



МЕХАНИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ДВИЖИТЕЛИ

УДК 629.541
EDN OPGOYR

ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБОВ ОБРАБОТКИ БАЛЛАСТНЫХ ВОД НА ПОКАЗАТЕЛИ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ СУДНА

В.К. Шурпьяк, канд. техн. наук, Российский морской регистр судоходства, 191186 Россия, Санкт-Петербург, ул. Миллионная, 7А, e-mail: shurpyak.vk@rs-class.org

М.В. Петров, главный специалист, Российский морской регистр судоходства, 191186 Россия, Санкт-Петербург, ул. Миллионная, 7А, e-mail: petrov.mv@rs-class.org

Д.М. Петрова, магистр Института гидрологии и океанологии Российского государственного гидрометеорологического университета, 192007 Россия, Санкт-Петербург, Воронежская ул., 79А, e-mail: daria_98_petrova@mail.ru

В статье рассмотрены основные способы обработки водяного балласта и влияние их на показатель энергоэффективности СИ. В соответствии с поправками к МК УБВ, принятыми Резолюцией ИМО МЕРС.297(72), с 8 сентября 2024 г. все суда, совершающие международные рейсы, должны иметь Систему управления балластными водами (СУБВ), удовлетворяющую правилу D-2 МК УБВ, и своевременно производить обработку балластных вод. Это требует определенных энергозатрат, которые зависят от типа СУБВ, установленной на судне, что, в свою очередь, влияет на показатели эксплуатационной углеродной интенсивности (СИ). В статье проведен сравнительный анализ энергозатрат на обработку балласта различными методами, нашедшими применение на российских судах, и определено влияние использования СУБВ на показатели СИ. Определены параметры судна и СУБВ, определяющие изменение показателя СИ в результате использования СУБВ.

Целью работы является оценка влияния потребления энергии СУБВ на показатели энергоэффективности морских судов и определение параметров судна, влияющих на увеличение СИ. Проведенные расчеты показали, что наибольшему влиянию (до нескольких процентов) подвержены крупнотоннажные танкеры, перевозящие груз на линиях с коротким плечом и использующие СУБВ, основанные на ультрафиолетовой обработке водяного балласта.

Ключевые слова: водяной балласт, системы управления балластными водами, энергоэффективность, критерии энергоэффективности морских судов, показатель эксплуатационной углеродной интенсивности (СИ).

Для цитирования: Шурпьяк В.К. Влияние различных способов обработки балластных вод на показатели энергоэффективности судна / В.К. Шурпьяк, М.В. Петров, Д.М. Петрова // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2026. — Т. 56, № 2. — С. 130–141. — EDN OPGOYR.

THE IMPACT OF VARIOUS BALLAST WATER TREATMENT METHODS ON THE SHIP'S ENERGY EFFICIENCY

V.K. Shurpyak, PhD, Russian Maritime Register of Shipping, 191186 Russia, St. Petersburg, Millionnaya ul., 7A, e-mail: shurpyak.vk@rs-class.org

M.V. Petrov, Chief Specialist, Russian Maritime Register of Shipping, 191186 Russia St. Petersburg, Millionnaya ul., 7A, e-mail: petrov.mv@rs-class.org

D.M. Petrova, MSc, Institute of Hydrology and Oceanology, Russian State Hydrometeorological University, 192007 Russia, St. Petersburg, Voronezhskaya ul., 79A, e-mail: daria_98_petrova@mail.ru

The article addresses the main methods of ballast water treatment and their impact on the energy efficiency index (CII). In connection with the amendments to the International Convention for the Control and Management of Ships' Ballast Water and Sediments (BWM), adopted by IMO Resolution MEPC.297 (72), dated September 8, 2024, all ships engaged in international voyages should be equipped with ballast water treatment systems (BWTS), which complies with Rule D-2 of the BWM Convention and timely carry out appropriate ballast water treatment. This processing requires additional energy consumption, which depends on the type of BWTS, which affects the operational carbon intensity indicators (CII). The article provides a comparative analysis of energy consumption for ballast treatment by various methods used on Russian ships and determines the impact of BWTS operation on CII indicators. The parameters of the ship and the BWTS have been determined, which define the change in the CII indicator as a result of the use of the BWTS.

The aim of the work is to estimate the impact of BWTS' energy consumption on the energy efficiency of marine ships and to determine the ship parameters that affect the increase in CII. The calculations show that supertankers carrying on short-distance voyages and using BWTS based on UV-treatment of ballast water are most affected (increase CII to several percent).

Keywords: ballast water, ballast water treatment systems, energy efficiency, criteria of ship energy efficiency, operational carbon intensity indicator (CII).

For citation: Shurpyak V.K., Petrov M.V., Petrova D.M. The impact of various ballast water treatment methods on the ship's energy efficiency. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2026. Vol. 56, No. 2. P. 130–141. EDN OPGOYR. (In Russ.)

ВВЕДЕНИЕ

Интенсивное развитие морского транспорта является мощным источником негативного воздействия на экологию. По данным ООН в текущем столетии суммарный грузооборот морских перевозок увеличивается ежегодно в среднем на 3 %, что серьезно повышает загрязнение нашей планеты. Принятые Международной морской организацией (ИМО) за последнюю половину века нормативные акты в МК МАРПОЛ контролируют загрязнение моря нефтью, мусором и сточными водами, и уже достигнуты определенные успехи в борьбе с этими видами загрязнения. Но кроме них, серьезную опасность для окружающей среды представляет биологическое загрязнение прибрежных акваторий балластными водами и загрязнение атмосферы с судов. Для предотвращения биологического загрязнения ИМО была разработана Международная конвенция о контроле судовых балластных вод 2004 года (МК BWM-2004), действующая в настоящее время. В соответствии с МК BWM-2004 все новые суда и суда, находящиеся в эксплуатации, в обязательном порядке должны оснащаться системами управления балластными водами (СУБВ), обеспечивающими обезвреживание вредных водных и патогенных организмов и контроль качества обработки и соответствующими Правилу D-2 МК BWM-2004.

Параллельно с этим ИМО прилагает усилия для уменьшения выбросов в атмосферу парниковых газов с судов, для чего в приложении VI к МК МАРПОЛ предусмотрены требования по энергетической эффективности судов, которые постоянно ужесточаются, уменьшая допустимые пределы выбросов CO₂ в атмосферу. Как об этом уже говорилось в работе [1], критерии энергоэффективности можно разделить на две группы: конструктивные и эксплуатационные. С помощью конструктивных можно оценить потенциальное энергетическое совершенство объекта при выполнении его функций по прямому назначению в течение жизненного цикла. Примером конструктивных показателей энергоэффективности судна может служить EEDI. Конструктивный коэффициент энергоэффективности для новых судов (EEDI — Energy Efficiency Design Index) представляет отношение выбросов CO₂, произведенных судном в единицу времени при следовании в полном грузу с проектной эксплуатационной скоростью, к транспортной работе, совершаемой судном. В анализе влияния различных судовых систем, произведенном в [2], сделан вывод, что поскольку на ходу судна балластная система не задействована и она не участвует в совершении транспортной работы, то поэтому и в расчетах конструктивных показателей потребления энергии ее не учитывают, хотя обработка балласта может производиться на ходу судна.

Иначе обстоит дело с эксплуатационным показателем СП, введенным поправками к Приложению VI к Конвенции МАРПОЛ, принятыми на 76-й сессии КЗМС. Эксплуатационные критерии учитывают затраты энергии и пользу, производимую объектом за какой-то промежуток времени, например календарный год, то есть показывают, насколько умело и эффективно использовался объект в течение этого периода. Индекс углеродной интенсивности (Carbon Intensity Indicator — СИ) учитывает выбросы CO_2 , произведенные судном в результате фактического потребления топлива за календарный год, и расстояние, пройденное судном в эксплуатации за этот период. Рассчитанный показатель достигнутого СИ совместно с данными по потребленному топливу должен представляться в Администрацию (или признанную организацию), где верифицируют полученную информацию и на ее основе определяют рейтинг углеродной интенсивности, который присваивается судну. В случае низкого рейтинга судна должен быть разработан и представлен Администрации план корректирующих действий. В расчетах СИ учитываются затраты топлива за период, когда судно не совершает транспортной работы, то есть производятся грузовые и балластные операции и обработка водяного балласта. Учитывая, что выполнение требований по соответствию судов критерию СИ ужесточаются с каждым годом, становится весьма актуальной задача минимизации затрат топлива на обработку балластных вод. Для того чтобы приступить к ее решению, попытаемся оценить влияние способа обработки балласта и объем балластных танков на показатель СИ для судов различных типов.

1. ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ОБРАБОТКИ ВОДЯНОГО БАЛЛАСТА НА КРИТЕРИЙ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ СИ

Для оценки влияния обработки водяного балласта на достигнутое значение критерия энергоэффективности судов СИ, который вычисляется согласно МЕРС.352(78) [3], его можно выразить как сумму изначального критерия энергоэффективности, который мы назовем СИ_0 , и прибавки СИ_{WBT} , которая должна учитывать выбросы CO_2 , связанные с обработкой балласта:

$$\text{attained СИ} = M/W = \frac{M_0 + M_{\text{WBT}}}{W} = \text{СИ}_0 + \text{СИ}_{\text{WBT}}, \quad (1)$$

где W — транспортная работа, которая вычисляется как суммарное расстояние L в морских милях, пройденное судном за год, умноженное на вместимость судна в тоннах (дедвейт для большинства типов грузовых судов);

M — суммарная масса в граммах эмиссии CO_2 с судна в течение года, которая рассчитывается путем суммирования массы каждого сорта потребленного топлива, перемноженного на соответствующий для этого сорта топлива переводной коэффициент, взятый из Руководства по расчету EEDI [4];

M_0 — суммарная масса эмиссии CO_2 с судна в течение года без учета эмиссии, связанной с обработкой балласта;

M_{WBT} — суммарная масса эмиссии CO_2 , полученной в результате выработки на судне электроэнергии, необходимой для работы установки для обработки водяного балласта, также в течение года.

$$\text{СИ}_{\text{WBT}} = M_{\text{WBT}}/W = \frac{P \cdot t \cdot g \cdot C_j}{L \cdot DWT}, \quad (2)$$

где P — потребляемая мощность судовой установки обработки водяного балласта, кВт;

t — суммарное время работы судовой установки обработки водяного балласта в течение года, ч;

g — удельный расход топлива судовыми вспомогательными генераторами, г/кВт·ч;

C_j — коэффициент преобразования используемого вида топлива, CO_2 в г CO_2 /г топлива;

L — суммарное расстояние, пройденное судном за год в морских милях;

DWT — вместимость судна (дедвейт для большинства типов грузовых судов), т.

Суммарное время работы установки обработки балласта в течение года можно вычислить как объем балластных танков на судне, деленный на производительность установки и умноженный на количество обработок балласта в течение года, что показано в формуле (3).

$$\text{СИ}_{\text{WBT}} = \frac{P \cdot g \cdot C_j \cdot V \cdot n / Q}{L \cdot DWT} = \frac{n \cdot m_0}{L \cdot DWT}, \quad (3)$$

где V — объем балластных танков, м^3 ;

Q — производительность судовой установки обработки водяного балласта, $\text{м}^3/\text{ч}$;

n — количество обработок балласта в течение года;

m_0 — эмиссия CO_2 в атмосферу в результате одной обработки балласта, г CO_2 ,

$m_0 = V \cdot m_1 = V \cdot P / Q \cdot g \cdot C_j$;

m_1 — эмиссия CO_2 в атмосферу в результате обработки одной тонны балласта на судне, г CO_2 .

Для удобства дальнейшего анализа введем вспомогательный коэффициент β , равный отношению объема балластных танков к дедвейту судна, что учтено в формуле (5).

$$CII_{WBT} = \frac{P \cdot D \cdot \beta \cdot n \cdot g \cdot C_j / Q}{L \cdot DWT}, \quad (5)$$

где β — безразмерный коэффициент балласта, равный суммарной массе переменного водяного балласта MV, деленного на дедвейт судна DWT:

$$\beta = MV/DWT = V \cdot \rho \cdot g / DWT \quad (6)$$

где $MV = V \cdot \rho \cdot g$,
 ρ — плотность воды в тоннах на m^3 , а $g = 9,8$ м/сек.

В результате сокращения и некоторых преобразований получается формула (7), позволяющая оценить величину увеличения критерия эксплуатационной энергоэффективности в результате обработки водяного балласта и провести анализ факторов, оказывающих влияние на эту величину.

$$CII_{WBT} = (n/L) \cdot (P/Q) \cdot g \cdot C_j \cdot \beta. \quad (7)$$

Анализ полученной формулы (7) позволяет выделить четыре фактора, влияющих на энергетическую эффективность процесса:

- эксплуатационный фактор n/L , характеризуется средним расстоянием, которое проходит судно между двумя обработками балласта, то есть среднее «плечо», на котором оно эксплуатируется в течение года;
- фактор, характеризующий энергетическую эффективность судовой установки обработки балласта P/Q , можно представить как отношение потребляемой мощности к производительности установки;
- фактор, характеризующий экологичность выработки электроэнергии в судовой электростанции, зависит от удельного расхода топлива вспомогательного дизель-генератора g и переводного коэффициента выбросов CO_2 , характерного для топлива C_j , применяемого на судне для выработки электроэнергии;
- фактор β , характеризующий эффективность конструкции судна как величину, характеризующую соотношение массы водяного балласта и полезного груза, перевозимых на судне.

Дополнительно можно отметить, что, хотя грузоподъемность (дедвейт) не присутствует в формуле (7), влияние ее на энергоэффективность проявляется через коэффициент β , который обычно принимает меньшее значение для более крупных судов.

2. ОБЗОР РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДОВ УПРАВЛЕНИЯ БАЛЛАСТОМ НА СУДАХ С КЛАССОМ РЕГИСТРА

Все способы обработки балласта обычно делят на четыре группы [5] в зависимости от основного принципа воздействия на живые организмы в балластной воде:

- физические — нагревание, деоксигенизация, обработка ультразвуком, кавитация, ультрафиолетовое облучение, обработка магнитным полем (коагуляция/флокуляция), ионизация серебром;
- механические — фильтрация, сепарация в гидроциклах;
- химические — озонирование, хлорирование, удаление кислорода, электролиз, обработка химикатами (хлором, гидрохлоридом);
- биологические — добавление в балластную воду хищных или паразитных организмов с целью уничтожения вредных микроорганизмов.

Стандарт качества балластных вод D-2, действующий согласно МК BWM-2004 в настоящее время, устанавливает минимальное количество живых организмов, которые могут содержаться в балластной воде, подвергнутой обработке с помощью специальной системы, которая должна быть установлена на судне. В балластной воде, прошедшей обработку для подготовки к сбросу, должно содержаться менее 10 жизнеспособных организмов (размерами более 50 мкм) на $1 m^3$ и менее 10 жизнеспособных организмов (размерами от 10 до 50 мкм) на 1 мл. Необходимо отметить, что среди перечисленных методов обработки нет достаточно эффективного и экономичного, каждый из предлагаемых методов имеет свои достоинства и недостатки, что диктует ограничения по их применению. Ниже приводятся краткие сведения о способах обработки, которые применяются в системах, имеющих типовое одобрение Регистра.

Процессы, применяемые при физико-химической очистке балласта, весьма разнообразны, но каждый из них имеет свои недостатки и ограничения. Очень часто в СУБВ применяется сочетание двух и более различных методов обработки балластной воды с целью обеспечения норм, установленных в Правиле D-2 МК УБВ ввиду того, что разные методы эффективны для разных типоразмеров биологических организмов, присутствующих в балластных водах. Для реализации сильных сторон и нейтрализации недостатков во многих установках применяются одновременно или последовательно несколько технологий обработки балластной воды [6].

Механическая фильтрация. Среди способов обработки балласта наиболее широкое применение на судах получила механическая фильтрация, где сетчатые фильтры препятствуют проникновению организмов размером более 50 мкм. Помимо этого, мелкие сетчатые фильтры позволяют уменьшить образование отложений в балластных танках. Недостатком механической фильтрации является быстрое засорение фильтров, требующее частой самоочистки фильтрующих элементов обратным током. Это существенно снижает скорость заполнения балластного танка. Кроме того, при уменьшении ячейки сетчатых фильтров создается существенное противодавление, что увеличивает энергоемкость процесса. Для уменьшения частоты самоочисток фильтра на него подают воду, прошедшую предварительную обработку в гидроциклоне, который позволяет отсепарировать все живые организмы, чья плотность больше плотности воды.

Кавитация. В специальном устройстве в балластной воде образуется кавитация в результате высоких местных скоростей воды. Схлопывание кавитационных пузырьков создает волны давления, разрушающие клеточную мембрану микроорганизмов. Достоинствами метода является простота конструкции, безвредность для окружающей среды, процесс не зависит от солености и температуры воды. Недостатком является возникновение сильного противодавления и отсутствие надежной однородности обработки воды по всему объему балластного танка. Метод применяется в сочетании с другими методами, например УФ-излучением, позволяя понизить необходимую мощность излучения и потребляемую электроэнергию.

Ультрафиолетовое излучение. Система воздействует ультрафиолетом на клеточную мембрану микроорганизмов, повреждая ее. Достоинствами метода являются простота монтажа и обслуживания оборудования, безвредность для окружающей среды, процесс обработки балластной воды не зависит от солености и температуры. Существенными недостатками являются высокая энергоемкость и зависимость от общего содержания взвешенных веществ (коэффициента прозрачности балластной воды). Кроме этого, в процессе эксплуатации требуется регулярная замена УФ-ламп и очистка кварцевых экранов.

Химические реагенты. Метод дезинфекции балластной воды различными активными химическими веществами обладает рядом преимуществ: низкое энергопотребление при высокой производительности, сравнительно низкая стоимость первичной установки на судне. Но высокая токсичность дезинфицирующих веществ требует специального помещения для хранения реагентов на судне. Кроме того, для дезинфекции химических реагентов перед сбросом обработанной воды за борт необходима их нейтрализация, для чего требуются специальные вещества. Высокая стоимость расходного материала во многом нивелирует низкую стоимость установки.

Электрохлорирование/электролиз. При электролизе содержащаяся в морской воде соль (хлорид натрия) образует свободный хлор, который растворяется в балластной воде и выполняет роль дезинфицирующего активного химического вещества, которое производится на судне из заборной воды. Высокая эффективность и производительность этого метода сочетаются с высокой надежностью, система нейтрализует широкий спектр патогенных микроорганизмов. К недостаткам следует отнести зависимость от солености воды, кроме того, высокая концентрация хлора усиливает коррозию в балластной системе. Как и при использовании химических реагентов, необходима нейтрализация выработанного хлора перед сбросом обработанной воды за борт.

Для достижения требований стандарта D-2 приходится применять сочетание нескольких технологий обработки балластной воды. Комбинирование различных способов обработки обеспечивает высокую производительность, а специфичность действия каждого способа обработки на тот или иной вид микроорганизмов обеспечивает стабильность обеззараживания в процессе хранения балластных вод на судне. Однако использование в одной системе нескольких способов обработки приводит к существенному усложнению и удорожанию оборудования. При этом важно обеспечить безопасность применяемых технологий для судна, людей и окружающей среды.

На первом международном симпозиуме по проблемам водяного балласта, который проводился в марте 2001 г., были приняты пять основных критериев, которым должны соответствовать технологии по обработке балластной воды:

- безопасность для судна и экипажа;
- отсутствие вреда для окружающей среды (технология не должна причинять больший ущерб, чем она предотвращает);

- практичность (совместимость с конструкцией судна);
- экономичность;
- биологическая эффективность.

С тех пор прошло много лет, разработана и принята конвенция, которая сейчас успешно применяется на судах, но вопрос об энергетической эффективности применяемых технологий, на который ранее не обращали особого внимания, в последнее время, после введения ИМО требований по энергоэффективности, становится все более острым.

В документе МЕРС 84/6/8 [7], представленном в 2026 г. на КЗМС 84, неправительственной организацией ИНТЕРТАНКО рассказано о проведенных на 27 различных танкерах в 48 рейсах замерах энергии, израсходованной на обработку балласта. Результаты показали, что выбросы CO_2 увеличились в среднем на 9 %, а СП увеличился в среднем на 6,4 % за рейс. Тип СУБВ, размеры судов и характер их эксплуатации в документе не уточняются. Однако такое существенное влияние на показатель СП вызвало у авторов настоящей статьи некоторые сомнения. В результате было решено проверить расчетом возможность такого сильного влияния обработки балласта на энергоэффективность для нескольких судов, отчеты о потреблении топлива и эксплуатации которых представлены в Регистр согласно требованиям МК МАРПОЛ.

3. СРАВНЕНИЕ ЭНЕРГОЗАТРАТ НА ОБРАБОТКУ ОДНОЙ ТОННЫ БАЛЛАСТНОЙ ВОДЫ РАЗЛИЧНЫМИ МЕТОДАМИ

Наиболее распространенным типом СУБВ, устанавливаемых на судах с классом Регистра, являются системы, использующие метод обработки УФ-излучением. На судах с классом Регистра нашли применение СУБВ следующих производителей, работающие на основе УФ-излучения: Optimarin (Норвегия), Alfa Laval (Швеция), Shanghai (Китай), Hyde Guardian (США), Panasia (Корея), COSCO Shipping Heavy Industry Technology (Китай), Wuxi Brightsky Electronic Co (Китай). В сумме доля систем, работающих на основе УФ-излучения, составляет около 95 % от всех СУБВ, установленных на российских судах.

СУБВ на основе электролиза — S&SYS Co (Корея), Headway Technology Group (Китай), SunRui Marine Environment Engineering Co (Китай), Erma First (Греция) — находят применение на крупнотоннажных танкерах и газовозах.

Кроме перечисленных двух основных типов СУБВ на российских судах есть единичные случаи применения установки, работа которой основана на деоксигенизации и азотировании, производства Jiangsu Nanji Machinery Co. (Китай).

Рассмотрим зависимость энергопотребления от метода обработки различных установок, имеющих свидетельства о типовом одобрении (СТО) Регистра, применяемых на российских судах (данные получены с сайтов производителей и из СТО).

Таблица 1

Характеристики установок обработки балластных вод, применяемых на судах с классом Регистра

Тип СУБВ, производитель	Метод	Производительность (Q , м ³ /ч)	Потребляемая мощность (P , кВт)	Затраты* на обработку 1 т воды P/Q (кВт·ч/м ³)	Выбросы** CO ₂ на 1 т балласта m_1 (г CO ₂ /м ³)
BSKY-250 Optimarin		Электролиз	2600	44,2	0,017
		250	38,9	0,156	199,54**
Pure Ballast Alfa Laval	Обработка УФ-излучением	1000	82	0,082	105,16**
		250	32	0,128	164,15**
Ni Ballast Jiangsu Nanji Machinery	Обработка УФ-излучением	1000	102	0,102	130,80**
		200	0,4	0,002	1,28
Ocean Guard BWMS, Headway Technology Group	Азотирование (Деоксигенизация)	1000	1,2	0,0012	0,77
		1000	17	0,017	10,90
* В выполненном расчете расход топлива (ДТ) на получение электроэнергии принят равным 200 г/кВт·ч при коэффициенте преобразования массы топлива в массу выбросов CO ₂ , равном 3,206.					
** Учтена необходимость двойной обработки балласта для систем, основанных на обработке воды с помощью УФ-излучения.					

Сравнение энергоэффективности различных СУБВ говорит о том, что системы, основанные на электролизе, требуют в 5–6 раз меньше электроэнергии, чем системы, основанные на ультрафиолетовой обработке. Кроме этого, энергоэффективность однотипных установок значительно повышается с увеличением их производительности. Показатели энергоэффективности СУБВ, основанных на принципе деоксигенизации и азотирования, не отражают действительную эффективность установки, так как не учитывают затрат энергии на получение азота.

Из табл. 1 следует, что наименее эффективными установками обработки балласта являются те, принцип действия которых основан на применении ультрафиолетового излучения. Эти же установки получили наиболее широкое применение на российских судах. Примем для дальнейшей оценки наименее энергетически эффективную установку с показателем $P/Q = 0,156 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^3$.

4. ОЦЕНКА УВЕЛИЧЕНИЯ СП В РЕЗУЛЬТАТЕ ОБРАБОТКИ БАЛЛАСТА

Для оценки влияния обработки балласта используем формулу (7) и рассмотрим три судна: нефтеналивные танкеры дедвейтом 100 000 и 8000 т и судно для генеральных грузов дедвейтом 8000 т. При этом для целей оценки влияния обработки балласта на показатель энергоэффективности для этих судов примем одинаковый вид топлива (ДТ) и его расход на получение электроэнергии $g = 200 \text{ г/кВт} \cdot \text{час}$ при коэффициенте выбросов CO_2 , равном $3,206 \text{ г CO}_2\text{-экв} / \text{г топлива}$, взяв за основу рекомендации ИМО для расчета EEDI [4].

Для определения конструктивного показателя β был проведен анализ отношения массы водяного балласта к дедвейту российских танкеров по данным Регистровой книги судов. Результаты анализа показаны на рис. 1. Для танкера дедвейтом 100 000 т принимаем по линии тренда $\beta = MV/DWT = 0,38$, соответственно, общий объем балласта составит 38 000 т.

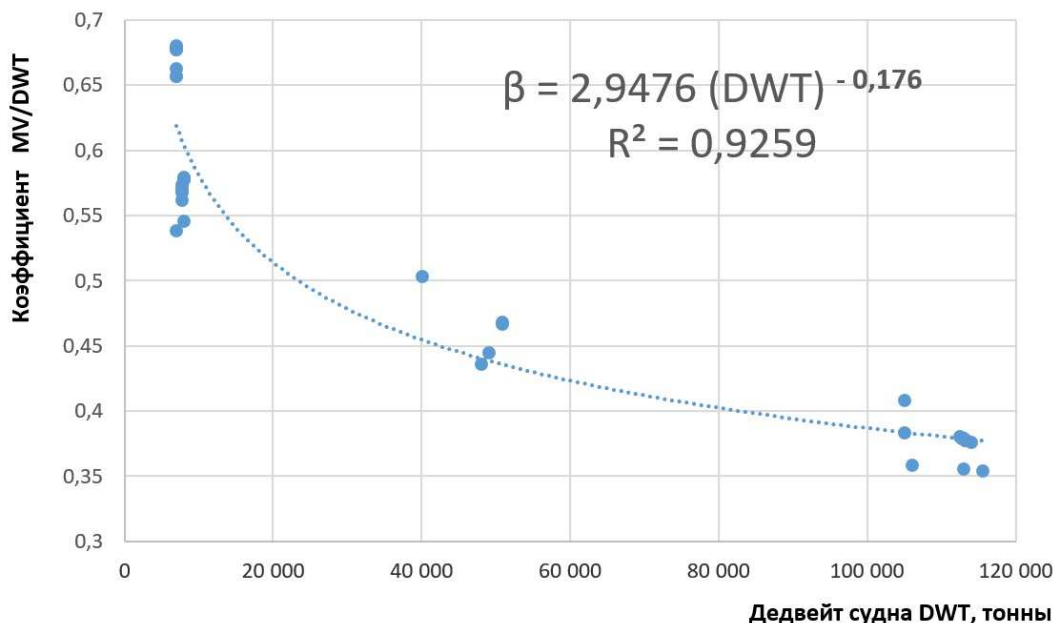


Рис. 1. Отношение объема балластных танков к дедвейту судна $\beta = MV/DWT$ для нефтеналивных судов в зависимости от дедвейта судна

Для проведения оценки были проанализированы данные об эксплуатации российских судов в 2023 г. Пройденное за год расстояние для нефтеналивных танкеров дедвейтом более 100 000 т составило от 31 000 до 85 000 морских миль, а среднее — 50 000 миль с коэффициентом ходового времени от 0,3 до 0,83 и средним значением 0,51. Для проведения оценки примем средние значения — танкер дедвейтом 100 000 т прошел за год 50 000 миль, считаем, что половину этой дистанции судно шло в грузу, следовательно, обработка балласта не требовалась. Количество обработок балласта за год n определяем как половину пройденного судном за год расстояния, деленного на расстояние до пункта назначения.

Используя формулу (4), определим эмиссию CO_2 за одну обработку балласта m_0 , т CO_2 :

$$m_1 = P/Q \cdot g \cdot C_j = 0,156 \cdot 200 \cdot 3,206 = 100 \text{ г } \text{CO}_2/\text{т},$$

$$m_0 = V \cdot m_1 = \beta \cdot DWT \cdot m_1 = 0,38 \cdot 100\,000 \cdot 100 = 3,8 \text{ т } \text{CO}_2.$$

Эмиссия в атмосферу в результате одной обработки балласта для судна дедвейтом 100 000 т составит 3,8 т CO_2 , а с учетом того, что установки на основе УФ-облучения требуют две обработки за рейс (на приеме и при откачке балласта), выбросы составят 7,6 т CO_2 за один цикл погрузки-разгрузки танкера.

Рассмотрим несколько вариантов эксплуатации танкера дедвейтом 100 000 т по маршрутам Новороссийск–Александрия, Новороссийск–Мадрас (через Суэцкий канал) и Новороссийск–Гонконг (через Суэцкий канал). Результаты расчета представлены в табл. 2. Из результатов следует, что крупнотоннажный танкер, используемый на короткой дистанции с установкой, работа которой основана на использовании УФ-излучения, ухудшает свой показатель СП на несколько процентов.

Таблица 2

Влияние обработки балласта на критерий СП для нефтеналивного танкера дедвейтом 100 000 т в зависимости от района эксплуатации

Маршрут	Расстояние L , мили	Обработок* балласта в год	СП _{WBT}	Требуемый СП**	СП _{WBT} /СП, %
Новороссийск–Стамбул	456	110	0,0836	4,349	1,92
Новороссийск–Александрия	1178	42	0,032	4,349	0,74
Новороссийск–Мадрас	5279	10	0,0076	4,349	0,17
Новороссийск–Гонконг	7716	6	0,0045	4,349	0,10

* С учетом необходимости двойной обработки балласта установкой на основе УФ-обработок.
 ** Требуемый СП рассчитан с учетом понижающего коэффициента Z для 2025 г.

Далее для сравнения рассмотрим несколько вариантов эксплуатации танкера дедвейтом 8000 т по маршрутам Новороссийск–Стамбул, Новороссийск–Измир и Новороссийск–Александрия. Проанализировав данные об эксплуатации российских нефтеналивных танкеров дедвейтом до 9000 т, определяем, что пройденное за год расстояние для таких судов составило 16 500–34 000 морских миль, а среднее — 23 000 миль с коэффициентом ходового времени от 0,3 до 0,77 и средним значением 0,44. Для проведения оценки принимаем средние значения: танкер дедвейтом 8000 т прошел за год 23 000 миль. Для нефтеналивного танкера дедвейтом 8000 т определим коэффициент β по линии тренда на рис. 1 и принимаем равным 0,62.

Используя формулу (4), определим эмиссию CO_2 за одну обработку балласта, т CO_2 :

$$m_1 = P/Q \cdot g \cdot C_j = 0,156 \cdot 200 \cdot 3,206 = 8100 \text{ г } \text{CO}_2/\text{т},$$

$$m_0 = V \cdot m_1 = \beta \cdot DWT \cdot m_1 = 0,62 \cdot 8000 \cdot 100 = 0,496 \text{ т } \text{CO}_2.$$

Эмиссия в атмосферу в результате одной обработки балласта для судна дедвейтом 8000 т с коэффициентом $\beta = 0,62$ составит 0,496 т CO_2 , а с учетом того, что установки на основе УФ-облучения требуют две обработки за рейс (на приеме и при откачке балласта), выбросы составят 0,992 т CO_2 за один цикл погрузки-разгрузки танкера.

Таблица 3

Влияние обработки балласта на критерий СП для нефтеналивного танкера дедвейтом 8 000 т в зависимости от района эксплуатации

Маршрут	Расстояние L , мили	Обработок балласта в год*	СП _{WBT}	Требуемый СП**	СП _{WBT} /СП, %
Новороссийск–Стамбул	456	50	0,135	20,30	0,66
Новороссийск–Измир	729	32	0,086	20,30	0,42
Новороссийск–Александрия	1178	20	0,054	20,30	0,26

* С учетом необходимости двойной обработки балласта установкой на основе УФ-обработок.
 ** Требуемый СП рассчитан с учетом понижающего коэффициента Z для 2025 г.

Для полноты картины рассмотрим несколько вариантов эксплуатации сухогрузного судна дедвейтом 8000 т для генеральных грузов в течение года по маршрутам Таганрог–Стамбул, Таганрог–Измир и Таганрог–Александрия. Проанализировав данные об эксплуатации российских судов для генеральных грузов дедвейтом от 7000 до 9000 т определяем, что пройденное за год расстояние для таких судов составило от 16 800 до 61 000 морских миль, а среднее значение составляет 28 000 миль, которое принимаем для проведения оценки.

Для определения конструктивного показателя β был проведен анализ отношения объема танков водяного балласта к дедвейту для судов для генеральных грузов, аналогично проведенному для танкеров по данным Регистровой книги судов. Результаты анализа показаны на рис. 2. Из рисунка следует, что для сухогрузов дедвейтом 8000 т коэффициент β практически остается неизменным в диапазоне дедвейта от 7000 до 9000 т и среднее значение $\beta = 0,58$, которое принимаем в дальнейших расчетах для этого типа судов.

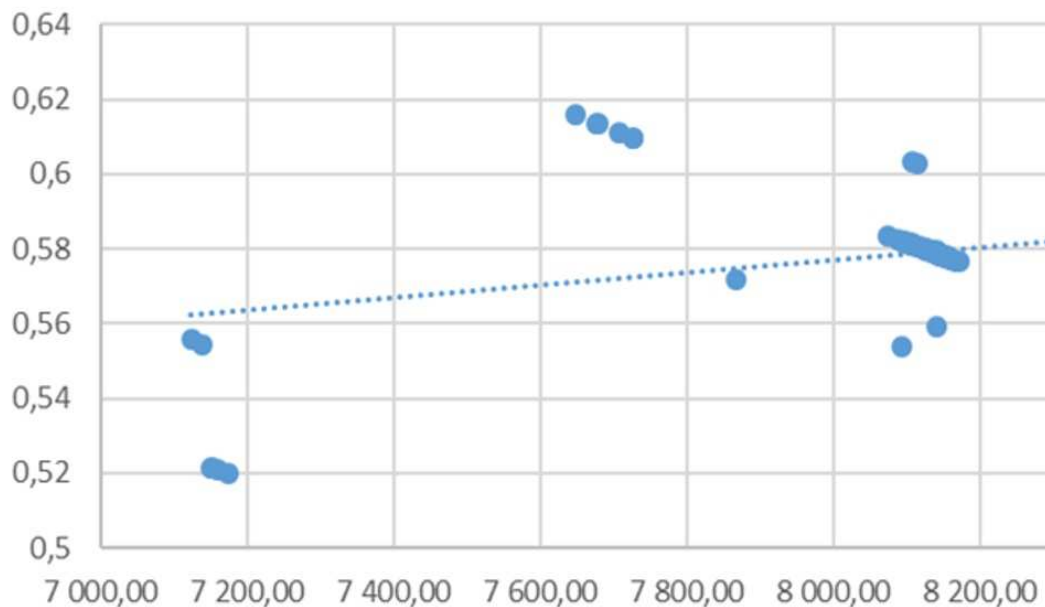


Рис. 2. Отношение объема балластных танков к дедвейту судна $\beta = MV/DWT$ (для судов для генеральных грузов в зависимости от дедвейта судна)

Эмиссия CO_2 в результате обработки одной тонны балласта m_1 не изменяется, так как для оценки используется такая же, как на танкерах, установка обработки балласта и энергетическая эффективность производства электроэнергии не меняется.

$$m_1 = P/Q \cdot g \cdot C_j = 0,156 \cdot 200 \cdot 3,206 = 100 \text{ г } \text{CO}_2/\text{т},$$

$$m_0 = V \cdot m_1 = \beta \cdot DWT \cdot m_1 = 0,58 \cdot 8000 \cdot 100 = 0,464 \text{ т } \text{CO}_2.$$

Эмиссия в атмосферу в результате одной обработки балласта для судна дедвейтом 8000 т с коэффициентом $\beta = 0,58$ составит 0,46 т CO_2 , а с учетом того, что установки на основе УФ-облучения требуют две обработки за рейс (на приеме и при откатке балласта), выбросы составят 0,93 т CO_2 за один цикл погрузки-разгрузки судна. Результаты расчетов влияния обработки балласта для сухогрузного судна дедвейтом 8000 т указаны в табл. 4.

Таблица 4

Влияние обработки балласта на критерий СП судна для перевозки генеральных грузов дедвейтом 800 т в зависимости от района эксплуатации

Маршрут	Расстояние L , мили	Обработок балласта в год*	СП _{WBT}	Требуемый СП**	СП _{WBT} /СП, %
Таганрог–Стамбул	611	46	0,0953	16,65	0,57
Таганрог–Измир	884	32	0,0663	16,65	0,39
Таганрог–Александрия	1333	21	0,0435	16,65	0,26

* С учетом необходимости двойной обработки балласта установкой на основе УФ-обработки.

** Требуемый СП рассчитан с учетом понижающего коэффициента Z для 2025 г.

Анализ полученных результатов показывает, что для большегрузных танкеров, используемых на короткой дистанции, влияние эмиссии CO₂, возникающей в результате обработки водяного балласта, может достигать нескольких процентов. Аналогичный результат менее актуален для других типов судов, так как нефтеналивные суда вынуждены в обратном рейсе полностью принимать балласт и, соответственно, его обрабатывать, а суда других типов обычно в обратном рейсе частично загружены. Например, контейнеровозы в обратном рейсе как минимум везут пустые контейнеры.

В документе МЕРС 84/6/8 [7] сказано, что в результате обработки балласта СП на танкерах увеличился в среднем на 6,4 % за рейс. Для сравнения полученных результатов с замерами на танкерах попробуем определить, каким должно быть расстояние между терминалами погрузки и разгрузки согласно предложенным нами замерам, чтобы СП увеличился на 5 %, что можно выразить следующим уравнением:

$$СП_{BWT}/СП_{REF} \geq 5 \%. \quad (8)$$

Если в знаменатель выражения (8) подставить значения требуемого СП_{REF} согласно [8], а в числитель подставить выражение (7), куда вместо безразмерного коэффициента балласта β подставить выражение (9), полученное нами на рис. 1, как линию тренда (зависимость коэффициента балласта β от дедвейта):

$$\beta = 2,9476 \cdot DWT^{-0,176} \quad (9)$$

(учтем, что балласт при использовании УФ-метода обрабатывается дважды), то в результате после некоторых преобразований приходим к выражению (10)

$$L/n = \frac{P/Q \cdot 2 \cdot (g \cdot C_i) \cdot 2,9476 \cdot DWT^{-0,176}}{a \cdot DWT^{-c} \cdot (1 - Z/100) \cdot 0,05}, \quad (10)$$

где согласно [8] для танкеров $a = 5247$, $c = 0,610$, а понижающий коэффициент Z зависит от календарного года эксплуатации — согласно [9], в 2024 г. он равен 7 %, в 2025 г. — 9 %, а в 2026 г. — 11 %.

Если подставить в выражение (10) численные значения, принятые нами в первом разделе настоящей статьи, то получится выражение (11):

$$L/n = 2,243 \cdot DWT^{0,434} / (1 - Z/100). \quad (11)$$

Расстояние между терминалами погрузки и разгрузки для танкера обозначим S , и оно будет равно половине пройденного танкером расстояния, деленного на число обработок балласта. То есть для того, чтобы СП изменился в результате обработки балласта на 5 %, расстояние между терминалами должно быть

$$S = L/2 \cdot n \leq 1,122 \cdot DWT^{0,434} / (1 - Z/100). \quad (12)$$

График зависимости (12) для 2024, 2025 и 2026 гг. показан на рис. 3.

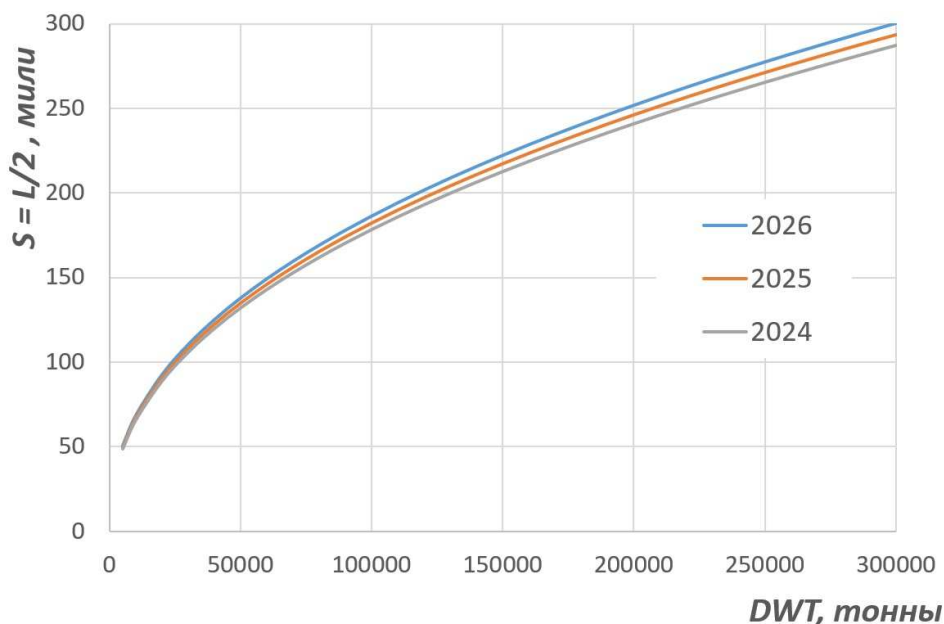


Рис. 3. Минимальное расстояние между терминалами погрузки и разгрузки танкера, при работе с которыми СП увеличивается более чем на 5 % в результате обработки балласта

Анализ выражения (12) и рис. 3 говорит об увеличении влияния обработки балласта на СП при сокращении расстояния между терминалами и дальнейшем увеличении понижающего коэффициента Z . Чем больше дедвейт танкера, тем больше это влияние. При разработке поправок к временному Руководству 2022 г. по поправочным параметрам и рейсовым корректировкам для расчета СП, учитывающих затраты энергии на обработку балласта, может быть использована методика, изложенная в настоящей статье, и полученные зависимости.

По результатам проведенного анализа на основе формулы (10) может быть предложен корректирующий коэффициент f_{BWT} для СП, который учитывает затраты энергии на танкере для обработки водяного балласта. Для учета выбросов CO_2 , возникающих в результате обработки водяного балласта, следует умножить показатель СП на корректирующий коэффициент:

$$\text{attained CI} = M \cdot f_{BWT} / W,$$

где $f_{BWT} = 1 - 0,1122 \cdot n \cdot DWT^{0,433} / ((1 - Z/100) \cdot L)$,

где n — количество сбросов за борт обработанного водяного балласта в течение года;

L — суммарное расстояние, пройденное судном за год в морских милях;

Z — понижающий коэффициент согласно [9], в зависимости от календарного года эксплуатации (в 2026 г. — 11 %);

DWT — дедвейт танкера в тоннах.

Применение данного поправочного коэффициента позволит учесть выбросы, необходимые для обработки балласта, и стимулировать судовладельцев применять на танкерах более энергоэффективные по сравнению с ультрафиолетовой обработкой установки обработки балласта (электролизные и др.).

ВЫВОДЫ

1. Сравнительный анализ энергозатрат на обработку водяного балласта различными методами показал, что наиболее энергетически затратным является метод с использованием УФ-излучения. Эмиссия CO_2 в результате обработки одной тонны воды с помощью электролиза и электрохлорирования в 5–6 раз меньше по сравнению с установками, использующими УФ-излучение.

2. Полученные расчетом данные о влиянии СУБВ на СП показывают, что влияние эмиссии CO_2 , возникающей в результате обработки водяного балласта, может достигать нескольких процентов для большегрузных танкеров, используемых на короткой дистанции. Данные расчеты не противоречат информации о замерах, проведенных Международной ассоциацией независимых владельцев танкеров INTERTANKO на судах в процессе эксплуатации [7].

3. Предложения INTERTANKO, изложенные в документе [7], о необходимости обеспечения мер по учету затрат энергии на обработку балластных вод следует признать обоснованными и поддержать разработку поправок к Временному руководству 2022 года по поправочным параметрам и рейсовым корректировкам для расчета СП [10].

4. По результатам проведенного анализа предложен поправочный коэффициент, учитывающий выбросы, необходимые для обработки балласта. Предложенная формула поправочного коэффициента может быть предложена ИМО для учета в руководстве по поправочным параметрам и рейсовым корректировкам для расчета СП (Резолюция МЕРС.352(78)) [9].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шурпак В.К. Новые требования ИМО по уменьшению выбросов углекислого газа с морских судов, совершающих транспортную работу / В.К. Шурпак, С.А. Толмачев, М.В. Мусонов // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2021. — № 64/65. — С. 4–18. — EDN GSJPWF.
2. Шурпак В.К. Оценка влияния основных судовых систем на показатели энергетической эффективности судна / В.К. Шурпак, А.А. Серов // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2017. — № 48–49. — С. 95–103. — EDN ZULPPN.
3. Resolution MEPC.352(78). 2022 Guidelines on operational carbon intensity indicators and the calculation methods (CII Guidelines, G1). London: IMO, 2022.
4. Resolution MEPC.364(79). 2022 Guidelines on the method of calculation of the attained energy efficiency design index (EEDI) for new ships. London: IMO, 2022.
5. Куприна Е.Э. Преимущество электрохимической технологии очистки балластных вод от биологических загрязнений на судах рыболовного флота / Е.Э. Куприна, А.И. Кириллов, В.С. Бобылев, А.А. Бросалина, В.В. Дроздов // Судостроение. — 2014. — № 3(814). — С. 44–46. — EDN SJBSCV.
6. Латухов С.В. Проблемы экологической безопасности судоходства / С.В. Латухов, В.А. Никитин, В.Н. Окунев, О.В. Соляков, П.Г. Химич. — СПб.: ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова, 2015. — 160 с.
7. Impact assessment of the BWM Convention on IMO's decarbonization frameworks / MEPC 84/6/8. London: IMO, 2022.
8. 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.
9. 2022 Interim guidelines on correction factors and voyage adjustments for CII calculations (CII guidelines, G5). MEPC.355(78). London: IMO, 2022.
10. 2022 Guidelines on the reference lines for use with operational carbon intensity indicators (CII Reference lines Guidelines, G2). Resolution MEPC.353(78). London: IMO, 2022.

REFERENCES

1. Shurpyak V.K., Tolmachev S.A., Musonov M.V. New IMO requirements for reduction of carbon dioxide emissions from ships performing transport work. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2021. No. 64/65. P. 4–18. EDN GSJPWF.
2. Shurpyak V.K., Serov A.A. Assessment of the influence of the main ship systems on the ship's energy efficiency. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2017. No. 48/49. P. 95–103. EDN ZULPPN.
3. Resolution MEPC.352(78). 2022 Guidelines on operational carbon intensity indicators and the calculation methods (CII Guidelines, G1). London: IMO, 2022.
4. Resolution MEPC.364(79). 2022 Guidelines on the method of calculation of the attained energy efficiency design index (EEDI) for new ships. London: IMO, 2022.
5. Kuprina E.E., Kirillov A.I., Bobylev V.S., Brosalina A.A., Drozdov V.V. The advantage of electrochemical technology for cleaning ballast water from biological pollutants on fishing fleet vessels. *Shipbuilding*. 2014. No. 3(814). P. 44–46. EDN SJBSCV.
6. Latukhov S.V., Nikitin V.A., Okunev V.N., Solyakov O.V., Khimich P.G. Problemy ekologicheskoi bezopasnosti sudokhodstva [Problems of environmental safety of shipping]. St. Petersburg: GUMRF im. adm. S.O. Makarova, 2015. 160 p.
7. Impact assessment of the BWM Convention on IMO's decarbonization frameworks / MEPC 84/6/8. London: IMO, 2022.
8. 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.
9. 2022 Interim guidelines on correction factors and voyage adjustments for CII calculations (CII guidelines, G5). MEPC.355(78). London: IMO, 2022.
10. 2022 Guidelines on the reference lines for use with operational carbon intensity indicators (CII Reference lines Guidelines, G2). Resolution MEPC.353(78). London: IMO, 2022.

Статья поступила в редакцию 22.04.2026.

Принята к публикации 15.05.2026.