

УДК 629.5.011; 629.5.016; 629.5.018; 629.123

ОЦЕНКА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ СУДНА ПО ДАННЫМ МАК М32С И MARPRIME С РАСЧЕТОМ ФАКТИЧЕСКОГО ПОКАЗАТЕЛЯ УГЛЕРОДНОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ (СИ)

Иванченко Александр Андреевич¹, профессор, д.т.н., зав. кафедрой ДВС и АСЭУ
e-mail: prof_ivanchenko@mail.ru

Билоус Владислав Игоревич¹, специалист, аспирант кафедры ДВС и АСЭУ
e-mail: strong.bilous@gmail.com

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

Аннотация. В статье рассмотрена возможность оценки энергоэффективности судна по фактическим эксплуатационным данным главного двигателя MaK 9M32C с использованием отчетов MarPrime и Maridis. В качестве объекта исследования выбрано судно Coral Lophelia. В работе использованы результаты приемо-сдаточных испытаний двигателя, текущие судовые performance-формы, данные цилиндрической индикации и отчет MarPrime Instruct. Выполнено сопоставление заводских и эксплуатационных параметров двигателя, включая частоту вращения, индикаторную мощность, компрессионное давление, максимальное давление сгорания и среднее индикаторное давление. В отличие от формального сравнения с номинальным режимом, в статье для сопоставления использованы данные с приемо-сдаточных испытаний на 85% нагрузке, как наиболее близкий к фактической нагрузке двигателя в рассматриваемом замере. Показано, что даже при отсутствии критических отклонений по цилиндрам текущее техническое состояние двигателя влияет на его фактическую топливную экономичность, а следовательно, и на показатель углеродной интенсивности судна. Отдельно рассмотрена роль ISO-corrected параметров, позволяющих корректно сравнивать текущие данные с заводской базой. Сделан вывод о том, что использование цифровых систем мониторинга позволяет перейти от формального контроля СИ к инженерной оценке причин его изменения в эксплуатации.

Ключевые слова: энергоэффективность судна, главный двигатель, MaK 9M32C, MarPrime, Maridis, СИ, углеродная интенсивность, эксплуатационные параметры.

ASSESSMENT OF VESSEL ENERGY EFFICIENCY BASED ON MAK M32C AND MARPRIME DATA WITH CALCULATION OF THE ACTUAL CARBON INTENSITY INDICATOR (CII)

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

Abstract. The article examines the possibility of assessing a vessel's energy efficiency using actual operational data from the MaK 9M32C main engine based on MarPrime and Maridis reports. The vessel Coral Lophelia was selected as the object of the study. The research uses the results of the engine acceptance tests, current onboard performance forms, cylinder indication data, and the MarPrime Instruct report. A comparison is made between factory and operational engine parameters, including rotational speed, indicated power, compression pressure, maximum combustion pressure, and mean indicated pressure. Unlike a formal comparison with the nominal operating mode, this article uses the 85% load acceptance test mode for comparison, as it is the closest to the actual engine load recorded during the analyzed measurement. It is shown that even in the absence of critical cylinder deviations, the current technical condition of the engine affects its actual fuel efficiency and, consequently, the vessel's carbon intensity indicator. Special attention is paid to the role of ISO-corrected parameters, which make it possible to correctly compare current data with the factory baseline. The article concludes that the use of digital monitoring systems makes it possible to move from formal CII control to an engineering assessment of the causes of its changes during operation.

Keywords: vessel energy efficiency, main engine, MaK 9M32C, MarPrime, Maridis, CII, carbon intensity, operational parameters.

Введение

В последние годы вопросы энергоэффективности морских судов рассматриваются не только с позиции снижения расхода топлива, но и как важная часть выполнения международных экологических требований. Введение показателя углеродной интенсивности судна — Carbon Intensity Indicator, CII — сделало фактическую эксплуатационную эффективность судна напрямую связанной с его экологическим рейтингом и дальнейшей эксплуатационной привлекательностью [1, 2].

В связи с этим одних проектных характеристик энергетической установки уже недостаточно для объективной оценки энергоэффективности судна. На практике судовладельцу и технической службе необходимо понимать, как главный двигатель работает в реальных условиях эксплуатации, как изменяется его техническое состояние и каким образом эти изменения отражаются на расходе топлива и итоговом значении CII. Даже при отсутствии аварийных отклонений по цилиндрам ухудшение качества рабочего процесса, изменение давления сжатия, максимального давления сгорания или среднего индикаторного давления может приводить к росту удельного расхода топлива и, как следствие, к ухудшению показателя углеродной интенсивности [3].

Особую ценность при такой оценке имеют фактические эксплуатационные данные, полученные непосредственно на судне. Они позволяют анализировать не расчетное, а реальное техническое состояние главного двигателя и сопоставлять его с заводскими параметрами. При наличии данных приемо-сдаточных испытаний, судовых performance-форм, цилиндровой индикации и отчетов цифровых систем мониторинга появляется возможность выполнить более глубокую инженерную оценку связи между состоянием двигателя, его топливной экономичностью и фактическим значением CII [4, 5].

В данной статье такой подход рассмотрен на примере судна Coral Lophelia, оснащенного главным двигателем MaK 9M32C. Для анализа использованы результаты приемо-сдаточных испытаний двигателя, текущие судовые performance-формы, отчет MarPrime Instruct и цилиндровый отчет Maridis. Особое внимание уделено сопоставлению заводских и эксплуатационных параметров двигателя, включая частоту вращения, индикаторную



мощность, давление сжатия, максимальное давление сгорания и среднее индикаторное давление.

В отличие от упрощенного сравнения с номинальным режимом работы двигателя, в настоящей работе в качестве базового режима для сопоставления используется режим приемо-сдаточных испытаний при нагрузке 85%. Такой выбор обусловлен тем, что данный режим наиболее близок к фактической нагрузке двигателя, зафиксированной во время рассматриваемого замера. Это позволяет избежать некорректной интерпретации отклонений и сравнивать текущее состояние двигателя с более репрезентативной заводской базой. Дополнительно учитываются ISO-corrected параметры, применение которых позволяет уменьшить влияние внешних условий и корректно сопоставлять эксплуатационные данные с результатами приемо-сдаточных испытаний [3, 5].

Целью данной статьи является оценка энергоэффективности судна на основе фактических данных главного двигателя MaK 9M32C и отчетов MarPrime с последующим расчетом фактического показателя углеродной интенсивности СИ. Также в работе показано, что цифровые системы мониторинга могут использоваться не только для формального контроля СИ, но и для выявления технических причин изменения углеродной интенсивности судна в процессе эксплуатации.

Объект исследования и исходные данные

Объектом исследования является главный двигатель судна Coral Lophelia — MaK 9M32C, заводской номер 38401. Согласно данным приемо-сдаточных испытаний, номинальная мощность двигателя составляет 4500 кВт при частоте вращения 600 об/мин. Однако в качестве референсной базы для настоящего исследования используется не режим 100% нагрузки, а режим 85% нагрузки, поскольку фактическая нагрузка двигателя в момент эксплуатационного замера была близка именно к этому значению. По данным приемо-сдаточных испытаний для режима 85% нагрузки двигатель развивал 3825 кВт при 600 об/мин, расход топлива составлял 726.3 кг/ч, удельный расход топлива — 189.9 г/кВт·ч, а приведенное по ISO значение — 185.6 г/кВт·ч. Основные сопоставляемые параметры приведены в таблице 1.

Текущие замеры относятся к периоду 31.03.2026–03.04.2026. По судовым и диагностическим данным двигатель в момент измерений работал при частоте около 594.8–595.1 об/мин, то есть практически вблизи номинального режима по скорости. При этом суммарная индикаторная мощность составила около 3883.9 кВт, а средняя нагрузка по цилиндрам находилась на уровне порядка 86.3%. Нарботка двигателя к моменту измерений превышала 88 тыс. часов, что делает сравнение с заводской базой особенно показательным.

Дополнительно использован отчет MarPrime Instruct, который важен не только как источник текущих измеренных значений, но и как инструмент для анализа скорректированных параметров и предварительной оценки СИ. Это позволяет рассматривать двигатель не изолированно, а в составе общей системы энергоэффективности судна.

Таблица 1. Сопоставление параметров приемо-сдаточных испытаний и текущих эксплуатационных данных главного двигателя MaK 9M32C

Параметр	Приемо-сдаточные испытания, 85% нагрузки	Текущее состояние
Мощность, кВт	3825	3883,9
Частота вращения, об/мин	600	594,8
Нагрузка, %	85	86,3



Среднее эффективное давление, бар	22,02	22,6
Расход топлива, кг/ч	726,3	717,5
Удельный расход топлива, г/кВт*ч	189,9	184,74
Удельный расход топлива ISO, г/кВт*ч	185,6	180,6
Давление наддува после турбины, бар	2,502	2,1
Температура воздуха после охладителя, °C	41	42
Температура выпускных газов по цилиндрам, °C	373-411	376-403
Наработка, ч	Заводские испытания	88015

Значения ISO-corrected параметров при оценке энергоэффективности

На практике прямое сравнение заводских и текущих параметров двигателя не всегда корректно. Эксплуатационные измерения зависят не только от технического состояния двигателя, но и от внешних условий: температуры воздуха, влажности, давления, температуры охлаждающей воды, характеристик топлива и конкретного режима работы судна. Из-за этого одни и те же параметры могут заметно меняться даже при близком техническом состоянии двигателя.

Поэтому в отчетах MarPrime особое значение имеют ISO-corrected values. По сути, это те же текущие параметры, но приведенные к стандартным эталонным условиям, что позволяет сравнивать их с заводскими и проектными значениями более корректно. Такой подход дает возможность отделить влияние внешних условий от изменений, связанных именно с эксплуатацией двигателя.

Для задач, связанных с энергоэффективностью, это особенно важно. Если анализировать только измеренные значения, можно получить искаженную картину. Например, рост расхода топлива или изменение мощности может быть вызван не только изменением технического состояния двигателя, но и различием условий замера. Поэтому для инженерных выводов правильнее рассматривать одновременно как фактические measured values, так и значения, приведенные к эталонным условиям.

Сопоставление заводских и текущих параметров двигателя

Для корректного анализа в качестве референсного режима был принят не номинальный режим полного хода, а режим приемо-сдаточных испытаний при 85%, поскольку фактическая эксплуатационная нагрузка главного двигателя в рассматриваемом замере составляла около 86.3%. Такой подход позволяет сравнивать двигатель не с абстрактным номиналом, а с режимом, максимально близким к его реальной работе в момент измерения. По данным заводских испытаний, при 85% нагрузки двигатель MaK 9M32C развивал 3825 кВт при 600 об/мин, расход топлива составлял 726.3 кг/ч, удельный расход топлива — 189.9 г/кВт·ч, а приведенное по ISO значение — 185.6 г/кВт·ч.

По текущим эксплуатационным данным двигатель работал практически вблизи номинальной частоты вращения — около 594.8–595.1 об/мин. При этом суммарная индикаторная мощность составила 3883.9 кВт, то есть оказалась немного выше заводского значения для режима 85% нагрузки. Среднее компрессионное давление по цилиндрам составило 136.8 бар, среднее максимальное давление — 161.5 бар, а среднее индикаторное давление — 22.6 бар. Индикаторная мощность по цилиндрам изменялась в диапазоне от



411.2 до 446.2 кВт, при среднем значении 431.5 кВт на цилиндр. Эти данные позволяют сделать вывод, что двигатель в рассматриваемый момент работал в устойчивом режиме без выраженного критического разбаланса по цилиндрам.

Дополнительный интерес представляет сопоставление топливной экономичности двигателя с заводскими референсными показателями. При фактическом расходе топлива 717.5 кг/ч и суммарной индикаторной мощности 3883.9 кВт расчетный удельный расход топлива составляет 184.7 г/кВт·ч. Если использовать для сопоставления заводской коэффициент перехода от фактического к ISO-corrected значению для режима 85%, то расчетное приведенное значение удельного расхода топлива для текущего режима можно оценить на уровне 180.6 г/кВт·ч. Таким образом, в рассматриваемом режиме текущая топливная экономичность двигателя находится на уровне, сопоставимом с заводской базой для 85% нагрузки, а по расчетному значению удельного расхода топлива даже несколько лучше референсного значения. Это особенно важно для последующей оценки энергоэффективности судна и анализа фактического показателя углеродной интенсивности СП.

Таблица 2. Основные цилиндровые параметры главного двигателя по данным измерений

Цилиндр	Давление сжатия, бар	Давление сгорания, бар	Среднее эффективное давление, бар	Индикаторная мощность, кВт
1	136,7	164,7	22,6	433,1
2	139,6	160,7	22,2	425,2
3	140,0	164,4	23,0	441,1
4	136,9	159,8	21,5	411,2
5	132,8	156,5	22,7	434,2
6	140,3	164,2	21,8	416,7
7	135,9	159,9	23,0	440,7
8	135,3	162,3	22,8	435,5
9	134,0	160,9	23,3	446,2
Среднее	136,8	161,5	22,6	431,5

Сопоставление текущих параметров с заводским режимом 85% нагрузки показывает, что после значительной наработки двигатель сохраняет удовлетворительное техническое состояние и работает в режиме, близком к расчетному. Вместе с тем различие между отдельными цилиндрами, а также необходимость учета ISO-corrected параметров подтверждают, что оценка энергоэффективности должна выполняться не по одному показателю, а по совокупности параметров, характеризующих как рабочий процесс в цилиндрах, так и общую топливную экономичность двигателя.

Анализ температур выпускных газов и рабочих параметров

По судовой форме производительности и данным Engine Performance Data в рассматриваемом режиме были зафиксированы параметры, характерные для нормальной эксплуатации: частота вращения около 595–600 об/мин, температура топлива порядка 34–36°C, давление топлива на входе в двигатель около 4.5–5.5 бар, температура наддувочного воздуха около 42°C, а давление — около 2.1 бар. Для корректной инженерной оценки эти показатели целесообразно сопоставлять именно с заводским режимом 85% нагрузки, который по нагрузке наиболее близок к фактической работе двигателя в момент замера.

Особый интерес представляет анализ температур выпускных газов по цилиндрам. По данным испытаний 85% нагрузки температура выпускных газов по цилиндрам находилась в диапазоне 373–411°C, а среднее значение составляло около 387.2°C. В текущем



эксплуатационном состоянии диапазон составил 376–403°C, а среднее значение — 387.0°C. Следовательно, средний температурный уровень практически совпадает с заводским, однако распределение температур по отдельным цилиндрам изменилось. Это свидетельствует о том, что в целом тепловое состояние двигателя остается близким к расчетному, но по отдельным цилиндрам уже проявляется влияние длительной эксплуатации. Наиболее наглядно это видно при сопоставлении значений на отдельном графике температур выпускных газов.

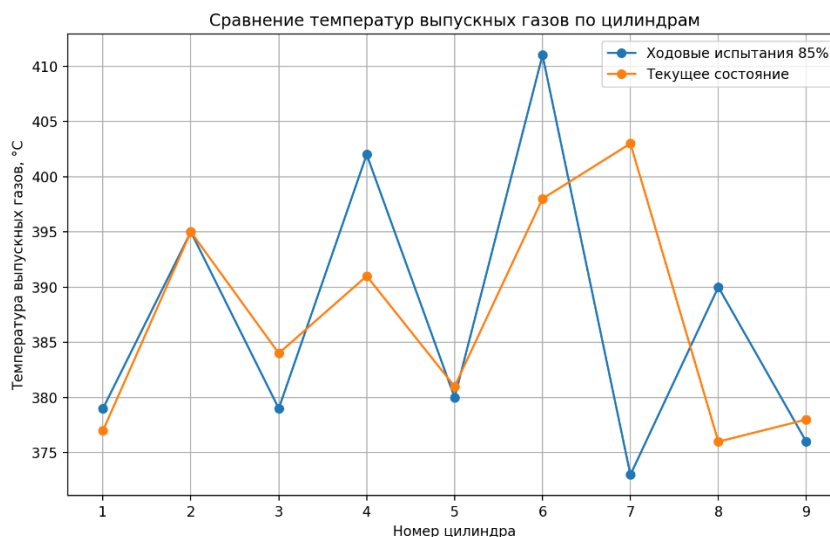


Рисунок 1 – Сравнение температур выпускных газов по цилиндрам

Как показывает сравнение, наиболее заметные отличия наблюдаются по цилиндрам 4, 6, 7 и 8. При этом критического роста температур не зафиксировано, а характер распределения скорее указывает на перераспределение тепловой нагрузки между цилиндрами, чем на явно аварийное состояние. Для практической оценки энергоэффективности это важно, поскольку температура выпускных газов является косвенным индикатором полноты сгорания топлива и равномерности рабочего процесса в цилиндрах.

Не менее важным параметром является топливная экономичность двигателя. Расчет удельного расхода топлива показал, что при текущем режиме работы он составляет 184.7 г/кВт·ч, а расчетное приведенное значение — около 180.6 г/кВт·ч. Если сопоставить эти значения с данными заводских испытаний, где фактический удельный расход топлива составлял 189.9 г/кВт·ч, а ISO-corrected — 185.6 г/кВт·ч, можно сделать вывод, что в рассматриваемом режиме двигатель не демонстрирует явного ухудшения топливной экономичности. Для наглядности такое сравнение целесообразно представить на отдельном графике удельного расхода топлива.

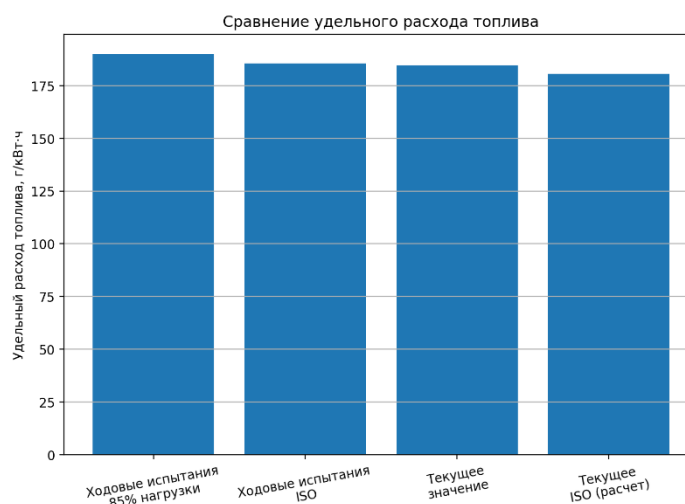


Рисунок 2 – Сравнение удельного расхода топлива

Следует отметить, что значение 180.6 г/кВт·ч для текущего режима является расчетной ISO-оценкой, а не прямым значением из отчета программы. Однако даже в таком виде оно полезно для инженерного анализа, так как показывает, что в исследуемом режиме двигатель работает на уровне, сопоставимом с заводским эталоном для режима 85% нагрузки. В совокупности с анализом температур выпускных газов это позволяет сделать вывод о сохранении удовлетворительного рабочего состояния главного двигателя при рассматриваемой наработке.

Связь энергоэффективности двигателя с показателем СП

Показатель углеродной интенсивности судна СП напрямую связан с количеством топлива, израсходованного на выполнение транспортной работы. Это означает, что фактическая энергоэффективность главного двигателя оказывает на СП вполне практическое влияние. Чем выше расход топлива на единицу полезной мощности, тем больше расчетный объем выбросов CO₂ и тем менее благоприятным становится фактическое значение СП.

В рассматриваемом случае расчетный удельный расход топлива двигателя находится на уровне, сопоставимом с заводскими референсными данными для режима 85% нагрузки. Это позволяет сделать вывод, что в исследуемый период главный двигатель работал без выраженного ухудшения топливной экономичности. Следовательно, при прочих равных условиях текущее состояние двигателя не должно оказывать резко негативного влияния на фактический показатель углеродной интенсивности судна. Вместе с тем даже небольшие изменения в топливной экономичности, особенно при длительной эксплуатации, могут в сумме существенно отражаться на значении СП, поскольку этот показатель формируется по результатам продолжительной работы судна, а не по одному кратковременному замеру.

С инженерной точки зрения это означает, что контроль СП не должен ограничиваться только расчетом итогового значения. Намного важнее отслеживать причины его изменения, а именно: изменение удельного расхода топлива, отклонение рабочих параметров цилиндров, перераспределение температур выпускных газов и другие признаки изменения фактического состояния двигателя. В этом отношении цифровые системы мониторинга, такие как MarPrime и Maridis, представляют собой удобный инструмент, позволяющий связать технические параметры двигателя с общей экологической эффективностью судна.

Таким образом, в рамках настоящего исследования показатель СП рассматривается не как изолированная экологическая характеристика, а как итоговый индикатор, отражающий

совокупное влияние эксплуатационного состояния энергетической установки на топливную экономичность судна.

Практическое значение сравнения с заводскими данными

Наличие прямо-сдаточных испытаний существенно повышает практическую ценность выполненного анализа. Без такой референсной базы можно оценивать только текущее состояние двигателя, не имея объективной точки отсчета. В этом случае видно, как двигатель работает в настоящий момент, но сложно уверенно судить, насколько его параметры изменились по сравнению с исходным состоянием после изготовления и прямо-сдаточных испытаний.

В рассматриваемой работе особенно важно, что сравнение выполнено не с режимом 100% нагрузки, а с режимом 85% нагрузки, который наиболее близок к фактической эксплуатационной нагрузке двигателя в момент замера. Такой подход позволяет избежать завышенной оценки отклонений и делает выводы более корректными с инженерной точки зрения. Сопоставление текущих параметров с референсным режимом показывает, что по суммарной мощности, среднему индикаторному давлению, температурному уровню выпускных газов и расчетной топливной экономичности двигатель остается близким к заводским значениям для аналогичной нагрузки. Вместе с тем различия по отдельным цилиндрам указывают на уже сформировавшиеся эксплуатационные особенности, которые необходимо учитывать при дальнейшем мониторинге.

Практическая значимость такого анализа заключается в том, что он позволяет перейти от общей оценки «двигатель работает нормально» к более предметному инженерному выводу. Становится возможным не только фиксировать текущее состояние, но и отслеживать динамику изменений после наработки, технического обслуживания и major overhaul. При накоплении аналогичных отчетов за несколько периодов можно будет проследить, в какой момент изменение рабочих параметров начинает приводить к ухудшению топливной экономичности и, как следствие, к изменению фактического СП.

Именно в этом заключается практическая ценность совместного использования заводских испытаний, судовых форм производительности и цифровых диагностических отчетов MarPrime и Maridis: они позволяют не только описывать состояние главного двигателя, но и обосновывать его влияние на энергоэффективность и экологические показатели судна.

Заключение

Проведенный анализ показывает, что данные, полученные с использованием систем MarPrime и Maridis, могут служить надежной основой для оценки энергоэффективности судна в реальной эксплуатации. Их основное преимущество заключается в том, что они позволяют рассматривать главный двигатель не только как источник мощности, но и как ключевой фактор, влияющий на топливную экономичность и показатель углеродной интенсивности судна.

По результатам исследования можно сделать несколько основных выводов.

Во-первых, для корректного сравнения текущего состояния двигателя MaK 9M32C с заводской базой следует использовать не режим полного хода, а режим 85% нагрузки, поскольку именно он соответствует фактической рабочей нагрузке двигателя в момент измерений. Такой подход делает анализ более точным и инженерно обоснованным.

Во-вторых, текущие эксплуатационные данные показывают, что при наработке около 88 тыс. часов двигатель сохраняет в целом удовлетворительное рабочее состояние. Существенного критического разбаланса по цилиндрам не наблюдается, а средний температурный уровень выпускных газов практически совпадает с заводским значением



для аналогичной нагрузки. Вместе с тем различия по отдельным цилиндрам подтверждают, что эксплуатационные изменения уже присутствуют и требуют дальнейшего контроля.

В-третьих, расчетный текущий удельный расход топлива 184.7 г/кВт·ч и ориентировочное приведенное значение 180.6 г/кВт·ч показывают, что топливная экономичность двигателя в рассматриваемом режиме остается на уровне, сопоставимом с заводскими референсными значениями для 85% нагрузки. Это свидетельствует о том, что в момент исследования выраженного ухудшения энергоэффективности двигателя не выявлено.

В-четвертых, изменение фактического состояния двигателя непосредственно связано с показателем углеродной интенсивности СII, поскольку именно через изменение расхода топлива формируется итоговое значение углеродной эффективности судна. Следовательно, контроль энергоэффективности главного двигателя следует рассматривать как один из практических способов управления СII в эксплуатации.

Таким образом, использование заводских данных, текущих эксплуатационных измерений и цифровых диагностических систем позволяет перейти от формального наблюдения за показателем СII к инженерному анализу причин его изменения. Для современного судоходства такой подход представляется особенно актуальным, так как объединяет оценку технического состояния двигателя, его топливной экономичности и экологической эффективности судна в единую практическую систему контроля.

Список литературы:

1. International Maritime Organization. Resolution MEPC.328(76): Amendments to MARPOL Annex VI. – London: IMO, 2021.
2. International Maritime Organization. Resolution MEPC.336(76): 2021 Guidelines on Operational Carbon Intensity Indicators and the Calculation Methods (CII Guidelines, G1). – London: IMO, 2021.
3. International Maritime Organization. Resolution MEPC.338(76): 2021 Guidelines on the Operational Carbon Intensity Reduction Factors Relative to Reference Lines (CII Reduction Factors Guidelines, G3). – London: IMO, 2021.
4. Caterpillar Marine Power Systems. Diesel Engine Acceptance Test Record. MaK 9M32C, Engine No. 38401.
5. Maridis GmbH. Performance Report MarPrime Instruct for Main Engine MaK 9M32C.
6. Engine Performance Data: Hul123, 31.03.2026.
7. Cylinder Indication Report “Coral Lophelia”, 03.04.2026.
8. Main Engine Performance Report “Coral Lophelia”, 31.03.2026.

