

УДК 629.5.011; 629.5.016; 629.5.018; 629.123

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ СЭУ НА РЕЖИМАХ ЭКСПЛУАТАЦИИ СУДНА ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ТОПЛИВ

Иванченко Александр Андреевич¹, профессор, доктор технических наук, заведующий кафедрой двигателей внутреннего сгорания и автоматики судовых энергетических установок

e-mail: prof_ivanchenko@mail.ru

Билоус Владислав Игоревич¹, аспирант

e-mail: strong.bilous@gmail.com

¹ Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. В работе представлены расчёты и анализ энергетической эффективности судовой двигательной установки (СДУ) при применении альтернативных топлив. Исследуются двигатели Wärtsilä 8L50DF и 6L20DF в дизельном и газовом режимах. Проведены вычисления EEDI, расхода топлива и выбросов CO₂ на маршруте Клайпеда–Танангер. Сравнены эксплуатационные показатели и экономическая эффективность режимов. Использование СПГ позволило снизить выбросы на ~26% и сократить расходы почти на 30%. Представлены схемы, таблицы и графики, подтверждающие выводы. Работа носит расчётно-экспериментальный характер. Результаты обосновывают целесообразность перехода на альтернативные топлива.

Ключевые слова: энергетическая эффективность, EEDI, двухтопливные двигатели, сжиженный природный газ (СПГ), выбросы CO₂, MARPOL Annex VI, газозов.

COMPUTATIONAL AND EXPERIMENTAL STUDY OF MARINE POWER PLANT ENERGY EFFICIENCY UNDER OPERATIONAL MODES USING ALTERNATIVE FUELS

Aleksandr A. Ivanchenko¹, Professor, Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Internal Combustion Engines and Automation of Marine Power Plants

e-mail: prof_ivanchenko@mail.ru

Vladislav I. Bilous¹, Doctoral Student

e-mail: strong.bilous@gmail.com

¹ Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, Saint Petersburg, Russia

Abstract. This paper presents calculations and analysis of marine power plant efficiency using alternative fuels. Wärtsilä 8L50DF and 6L20DF engines are evaluated in diesel and gas modes. EEDI, fuel consumption, and CO₂ emissions are calculated for the Klaipėda–Tananger route. Operating performance and economic efficiency are compared. LNG use reduced emissions by

~26% and costs by nearly 30%. Diagrams, tables, and graphs support the conclusions. The study is based on computational and experimental methods. Results confirm the viability of switching to alternative marine fuels.

Keywords: Energy efficiency, EEDI, dual-fuel engines, liquefied natural gas (LNG), CO₂ emissions, MARPOL Annex VI, LNG carrier.

Введение

В современных условиях мировое судоходство сталкивается с необходимостью пересмотра подходов к эксплуатации судовых энергетических установок (СЭУ) в сторону повышения их энергоэффективности. Основными факторами, оказывающими влияние на развитие морской энергетики, являются ужесточающиеся экологические нормы, установленные Международной морской организацией (ИМО), и растущие требования к экономической целесообразности эксплуатации судов [1, 7].

Особую актуальность приобретает переход к альтернативным видам топлива, которые позволяют сократить выбросы загрязняющих веществ, повысить коэффициент полезного действия энергетических установок и соответствовать требованиям по снижению углеродного следа. Среди таких решений наибольшее распространение получило применение сжиженного природного газа (СПГ) в качестве основного или дополнительного топлива. Использование СПГ обеспечивает существенное сокращение выбросов диоксида углерода, оксидов азота и серы, что соответствует положениям MARPOL Annex VI [3]. Кроме того, с 2025 года вступает в силу третья фаза требований по снижению индекса энергоэффективности проектирования (EEDI), предусматривающая сокращение выбросов на 30% по сравнению с базовым уровнем [1, 7].

Настоящая работа посвящена расчётно-экспериментальному исследованию энергетической эффективности СДУ при эксплуатации судна на различных режимах с применением альтернативного топлива. В качестве объекта анализа рассматриваются двухтопливные двигатели Wärtsilä 8L50DF и 6L20DF, широко используемые на современных газовозах [2, 3]. Основой проведённых расчётов служит сравнительная оценка EEDI в дизельном и газовом режимах работы двигателей, а также расчёт фактических выбросов CO₂ на конкретном рейсе, что позволяет дать объективную оценку эффективности перехода на СПГ.

Судовая энергетическая установка

Для проведения расчётов и анализа энергоэффективности на альтернативных видах топлива были использованы экспериментальные данные, полученные в ходе эксплуатации газовоза Coral Energy — судна, специализирующегося на перевозке сжиженного природного газа (СПГ). В качестве основной силовой установки на борту применён двигатель Wärtsilä 8L50DF — четырёхтактный среднеоборотный двигатель, способный работать как на традиционном дизельном топливе, так и на СПГ. Переход между режимами возможен без остановки двигателя, что обеспечивает гибкость в эксплуатации [2, 3].

Таблица 1. Основные технические характеристики главного двигателя

Параметр	Значение
Тип двигателя	4-х тактный двухтопливный
Диаметр цилиндра, мм	500
Ход поршня, мм	580



Номинальная частота вращения, об/мин	514
Номинальная мощность, кВт	7800

Вспомогательная энергетическая установка представлена двумя двигателями Wärtsilä 6L20DF, каждый из которых имеет мощность 1000 кВт. Эти агрегаты предназначены для обеспечения электроэнергией судовых систем и также работают в двухтопливных режимах. Их конструкция и режимы работы схожи с главным двигателем, что обеспечивает единый подход к управлению энергетической установкой и упрощает обслуживание.

Таблица 2. Основные технические характеристики вспомогательного двигателя

Параметр	Значение
Тип двигателя	4-х тактный двухтопливный
Диаметр цилиндра, мм	200
Ход поршня, мм	280
Номинальная частота вращения, об/мин	1200
Номинальная мощность, кВт	1000

Такая компоновка энергетической установки характерна для современных газозовов дедевитом до 20 000 тонн, способных развивать скорость порядка 15–17 узлов. Применение двухтопливных двигателей позволяет адаптироваться к требованиям по снижению выбросов, повышая общую эффективность судна. Энергетическая установка отличается универсальностью, высокой топливной гибкостью и экологичностью, что особенно актуально в контексте перехода к использованию альтернативных топлив [2, 3].

Принцип работы двухтопливных двигателей

Двухтопливные двигатели, разработанные компанией Wärtsilä, представляют собой универсальные силовые установки, способные функционировать в трёх различных режимах: газовый режим (СПГ + пилотное топливо LFO), дизельный режим с лёгким топливом (LFO + пилотное LFO) и дизельный режим с тяжёлым топливом (HFO + пилотное LFO) [3]. Такая гибкость позволяет эффективно адаптировать двигатель к текущим условиям эксплуатации и доступности топлива, повышая надёжность и энергоэффективность судовой энергетической установки.

Конструктивно топливная система двигателя разделена на три независимые линии: одна предназначена для подачи газа, вторая — для основного жидкого топлива (LFO или HFO), и третья — для подачи пилотного топлива. Благодаря этому обеспечивается быстрая и безопасная смена режимов работы.

При функционировании в газовом режиме двигатель работает по принципу обеднённой газозовдушной смеси. Газ подаётся в цилиндры вместе с воздухом ещё на стадии впуска. После сжатия смесь воспламеняется с помощью небольшого количества пилотного топлива (менее 1% от общего расхода при полной нагрузке), впрыскиваемого под высоким давлением. Такой подход обеспечивает стабильное сгорание и низкий уровень выбросов. После завершения рабочего такта газы выводятся через выпускные клапаны, и цикл повторяется.



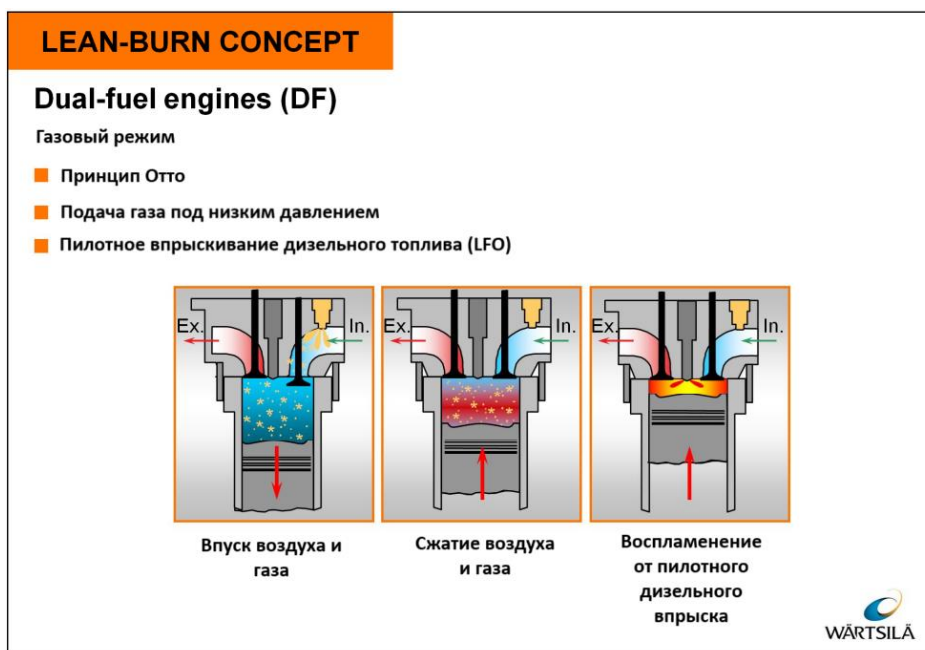


Рисунок 1 – Режим работы на газу

В случае запуска двигателя или при отсутствии газа используется дизельный режим, в котором основным видом топлива выступает либо LFO, либо HFO. Подача топлива и управление циклом в этом режиме аналогичны классическим дизельным двигателям, что позволяет использовать его как резервный.

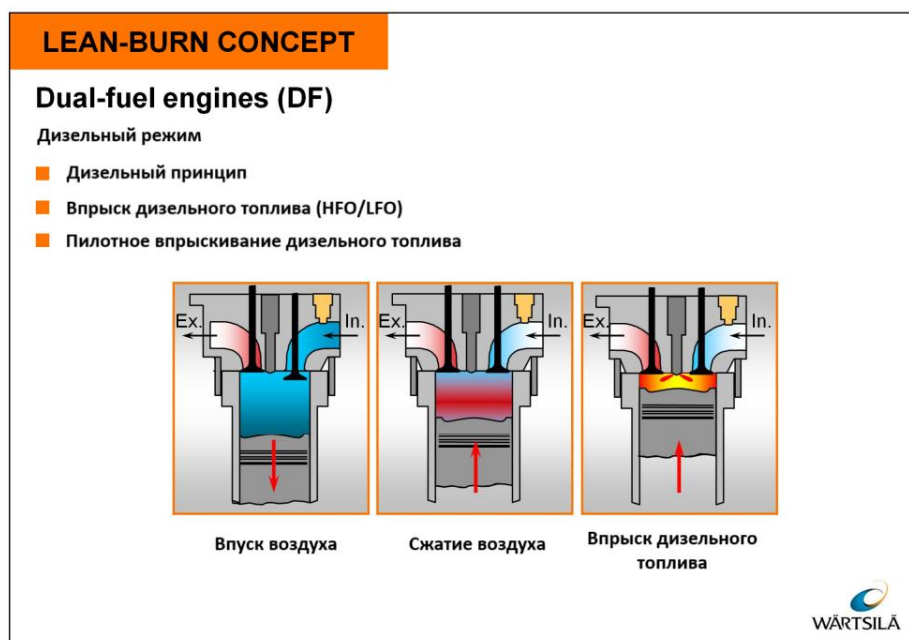


Рисунок 2 – Режим работы на дизеле

Переключение между режимами может происходить автоматически. Например, при аварийной остановке подачи газа двигатель мгновенно и без снижения мощности переходит на дизельный режим. Наличие резервной системы также даёт возможность выполнять переключение между LFO и HFO без остановки или снижения нагрузки, что особенно важно в длительных рейсах.

Методика расчета энергоэффективности

Индекс энергетической эффективности (EEDI, *Energy Efficiency Design Index*) позволяет количественно оценить количество выбросов CO₂ на единицу транспортной работы судна. Расчёт EEDI выполняется по следующей формуле [1]:

$$EEDI = \frac{\sum_i (P_i * SFC_i * CF_i)}{DWT * V_{ref}} \quad (1)$$

где P_i — мощность двигателя i , кВт;

SFC_i — удельный расход топлива для двигателя i , г/кВт·ч;

CF_i — коэффициент преобразования топлива в выбросы CO₂ (г CO₂/г топлива);

DWT — дедвейт судна, т;

V_{ref} — расчётная скорость судна, узлы.

Коэффициенты CF для разных видов топлива:

Дизельное топливо (LFO/HFO): 3.114 г CO₂/г

Сжиженный природный газ (СПГ): 2.750 г CO₂/г

Для сравнения энергоэффективности рассматриваются одинаковые маршруты.

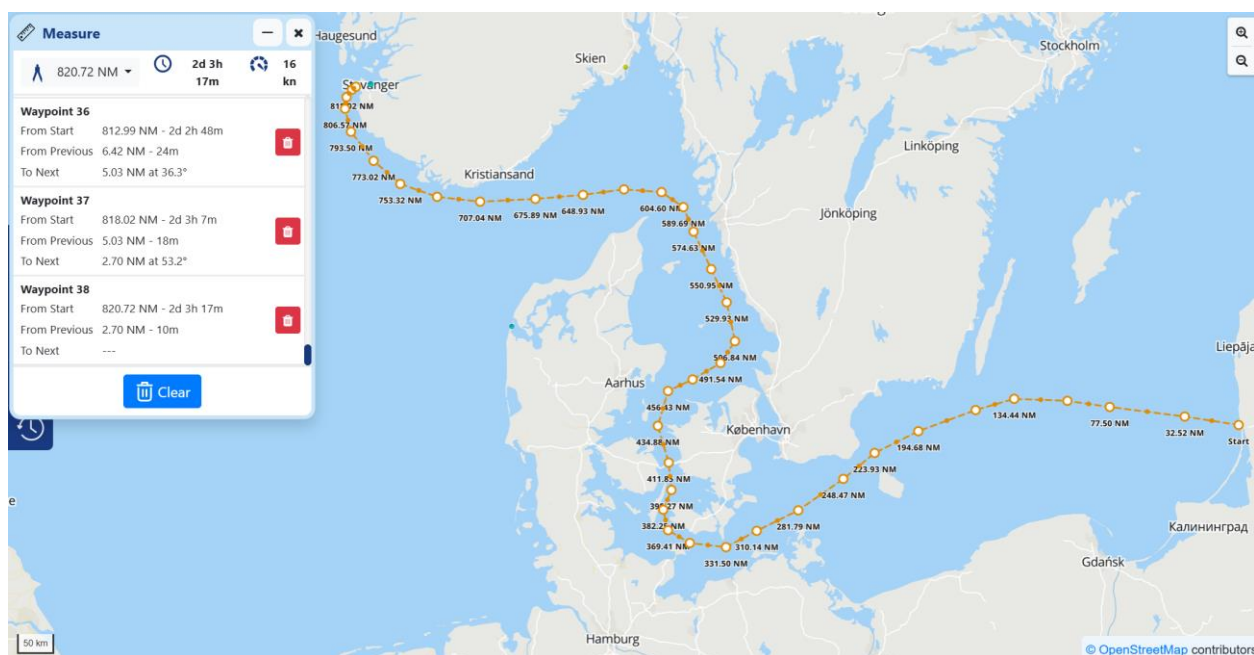


Рисунок 3 – Маршрут устанавливаемый для рассматриваемых рейсов

В первую очередь производится расчёт энергоэффективности главного двигателя, поскольку при переходе вспомогательные двигатели не используются, а источником электроэнергии на борту является валогенератор. При выполнении рейса Клайпеда – Танангер средняя вычисленная нагрузка главного двигателя равна 75% на всём протяжении пути. Тип перевозимого груза — сжиженный природный газ (СПГ) объёмом 15 000 кубических метров. Длина маршрута составляет 820 морских миль. Ниже представлены данные, использованные для расчёта показателя EEDI.

Режим работы ГД на дизельном топливе:

$P_{75\%ME} = 5850$ кВт

$SFC_{75\%ME} = 190.9$ г/кВт·ч

$CF = 3.114$ г CO₂/г

$DWT = 12300$ тонн

$V_{ref} = 16$ узлов

Расход топлива = 27.24 тонн/сутки

Расход топлива за рейс = 58.37 тонн

$$EEDI = \frac{5850 * 190.9 * 3.114}{12300 * 16} = 0.01761 \text{ тCO}_2 / \text{т} * \text{нм}$$

$$\text{CO}_2 = 58.37 * 3.114 = 181.76 \text{ тонн CO}_2 \text{ за рейс}$$

Режим работы ГД на СПГ:

$$P_{75\%ME} = 5850 \text{ кВт}$$

$$SFC_{75\%ME} = 162.5 \text{ г/кВт}\cdot\text{ч}$$

$$CF = 2.750 \text{ г CO}_2/\text{г}$$

$$DWT = 12300 \text{ тонн}$$

$$V_{ref} = 16 \text{ узлов}$$

$$\text{Расход СПГ} = 22.41 \text{ тонн/сутки}$$

$$\text{Расход СПГ за рейс} = 48.02 \text{ тонн}$$

$$EEDI = \frac{5850 * 162.5 * 2.750}{12300 * 16} = 0.01328 \text{ тCO}_2 / \text{т} * \text{нм}$$

$$\text{CO}_2 = 48.02 * 2.750 = 132.05 \text{ тонн CO}_2 \text{ за рейс}$$

В дополнение к главному двигателю, в составе судовой энергетической установки рассматриваются вспомогательные двигатели, обеспечивающие электроэнергию на борту. Несмотря на то, что их работа преимущественно осуществляется во время стоянки судна в порту и не входит в расчёт индекса EEDI, анализ их энергоэффективности представляет интерес в контексте общего углеродного следа судна.

Для оценки энергоэффективности вспомогательных двигателей будет произведён расчёт удельных выбросов CO₂ при работе как в дизельном, так и в газовом режиме. В обоих случаях применяется следующая расчётная формула:

$$\text{CO}_{2AE} = P_{AE} * SFC_{AE} * CF * t$$

где P_{AE} – суммарная мощность вспомогательных двигателей, кВт;

SFC_{AE} – удельный расход топлива, г/кВт·ч;

CF – коэффициент преобразования топлива в выбросы CO₂ (г CO₂/г топлива);

t – время работы, ч.

Режим работы на дизельном топливе:

$$P_{50\%AE} = 1000 \text{ кВт} \text{ – суммарная мощность двигателей при выгрузке груза}$$

$$SFC_{50\%AE} = 210.5 \text{ г/кВт}\cdot\text{ч}$$

$$CF = 3.114 \text{ г CO}_2/\text{г}$$

$$\text{CO}_{2AE} = 1000 * 210.5 * 3.114 * 24 = 15.73 \text{ тонн CO}_2$$

Режим работы на СПГ:

$$P_{50\%AE} = 1000 \text{ кВт} \text{ – суммарная мощность двигателей при выгрузке груза}$$

$$SFC_{50\%AE} = 195.15 \text{ г/кВт}\cdot\text{ч}$$

$$CF = 2.750 \text{ г CO}_2/\text{г}$$

$$\text{CO}_{2AE} = 1000 * 195.15 * 2.750 * 24 = 12.88 \text{ тонн CO}_2$$

Сравнение выбросов CO₂ при использовании дизельного топлива и СПГ

На рисунке 4 представлены результаты расчёта объёмов выбросов углекислого газа (CO₂), генерируемых судовыми энергетическими установками при работе на двух различных видах топлива — дизельном и сжиженном природном газе (СПГ). Анализ охватывает как главный двигатель, работающий при переходе между портами, так и вспомогательные двигатели, функционирующие преимущественно в порту.

Как видно из графика, переход с дизельного топлива на сжиженный природный газ (СПГ) приводит к значительному снижению выбросов углекислого газа:

- Выбросы от главного двигателя снижаются с 181.76 до 132.05 т CO₂ за рейс.



- Выбросы от вспомогательных двигателей в порту также уменьшаются — с 15.73 до 12.88 т CO₂.
- Суммарное снижение выбросов CO₂ за рейс составляет более 52 тонн, или около 26.6%.

Такие показатели подтверждают, что применение СПГ в судовой энергетике отвечает современным требованиям Международной морской организации (ИМО) и способствует улучшению экологических характеристик судна.

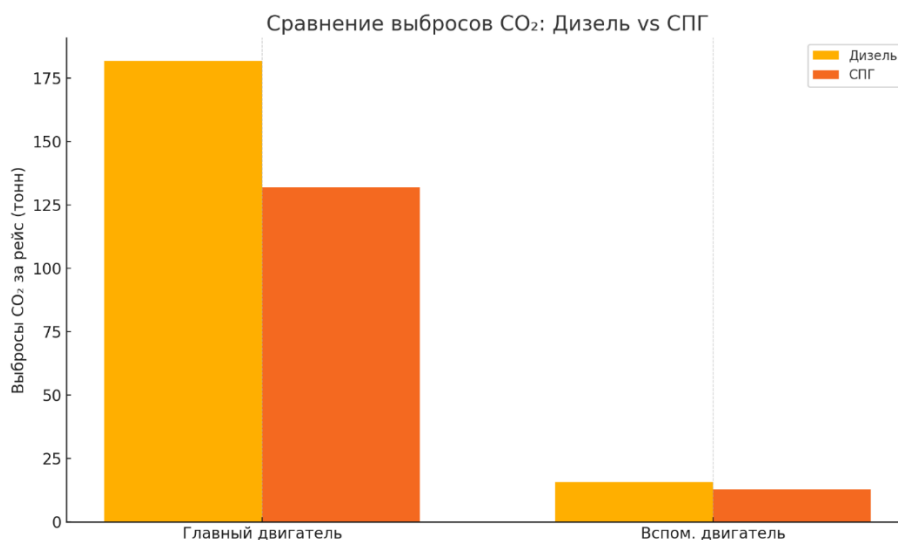


Рисунок 4 – Сравнение выбросов CO₂

Сравнение топливных затрат при использовании дизельного топлива и СПГ

Следующий график (рисунок 5) отражает сравнительный анализ затрат на топливо при выполнении аналогичного рейса в зависимости от выбранного типа топлива:

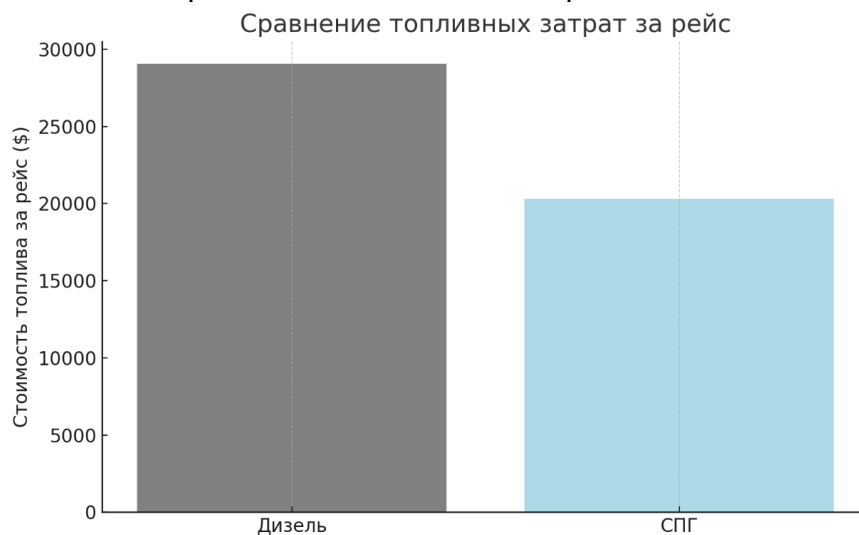


Рисунок 5 – Сравнение стоимости топлива за рейс (дизель и СПГ)

Из графика видно, что:

- При использовании дизельного топлива общая стоимость на рейс составила около 29 062 доллара США.
- При использовании СПГ — около 20 320 долларов США, что на ~29.9% дешевле.

Несмотря на относительно близкий расход топлива по массе (32.3 т/сутки дизеля против 27.1 т/сутки СПГ), более низкая цена на СПГ в европейских портах обеспечивает значительную экономическую выгоду при его использовании.

Заключение

Проведённые расчёты и сравнительный анализ показали, что использование СПГ в составе судовой энергетической установки, как одного из альтернативных топлив, обеспечивает сразу несколько ключевых преимуществ:

- Значительное снижение выбросов CO₂ как от главного, так и от вспомогательных двигателей;
- Существенное сокращение топливных затрат за счёт более низкой стоимости СПГ;
- Повышение энергетической эффективности, выраженное в улучшении индекса EEDI — особенно важно в контексте требований MARPOL Annex VI, Phase 3 [1].

Таким образом, использование СПГ как альтернативного топлива в современных судовых энергетических системах представляет собой эффективное и экономически обоснованное решение. Этот подход соответствует экологическим приоритетам отрасли и способствует адаптации судов к новым нормативным требованиям без ущерба для эксплуатационной надёжности.

Список литературы:

1. IMO. 2018 Guidelines on the method of calculation of the attained Energy Efficiency Design Index (EEDI) for new ships. MEPC.308(73).
2. Wärtsilä Technical Data Sheets – 8L50DF, 6L20DF. – URL: <https://www.wartsila.com/> (дата обращения: 01.04.2025).
3. Wärtsilä. Dual-fuel engines for marine applications. Technical description and operation manual. 2022.
4. DNV GL. Gas as marine fuel – Technology outlook and economics. Brochure, 2020.
5. Иванченко А.А. Подходы к совершенствованию судовых энергетических установок // Эксплуатация морского транспорта. – 2023. – № 3 (108). – С. 121 – 138.
6. Иванченко А.А., Петров А.П. Живлюк Г.Е. Энергетическая эффективность судов и регламентация выбросов парниковых газов. Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макаров. Вып. 2, 2015 г., с. 103 – 112.
7. International Maritime Organization EEDI // IMO. – URL: <https://www.imo.org/fr/MediaCentre/HotTopics/Pages/EEDI.aspx> (дата обращения: 01.04.2025)

