

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ (ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)

Обзорная статья

УДК 656.085

DOI: doi.org/10.48612/dalrybvtuz/2025-74-19

EDN: ZELPQS

Использование альтернативных видов топлива для декарбонизации морского судоходства

Виталий Витальевич Ганнесен¹, Екатерина Евгеньевна Петрова²

^{1,2}Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет, Владивосток, Россия

¹ gannesen.vv@dgtru.ru

² pillers@mail.ru

Аннотация. В настоящее время большинство коммерческих судов работают на тяжёлом топливе, которое обладает высокой плотностью энергии, что обеспечивает при небольшом его количестве движение на большие расстояния. Кроме того, оно относительно дешево, поскольку является побочным продуктом процесса переработки нефти. Однако эти преимущества имеют свою цену. Отходы сжигания тяжелого топлива не только способствуют изменению климата, но и создают множество рисков для окружающей среды и здоровья человека. Морская отрасль активно ищет более чистые и устойчивые источники топлива и энергии для снижения своего воздействия на окружающую среду. По мере того, как отрасль стремится сократить выбросы, эти альтернативные виды топлива становятся всё более важными для достижения глобальных целей по борьбе с изменением климата, в частности, цели ИМО по достижению нулевого уровня выбросов к 2050 г. За последний год было проведено значительное исследование таких вариантов, как аммиак и метанол, наряду с инновациями в области ветровых двигательных установок. Все они привлекли большое внимание как потенциальные решения для более экологичного будущего морского транспорта. В настоящей работе рассмотрены альтернативные виды топлива, использование которых может помочь в достижении стратегической цели Международной морской организации – декарбонизации выбросов углекислого газа судовыми двигателями. Отмечены как достоинства, так и новые угрозы безопасности, связанные со спецификой рассматриваемых видов топлива.

Ключевые слова: декарбонизация, альтернативные виды топлива, экологичный транспорт, биотопливо

Для цитирования: Ганнесен В. В., Петрова Е. Е. Использование альтернативных видов топлива для декарбонизации морского судоходства // Научные труды Дальрыбвтуза. 2025. Т. 74, № 4. С. 185–192.

Scientific Journal of the Far Eastern State Technical Fisheries University. 2025. Vol. 74, no. 4. P. 185–192.

MARINE POWER PLANTS AND THEIR ELEMENTS (MAIN AND AUXILIARY)

Review article

Using alternative fuels to decarbonise maritime shipping

Vitalii V. Gannesen¹, Ekaterina E. Petrova²

^{1,2}Far Eastern State Technical Fisheries University, Vladivostok, Russia

¹ gannesen.vv@dgtru.ru

² pillers@mail.ru

Abstract. Currently, most commercial vessels run on heavy fuel oil having a high energy density due to which vessels can cover long distance using a little fuel. Moreover, it is rather cheap as it is a byproduct of the oil refining process. However, these advantages have another side. The heavy fuel oil waste not only contributes to climate change but also poses numerous risks to the environment and human health. The maritime industry is actively seeking the cleaner and more sustainable sources of fuel and energy to reduce its environmental impact. As the industry strives to reduce emissions, these alternative fuels are becoming increasingly important to achieving global climate change goals, particularly the IMO's goal of net-zero emissions by 2050. Over the past year the options such as ammonia and methanol have received significant research, along with innovations in wind propulsion systems. All have attracted considerable attention as potential solutions for a greener future for maritime transport. This paper examines alternative fuels that could help achieve the International Maritime Organization's strategic goal of decarbonizing marine propulsion systems. Both their advantages and the new safety risks associated with these fuels are noted.

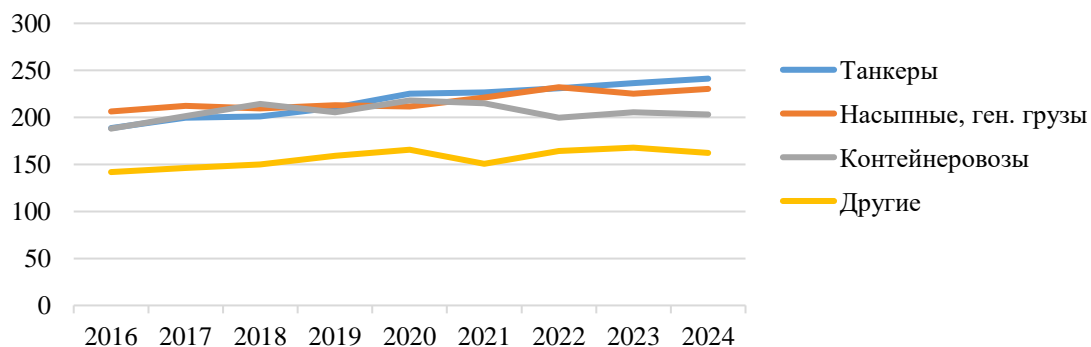
Keywords: decarbonization, alternative fuels, eco-friendly transport, biofuels

For citation: Gannesen V. V., Petrova E. E. Using alternative fuels to decarbonise maritime shipping. *Scientific Journal of the Far Eastern State Technical Fisheries University*. 2025; 74(4): 185–192. (In Russ.).

Введение

Тяжелое топливо является основным источником энергии в морском судоходстве, являясь при этом существенным источником «загрязнения» атмосферы углекислым газом и другими выбросами (на судоходство приходится 3 % всех антропогенных выбросов ежегодно). Учитывая, что к 2050 г. объёмы морской торговли должны утроиться, выбросы будут продолжать расти, если отрасль не предпримет срочных мер по корректировке курса. Декарбонизация – одна из самых серьёзных проблем, стоящих перед судоходством. Одним из путей декарбонизации выбросов является переход к использованию морским транспортом источников энергии, имеющих меньший или нулевой углеродный след.

В 2018 г. выбросы парниковых газов от судоходной отрасли достигли 1,08 миллиарда тонн, что составляет 2,89 % от мировых выбросов [1–2]. Неуклонный рост перевозок грузов морским транспортом ведет к тому, что если не будут приняты эффективные меры, выбросы CO₂ от мировой морской торговли могут увеличиться к 2050 г. на 50–250 % (рисунок) [3, 4]. Среди них основные выбросы парниковых газов возникают в результате сжигания топлива, в первую очередь тяжелого топлива (HFO), морскими двигателями внутреннего сгорания (ICE) [5, 6]. Таким образом, переход к низкоуглеродным и нулевым выбросам углерода стал критически важным направлением в развитии судоходной отрасли для сдерживания глобального потепления и изменения климата [7, 8]. С этой целью Международная морская организация (ИМО) обнародовала ряд политик по энергосбережению и сокращению выбросов [9, 10].



Выбросы углекислого газа основными типами судов в 2016–2024 гг., млрд т [11]. Составлено авторами
Carbon dioxide emissions by main types of vessels during 2016–2024, billion tons [11]. Compiled by the authors

В 2011 г. ИМО установила минимальные требования к топливной эффективности судов, установив первый в истории обязательный режим сокращения выбросов парниковых газов в международном транспортном секторе. Меры по повышению топливной эффективности за счет снижения сопротивления движению, такие как движение на малой скорости, бульбообразные носовые оконечности и оптимизация корпусов, а также повышение эффективности гребных винтов помогли снизить углеродоемкость судоходства более чем на 30 % с 2008 г. Использование ветровых парусов для получения дополнительной тяги в сочетании с энергоэффективными конструкциями судов с улучшенной обтекаемостью также позволяет снизить расход топлива до 30 %.

Однако эти решения обладают лишь ограниченным потенциалом сокращения выбросов. Большинство таких решений имеют определенные недостатки, такие как увеличение сроков доставки или дорогостоящее переоборудование, и лучше всего подходят для небольших тихоходных судов, не имеющих жесткого графика работы. Учитывая активное изучение вопросов энергоэффективности, судоходной отрасли необходимо быстро масштабировать использование низкоуглеродного и безуглеродного топлива для покрытия дефицита выбросов [12–13].

Стратегия ИМО по сокращению выбросов парниковых газов была пересмотрена в 2023 г., и теперь она включает три взаимосвязанные цели:

- 1) сокращение выбросов парниковых газов как минимум на 20 % к 2030 г. по сравнению с 2008 г.;
- 2) сокращение выбросов парниковых газов как минимум на 70 % к 2040 г. по сравнению с 2008 г.;
- 3) достижение нулевого уровня выбросов парниковых газов от международных перевозок к 2050 г.

По оценкам экспертов, для соответствия сценариям роста температуры на 1,5 градуса Цельсия к 2030 г. 5–17 % судового топлива должно будет иметь нулевой уровень выбросов, а к 2050 г. этот показатель должен увеличиться до 84–93 %. Однако в настоящее время виды топлива с нулевым уровнем выбросов далеки от достижения этих целей, в основном из-за более высоких экономических, технических и инфраструктурных барьеров по сравнению с тяжелым дизельным топливом.

Обсуждение

Поскольку снижение углеродных выбросов в первую очередь зависит от снижения потребления тяжелого дизельного топлива, необходимо изучить доступные варианты новых альтернативных видов топлива.

СПГ. На сегодняшний день единственным коммерчески жизнеспособным альтернативным топливом для судоходства является сжиженный природный газ (СПГ), который используется уже около 20 лет.

Пример использования СПГ в качестве альтернативного топлива – компания Hudong-Zhonghua Shipbuilding – дочерняя компания Китайской государственной судостроительной корпорации (CSSC), которая поставила французской компании CMA CGM Group в Шанхае CMA CGM SEINE крупнейший в мире контейнеровоз вместимостью 24 000 TEU, работающий на двухтопливном СПГ. Судно длиной 399 м и шириной 61,3 м способно перевозить 23 876 TEU, включая 2200 рефрижераторных контейнеров, и до 220 000 т груза. Его мембранный газовый танк MARK III объемом 18 600 м³ позволяет судну пройти почти 20 000 морских миль на одной заправке СПГ. Согласно отчётам, CMA CGM SEINE сокращает выбросы CO₂ на 20 %, оксидов азота – до 85 % и практически полностью устраняет выбросы оксидов серы и твердых частиц по сравнению с аналогичными судами, работающими на нефтяном топливе. Кроме того, судно отличается более высокой эффективностью, повышенной пожарной безопасностью, превосходным комфортом для экипажа и соответствует требованиям ИМО Tier III и последним требованиям SOLAS.

СПГ выделяет примерно на 25 % меньше углекислого газа, чем обычное судовое топливо, однако если учитывать утечки метана и выбросы в процессе эксплуатации, не приносит никакой пользы для климата, выбрасывая за весь жизненный цикл на 70 % больше парниковых газов, чем суда, работающие на обычном судовом топливе. Кроме того, недавнее исследование показало, что перевод мирового судоходного флота на СПГ может привести к финансовым потерям до 850 миллиардов долларов к 2030 г. Это основано на предположении, что к 2030 г. отрасль будет стремительно отказываться от ископаемого топлива, а дорогостоящие суда, работающие на СПГ, быстро потеряют свою ценность.

Метанол. Еще одной альтернативой, пригодной для декарбонизации, является «зелёный» метанол, производимый на основе «зеленого» водорода и (уловленного или биогенного) углерода. Промышленный гигант Maersk уже инвестирует в «зелёный» метанол – климатически нейтральное топливо. Компания Pacific Ocean Engineering (Zhoushan) Co., Ltd. построила первый в мире модернизированный контейнеровоз, работающий на метаноле. Компания Mitsubishi заключила партнерство с целью строительства первых в Японии судов типа RORO, работающих на метаноле. Компании X-Press Feeders, Global Energy Trading Pte Ltd (GET) и PSA Singapore (PSA) завершили первую одновременную операцию по бункеровке и погрузке метанола (SIMOPS) в Сингапуре.

Метанол можно использовать на существующих судах, поскольку его можно хранить в жидком виде при температуре окружающей среды, а хранилища имеются в 88 из 100 крупнейших портов мира. Однако самым большим препятствием для «зелёного» метанола является тот факт, что инфраструктура для улавливания углекислого газа и получения водорода с использованием возобновляемых ресурсов пока недоступна в достаточном масштабе, что приводит к высоким затратам. Кроме того, метанол, хотя и чище традиционных видов тяжёлого топлива, огнеопасен и едкий, что может привести к серьёзным пожарам на борту.

Аммиак. Аммиак – возобновляемое топливо, состоящее из азота и водорода, в настоящее время является одним из наиболее перспективных решений, поскольку он практически не выделяет углекислого газа, обладает высокой плотностью энергии и относительно дешевле по сравнению с другими видами топлива с нулевым уровнем выбросов. Однако использование аммиака в качестве судового топлива сопряжено с рисками для безопасности, прежде всего из-за его токсичности. Персонал на борту и на берегу должен быть специально обучен и иметь средства индивидуальной защиты, так как аммиак представляет значительную опасность как для здоровья человека, так и для окружающей среды, а суда должны быть спроектированы с учетом необходимости высокого уровня безопасности для снижения вероятности утечек. Это наряду с необходимостью масштабирования производства «зелёного» водорода делает аммиак более дорогим по сравнению с традиционными видами топлива.

В последние годы несколько судоходных компаний взяли на себя обязательство использовать аммиак в качестве морского топлива для сокращения выбросов углерода и продвижения экологически безопасных методов судоходства. Например, компания Nippon Yusen Kaisha (NYK) завершила строительство первого в мире буксира, работающего на аммиаке, и строит среднего тоннажа газовоз, работающий на аммиаке, строительство которого планируется завершить в ноябре 2026 г. Компания Mitsui OSK Lines (MOL) недавно осуществила первую в мире перевалку аммиака с судна на судно и проектирует балкер грузоподъемностью 210 000 дедвейт-тонн, работающий на аммиаке.

Кроме того, в апреле 2024 г. компания Eastern Pacific Shipping укрепила сотрудничество в области охраны окружающей среды с Морским и портовым управлением Сингапура, построив шесть новых судов, зарегистрированных в Сингапуре и работающих на двух видах топлива, включая аммиак. На выставке Posidonia 2024 Корейский регистр судов выдал принципиальное одобрение (AiP) сверхбольшому аммиачному судну Samsung Heavy Industries водоизмещением 150 тыс. т и подписал с ними меморандум о взаимопонимании по строительству контейнеровозов вместимостью 9300 TEU, работающих на аммиаке.

Водородное топливо. Водородное топливо также всё чаще рассматривается как важное решение для декарбонизации судоходства. При использовании возобновляемых источников энергии водородное топливо сгорает с нулевым выбросом углерода, образуя только воду в качестве побочного продукта. Кроме того, его удельная энергия примерно в три раза выше, чем у тяжёлого топлива, он нетоксичен и не имеет цвета и запаха. Однако водород – легковоспламеняющийся и легко рассеиваемый газ. Для его использования в качестве топлива экипажи должны пройти специальную подготовку, а судам потребуется создать дорогостоящую инфраструктуру для хранения водорода при криогенных температурах (-53 °C / -423 °F) под давлением. Эти проблемы безопасности, а также высокие затраты на модернизацию и эксплуатацию являются барьерами для использования водородного топлива.

Биотопливо и электроэнергия. Биотопливо и электроэнергия также изучаются в качестве альтернатив тяжелому топливу и уже находят ограниченное применение в смеси с другими видами судового топлива. Биотопливо стало перспективным вариантом сокращения выбросов в морском секторе и рассматривается многими судовладельцами как простой в использовании вариант. Исследование судоходной ассоциации Сингапура за 2024 г. подтвердило рост использования биотоплива судоходными компаниями, что также согласуется с ежемесячной тенденцией к росту продаж биотоплива в качестве бункерного топлива в Сингапуре, о чем сообщает Морское и портовое управление Сингапура (МРА).

Растущий спрос на биотопливо обусловлен его совместимостью с существующими двигателями, поскольку его можно смешивать с традиционными видами топлива в различных концентрациях, тем самым снижая необходимость в дорогостоящей модернизации двухтопливных систем.

Хотя биотопливо является жизнеспособным переходным решением для морской отрасли, существуют эксплуатационные соображения, которые нельзя упускать из виду. Потенциальные последствия использования биотоплива в существующих двигателях требуют тщательного технического анализа, поскольку изменение настроек двигателя или бортового оборудования может привести к непредвиденным проблемам.

Потенциальные риски, связанные с биотопливом, включают кислородную деградацию, нестабильность, коррозию и разрушение резиновых деталей, таких как уплотнители, прокладки и шланги. Кроме того, рост микроорганизмов в топливных баках может привести к засорению оборудования, что ещё больше усложнит обслуживание и снизит эффективность эксплуатации. Ситуация усугубляется растущей чувствительностью к качеству топлива у современного оборудования, ремонт которого становится всё более дорогостоящим. В результате биотопливо, хотя и является многообещающей альтернативой, может привести к более частым и дорогостоящим убыткам для судовладельцев и увеличить нагрузку на страховщиков.

Поскольку природа этих новых видов топлива/смесей более разнообразна по сравнению с ранее использовавшимися традиционными топливными смесями, для них требуются дополнительные параметры контроля качества. Последняя редакция стандарта ISO 8217, опубликованная в мае 2024 г., теперь включает требования к биотопливу, которые могут смягчить некоторые эксплуатационные проблемы, связанные с использованием биотоплива на судах. Важно также понимать, что, поскольку ассортимент доступных видов биотоплива широк и постоянно меняется, его становится сложно регулировать надлежащим образом.

Электроаккумуляторные батареи и береговое электроснабжение – ещё один вариант с нулевым уровнем выбросов для мировой судоходной отрасли. Учитывая существующую инфраструктуру, электроэнергия оправдана только для каботажных перевозок или небольших внутренних паромов. Однако её применение может расширяться при сочетании с другими видами топлива, например, в электродвигателях, заряжаемых от дизельных генераторов.

Обеспечение безопасности при использовании альтернативных видов топлива

Альтернативные виды топлива, такие как СПГ, аммиак, метанол и водород, являются основными вариантами декарбонизации морского судоходства в будущем. Эти виды топлива открывают потенциал для судоходства с нулевыми выбросами, но их использование сопряжено с определенными рисками для безопасности. Для страховщиков и специалистов по управлению рисками обеспечение безопасности судов, работающих на этих альтернативных видах топлива, остается приоритетом.

Более того, риски, связанные с этими видами топлива, выходят за рамки рисков для самого судна. В случае аварии возрастает опасность утечки взрывоопасных паров на близлежащие объекты и суда. Пожары, вызванные этими альтернативными видами топлива, могут распространяться на значительные расстояния, нанося значительный ущерб соседним судам или портам. Эти проблемы безопасности усложняют переход на альтернативные виды топлива, заставляя страховых специалистов учитывать не только индивидуальные риски для судов, но и более широкое воздействие на окружающие активы [14–15]. Хотя данные виды топлива могут обеспечивать значительные экологические преимущества, их влияние на безопасность остаётся серьёзным препятствием, которое необходимо решить перед их широким внедрением. Надлежащее обучение, нормативный надзор и соблюдение протоколов безопасности будут иметь решающее значение для снижения существующих рисков и обеспечения безопасной интеграции альтернативных видов топлива в морскую отрасль.

Заключение

Декарбонизация судоходства подразумевает сокращение углеродного следа судов за счёт отказа от ископаемого топлива и перехода на более «чистые» источники энергии. В условиях перехода отрасли на альтернативные виды топлива невозможно переоценить важность хорошо подготовленного, профессионального и мотивированного экипажа [16–17]. Альтернативные виды топлива обладают свойствами, которые создают новые, специфические проблемы безопасности по сравнению с традиционными видами, что требует нового понимания и внедрения иных систем безопасности и методов работы.

Человеческий фактор по-прежнему остаётся одной из основных причин морских аварий, и по мере появления новых видов топлива риски, связанные с неправильным обращением, хранением и эксплуатацией этих видов топлива, будут только возрастать.

Успешность энергетического перехода морского транспорта к нулевым выбросам парниковых газов за счет внедрения новой техники и технологий во многом будет зависеть от уровня их безопасности, включающей человеческий фактор.

Список источников

1. Lindstad E., Lagemann B., Riialand A, Gamlem G. M., Valland A. Reduction of maritime GHG emissions and the potential role of E-fuels // *Transp Res Part D: Transp Environ.* 101 (2021). Article 103075. View PDFView articleView in ScopusGoogle Scholar.
2. Wang Y., Cao Q., Liu L., Wu Y., Liu H. Y., Gu Z. Y. et al. A review of low and zero carbon fuel technologies: achieving ship carbon reduction targets // *Sustainable Energy Technol Assess.* 54 (2022). Article 102762. View PDFView articleView in ScopusGoogle Scholar.
3. Skoko I., Stanivuk T., Franic B., Bozic D. Comparative analysis of CO2 emissions, fuel consumption, and fuel costs of diesel and hybrid dredger ship engines // *J Mar Sci Eng.* 12 (2024). P. 999.
4. Li Z. W., Wang K., Hua Y., Liu X., Ma R. Q., Wang Z. et al. GA-LSTM and NSGA-III based collaborative optimization of ship energy efficiency for low-carbon shipping // *Ocean Eng.* 312(3) (2024). Article 119190. View PDFView articleView in ScopusGoogle Scholar.
5. Wang Z., Qi Y. L., Sun Q. Y., Lin Z. L., Xu X. T. Ammonia combustion using hydrogen jet ignition (AHJI) // *Internal combustion engines Energy.* 291 (2024). Article 130407. View PDFView articleView in ScopusGoogle Scholar.

6. Liu H. Y., Yu S. W., Wang T. Y., Li J., Wang Y. J. A systematic review on sustainability assessment of internal combustion engines // *J Clean Prod.* 451 (2024). Article 141996. View PDFView articleView in ScopusGoogle Scholar.
7. Wang Z., Dong B., Li M. Y., Ji Y. L., Han F. H. Configuration of low-carbon fuels green marine power systems in diverse ship types and applications // *Energy Conver Manage.* 302 (2024). Article 118139. View PDFView articleView in ScopusGoogle Scholar.
8. Zhu X. X., Hou X. C., Li J. H., Yan G. G., Li C. P., Wang D. B. Distributed online prediction optimization algorithm for distributed energy resources considering the multi-periods optimal operation // *Appl Energy.* 348 (2023). Article 121612. View PDFView articleView in ScopusGoogle Scholar.
9. Chang C. C., Huang M. L., Li C. H. Analysis of emission reduction strategies for the use of alternative fuels and natural carbon sinks in international bulk shipping // *Energy Convers Manage: X*, 24 (2024), Article 100702. View PDFView articleView in ScopusGoogle Scholar.
10. IMO. 2023 IMO Strategy on Reduction of GHG Emissions from Ships. 2023. <https://www.cdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/annex/MEPC%2080/Annex%2015.pdf>. Google Scholar.
11. https://www.researchgate.net/publication/386126121_The_Possibility_of_Using_Hydrogen_as_a_Green_Alternative_to_Traditional_Marine_Fuels_on_an_Offshore_Vessel_Servicing_Wind_Farms?_tp=eyJjb250ZXh0Ijp7Im-ZpcnN0UGFnZSI6InB1YmxpY2F0aW9uIiwicGFnZSI6Ii9kaXJlY3QifX0.
12. Толмачев С. А. Вопросы и проблемы, связанные с осуществлением стратегии ИМО 2023 года по сокращению выбросов парниковых газов с судов // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. 2023. № 72–73. С. 13–20. EDN EQXMNI.
13. Новицкий, М. Е. Проблемы экологичности морского транспорта / М. Е. Новицкий, А. А. Волков // Актуальные решения проблем водного транспорта : сборник материалов III Международной научно-практической конференции, Астрахань, 29–31 мая 2024 года. Астрахань : Волжский государственный университет водного транспорта, 2024. С. 434–437. EDN CWENDZ.
14. 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 OVКОНН.
15. Тормашев, Д. С. Современные вызовы морской индустрии в области декарбонизации судов и пути оптимизации процессов энергосбережения в СЭУ / Д. С. Тормашев, А. И. Епихин // Эксплуатация морского транспорта. 2021. № 3(100). С. 110–113. DOI 10.34046/aumsuomt100/16. EDN UOMHWE.
16. Ганнесен, В. В. Тренажерная подготовка как инструмент снижения количества технических аварий морских судов / В. В. Ганнесен, Е. Е. Петрова, И. С. Карпушин // Научные труды Дальрыбвтуза. 2024. Т. 70, № 4. С. 179–185. DOI 10.48612/dalrybvtuz/2024-70-18. EDN WCZHUN.
17. Ганнесен, В. В. О специфике пожаров в машинном отделении / В. В. Ганнесен, Е. Е. Петрова // Научные труды Дальрыбвтуза. 2024. Т. 69, № 3. С. 215–222. DOI 10.48612/dalrybvtuz/2024-69-21. EDN VHJKVH.

Сведения об авторах

В. В. Ганнесен – доцент, доцент кафедры судовождения, AuthorID: 812731.

Е. Е. Петрова – кандидат технических наук, доцент кафедры судовождения, AuthorID: 1108787.

Information about the authors

V. V. Gannesen – Associate Professor, Associate Professor of the Department of Navigation, AuthorID: 812731.

E. E. Petrova – PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Navigation, AuthorID: 1108787.

Статья поступила в редакцию 10.10.2025; одобрена после рецензирования 01.11.2025; принята к публикации 10.11.2025.

The article was submitted 10.10.2025; approved after reviewing 01.11.2025; accepted for publication 10.11.2025.