрузку на отрасль. Для судов, работающих в водах ЕС, суммарный эффект от одновременного применения NZF, EU ETS и FuelEU Maritime приведет к резкому росту операционных расходов, что может негативно отразиться на стоимости европейской торговли. В текущей конфигурации NZF не создает достаточных стимулов для инвестиций в экологичные виды топлива, поскольку установленные цены не компенсируют разницу в стоимости между традиционным и низкоуглеродным топливом.

Вводимая с 2028 г. глобальная система IMO Net-Zero Framework (GFI + компенсационные платежи) и параллельное действие трех европейских механизмов (EU ETS, FuelEU Maritime, IMO NZF) приведут к резкому росту операционных расходов. Для типового судна с расходом 30 т VLSFO в сутки совокупные ежедневные затраты на соблюдение требований могут вырасти с ~15 000 долл. в 2028 г. до 45 000 долл. в 2035 г. Основная финансовая нагрузка ляжет на конечных потребителей транспортных услуг.

Ни одно из «зеленых» топлив (зеленый метанол, аммиак, водород, биодизель) в текущих ценовых и инфраструктурных условиях не является экономически выгодным. Только СПГ демонстрирует реальную конкурентоспособность и развитую инфраструктуру, выступая наиболее прагматичным переходным топливом до появления масштабируемых безуглеродных решений.

Система компенсационных единиц IMO Net-Zero Fund в предложенной конфигурации (100 и 380 долл./т CO₂-экв.) не создает достаточных экономических стимулов для массового перехода на топлива с интенсивностью выбросов ниже 19 г CO₂-экв./МДж. Требуется существенное повышение размера премиальных единиц (порядка 1000 долл. для зеленого метанола), иначе инвестиции в действительно низкоуглеродные топлива останутся невыгодными.

Отрасль находится на переломном этапе. Без синхронизации политики, технологий, инфраструктуры и капитала разрыв между заявленными целями ИМО и реальными возможностями судоходства будет только увеличиваться. Наиболее вероятный сценарий до 2035 г. — массовое использование СПГ в сочетании с технологиями повышения энергоэффективности и бортового улавливания CO₂, а также постепенное внедрение ядерных энергетических установок в 2030-х гг.

Таким образом, текущая регуляторная архитектура скорее превращает декарбонизацию в дополнительный торговый барьер и источник доходов для регуляторов, чем создает реальные условия для масштабного и экономически обоснованного перехода к нулевым выбросам к 2050 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бурков А.Ф. Повышение эффективности управления комбинированными энергетическими установками судов / А.Ф. Бурков, В.В. Миханович, В.Х. Нгуен // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. — 2020. — Т. 12, № 2. — С. 381–389. — DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-381-389.
2. Авдеев Б.А. Интеллектуальные энергоэффективные системы морских судов / Б.А. Авдеев // Вестник Керченского государственного морского технологического университета. — 2021. — № 4. — С. 99–113. — DOI 10.47404/2619-0605_2021_4_99. — EDN BFMOLU.
3. Медведев В.В. Обзор и анализ возможностей различных способов повышения энергетической эффективности судов / В.В. Медведев, В.В. Гаврилов, С.Н. Киселев // Морские интеллектуальные технологии. — 2018. — № 2-1(40). — С. 94–103. — EDN XSHLHF.
4. Arief I.S. Review of alternative energy resource for the future ship power / I.S. Arief, A. Fathalah // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. — 2022. — Vol. 972, No. 1. — P. 012073. — DOI 10.1088/1755-1315/972/1/012073. — EDN BWYRVZ.
5. Секриер С.С. Атомная энергетика в судостроении. Опыт прошлого для развития в будущем / С.С. Секриер, В.Н. Кравчишин // Судостроение. — 2023. — № 6(871). — С. 25–32. — EDN DBQFGC.
6. 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. Шурпак, С.А. Толмачев // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2025. — № 79. — С. 14–25. — EDN FBBSJV.
7. Магаровский В.В. Новое в международной политике снижения эмиссии парниковых газов судами и необходимые мероприятия в морском секторе. Часть 2. Анализ эффективности энергосберегающих мероприятий, применяемых для снижения эмиссии парниковых газов / В.В. Магаровский, В.Н. Половинкин, А.В. Пустошный, О.В. Савченко // Труды Крыловского государственного научного центра. — 2023. — № 1(403). — С. 167–182. — DOI 10.24937/2542-2324-2023-1-403-167-182. — EDN PXQOES.
8. Наумов В.С. Оценка влияния на окружающую среду при эксплуатации судна / В.С. Наумов, А.В. Морозова, Е.Ю. Чебан // Морские интеллектуальные технологии. — 2025. — № 3-3(69). — С. 47–54. — DOI 10.37220/MIT.2025.693.054. — EDN IFSKAR.
9. Grzelakowski A.S. Maritime shipping decarbonization: Roadmap to meet zero-emission target in shipping as a link in the global supply chains / A.S. Grzelakowski, J. Herdzik, S. Skiba // Energies. — 2022. — Vol. 15, No. 17. — P. 6150. — DOI 10.3390/en15176150. — EDN BQRTGE.
10. Тория Т.Г. Оценка загрязнения атмосферы при работе морского порта на примере порта г. Новороссийска / Т.Г. Тория, А.И. Епихин, А.В. Кукарцев, С.О. Курашкин и др. // Экология и промышленность России. — 2025. — Т. 29, № 4. — С. 66–71. — DOI 10.18412/1816-0395-2025-4-66-71. — EDN HWHTMP.
11. Применение альтернативных видов топлива для обеспечения экологической безопасности морских судов / В.П. Говорухин, А.А. Таранцев, В.А. Родионов, О.А. Королев // Морские интеллектуальные технологии. — 2025. — № 1-1(67). — С. 75–81. — DOI 10.37220/MIT.2025.67.1.009. — EDN OVKONH.
12. Магаровский В.В. Новое в Международной политике снижения эмиссии парниковых газов и необходимые мероприятия в морском секторе. Часть 3. Альтернативное топливо как мера для достижения целевых показателей эмиссии парниковых газов / В.В. Магаровский, В.Н. Половинкин, А.В. Пустошный, О.В. Савченко // Труды Крыловского государственного научного центра. — 2023. — № 4(406). — С. 174–190. — EDN XUYPFY.
13. Будниченко М.А. Мировое судостроение в 2024 г. и прогноз его развития на 2025 г. / М.А. Будниченко, В.Н. Половинкин // Судостроение. — 2025. — № 2(879). — С. 4–8. — EDN RLXRFU.
14. Демешко Г.Ф. Сравнительный анализ альтернативных способов обеспечения соответствия экологическим нормам выбросов выхлопных газов судов / Г.Ф. Демешко, В.М. Кашаев // Труды Крыловского государственного научного центра. — 2024. — № 4(410). — С. 111–126. — EDN ARLSNL.
15. 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 FJOQTC.

REFERENCES

1. Burkov A.F., Mikhanshina V.V., Nguyen V.H. Improving the management efficiency of combined power plants of ships. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S.O. Makarova*. 2020. Vol. 12, No. 2. P. 381–389. DOI 10.21821/2309-5180-2020-12-2-381-389. (In Russ.)
2. Avdeev B.A. Intelligent energy-efficient systems of marine vessels. *Vestnik Kerchenskogo gosudarstvennogo morskogo tekhnologicheskogo universiteta [Bulletin of the Kerch State Marine Technological University]*. 2021. No. 4. P. 99–113. DOI 10.47404/2619-0605_2021_4_99. EDN BFMOLU. (In Russ.)
3. Medvedev V.V., Gavrilov V.V., Kiselev S.N. Review and analysis of the possibility of various methods of increasing the energy efficiency of vessels. *Marine Intellectual Technologies*. 2018. No. 2-1(40). P. 94–103. EDN XSHLHF. (In Russ.)
4. Arief I.S., Fathalah A. Review of alternative energy resource for the future ship power. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022. Vol. 972, No. 1. P. 012073. DOI 10.1088/1755-1315/972/1/012073. EDN BWYRVZ.
5. Sekrier S.S., Kravchishin N.V. Atomnaya energetika v sudostroenii. Opyt proshlogo dlya razvitiya v budushchem [Nuclear energy in shipbuilding sector. Experience from the past for development in the future]. *Sudostroenie [Shipbuilding]*. 2023. No. 6(871). P. 25–32. EDN DBQFGC.
6. 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 FBBSJV. (In Russ.)

7. Magarovskiy V.V., Polovinkin V.N., Pustoshny A.V., Savchenko O.V. Novelty in the international policy towards mitigation of greenhouse gas emissions from ships and necessary measures in marine industry. Part 2. Efficiency analysis of power-saving measures intended to reduce greenhouse gas emissions. *Transactions of the Krylov State Research Centre*. 2023. Vol. 1, No. 403. P. 167–182. DOI 10.24937/2542-2324-2023-1-403-167-182. EDN PXQOES. (In Russ.)
8. Naumov V.S., Morozova A.V., Cheban E.Yu. Environmental impact assessment during the operation of the vessel. *Marine Intellectual Technologies*. 2025. No. 3-3(69). P. 47–54. DOI 10.37220/MIT.2025.693.054. EDN IFSKAR. (In Russ.)
9. Grzelakowski A.S., Herdzik J., Skiba S. Maritime shipping decarbonization: Roadmap to meet zero-emission target in shipping as a link in the global supply chains. *Energies*. 2022. Vol. 15, No. 17. P. 6150. DOI 10.3390/en15176150. EDN BQRTGE.
10. Toriya T.G., Epikhin A.I., Kukartsev A.V., Kurashkin S.O. et al. Estimation of atmospheric pollution during the operation of a seaport on the example of the port of Novorossiysk. *Ecology and Industry of Russia*. 2025. Vol. 29, No. 4. P. 66–71. DOI 10.18412/1816-0395-2025-4-66-71. EDN HWHTMP. (In Russ.)
11. Govorukhin V.P., Tarantsev A.A., Rodionov V.A., Korolev O.A. The use of alternative fuels to ensure the environmental safety of ships. *Marine Intellectual Technologies*. 2025. No. 1-1(67). P. 75–81. DOI 10.37220/MIT.2025.67.1.009. EDN OVKOH.
12. Magarovskiy V.V., Polovinkin V.N., Pustoshny A.V., Savchenko O.V. Novelty in the international policy towards mitigation of greenhouse gas emissions from ships and necessary measures in marine industry. Part 3. Alternative fuels as a measure to reach target levels of greenhouse gas emissions. *Transactions of the Krylov State Research Centre*. 2023. Vol. 4, No. 406. P. 174–190. EDN XUYPFY.
13. Budnichenko M.A., Polovinkin V.N. World shipbuilding in 2024 and its projected growth in 2025. *Sudostroenie [Shipbuilding]*. 2025. No. 2(879). P. 4–8. EDN RLXRFU.
14. Demeshko G.F., Kashaev V.M. Comparative analysis of alternative ways to meet the limits of exhaust gas emissions by ships. *Transactions of the Krylov State Research Centre*. 2024. No. 4(410). P. 111–126. EDN ARLSNL. (In Russ.)
15. 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.

Статья поступила в редакцию 26.01.2026.

Принята к публикации 24.02.2026.