

CALCULATION AND ANALYSIS OF RELATIVE ATOMIZATION CHARACTERISTICS OF DIESEL DISTILLATE AND LOW-VISCOSITY MARINE FUEL

G. S. Yur, E. S. Gubin

Siberian State University of Water Transport,
Novosibirsk, Russian Federation

The results of calculations of relative atomization characteristics for diesel distillate and low-viscosity marine fuel are presented. The analysis shows that, compared to diesel fuel, the atomization of low-viscosity marine fuel is characterized by greater non-uniformity and increased droplet size. This slows the combustion process and shifts heat generation to the expansion line. As a result, converting a diesel engine to low-viscosity marine fuel leads to increased specific consumption, exhaust gas temperature, and harmful emissions. To improve the operational properties of low-quality fuels, a method of preliminary treatment using a high-voltage electric charge was developed and implemented. Results of trial tests of a diesel engine running on modified fuel are presented. Based on the calculations and investigation of spray parameters, factors contributing to reduced efficiency of marine diesel engines when using heavy fuels were identified. A method for increasing energy efficiency and reducing the negative environmental impact of marine diesel engines operating on low-cost, low-quality fuel was proposed. This approach is both economically justified and environmentally efficient for improving the performance of marine diesel engines running on poor-quality heavy fuels and can be recommended for widespread use in the shipping industry.

Keywords: diesel fuel, low-viscosity marine fuel, differential and integral atomization characteristics, high-voltage electric charge.

For citation:

Yur, Gennady S. and E. S. Gubin. "Calculation and analysis of relative atomization characteristics of diesel distillate and low-viscosity marine fuel." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 17.4 (2025): 592–598. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-4-592-598.

УДК: 621.431.74–44

РАСЧЕТ И АНАЛИЗ ОТНОСИТЕЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РАСПЫЛИВАНИЯ ДИЗЕЛЬНОГО ДИСТИЛЛЯТНОГО И МАЛОВЯЗКОГО СУДОВОГО ТОПЛИВА

Г. С. Юр, Е. С. Губин

ФГБОУ ВО «СГУВТ», Новосибирск, Российская Федерация

Представлены результаты расчета относительных характеристик распыливания дизельного дистиллятного и маловязкого судового топлива. Анализ показал, что по сравнению с дизельным топливом распыливание маловязкого судового топлива отличается более высокой степенью неоднородности и увеличенным размером капель. Это затягивает процесс сгорания и смещает процесс тепловыделения на линию расширения. В результате при переводе дизеля на судовое маловязкое топливо повышаются его удельный расход, температура отработавших газов и вредные выбросы. Для улучшения эксплуатационных свойств низкачественных видов топлива разработан и осуществлен способ его предварительной обработки высоковольтным электрическим зарядом. Приведены результаты пробных испытаний дизеля на модифицированном топливе. На основе проведенных вычислений и изучения параметров распыления удалось установить факторы, приводящие к снижению эффективности работы судовых дизелей при использовании тяжелых видов топлива. В результате предложена методика повышения энергетической эффективности и снижения негативного воздействия на окружающую среду судовых дизельных установок, эксплуатируемых на дешевом топливе низкого качества. Данная методика представляет собой экономически целесообразное и экологически эффективное решение для повышения эксплуатационных характеристик

судовых дизельных установок, работающих на тяжелых видах топлива низкого качества, и может быть рекомендована для широкого применения в судоходной отрасли.

Ключевые слова: топливо дизельное, маловязкое судовое топливо, распыливание, дифференциальные и интегральные характеристики, высоковольтный электрический заряд, расход топлива, загрязняющие вещества, рабочий процесс дизеля, температура отработавших газов, процессы смесеобразования, качество распыливания.

Для цитирования:

Юр Г. С. Расчет и анализ относительных характеристик распыливания дизельного дистиллятного и маловязкого судового топлива / Г. С. Юр, Е. С. Губин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2025. — Т. 17. — № 4. — С. 592–598. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-4-592-598. — EDN URLVIM.

Введение (Introduction)

Более половины всех эксплуатационных расходов на судне приходится на приобретение топлива. Поэтому на речном флоте для среднеоборотных дизельных энергетических установок широкое применение получило маловязкое судовое топливо (СМТ), производимое по ТУ 38.101567–2005¹. Эксплуатация судовых дизелей на таком топливе привела к ухудшению и повышению удельного расхода топлива, температуры отработавших газов и выбросов загрязняющих веществ в атмосферу.

Рабочий процесс дизеля условно можно представить в виде двух взаимосвязанных и взаимозависящих друг от друга физических и химических явлений: процессов смесеобразования и сгорания. Процессы смесеобразования также условно подразделяются на процессы макро- и микро-смесеобразования. Энергетические и экологические характеристики дизеля во многом зависят от качества распыливания и подготовки топливно-воздушной смеси, от которой зависят скорость и полнота и осуществления процесса сгорания [1].

Целью работы является расчет и анализ относительных характеристик распыливания дизельного дистиллятного и судового маловязкого топлива.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Качество процесса распыливания оценивается по двум показателям: однородности и тонкости распыливания. Распыливание должно быть максимально тонким и однородным [2]. Для изучения относительных характеристик распыливания дизельными форсунками используются как экспериментальные, так и расчетные методы, основанные на полученных опытных данных. Экспериментальные исследования показали, что при распыливании под высоким давлением образуется конгломерат мелких капель, размеры которых меняются в широком диапазоне. Для оценки дисперсности капель топлива и качества распыливания в процессе расчетов используются *относительные характеристики* (дифференциальные и интегральные).

Определим и сравним относительные характеристики распыливания дизельными форсунками при работе на дизельном (ДТ) и судовом маловязком топливе (СМТ). Расчеты относительных характеристик исследуемых сортов топлива в невозмущенной воздушной среде выполнялись по зависимостям Розина и Раммлера [3, 4].

В качестве исходной точки для вычисления относительной величины капель различного диаметра используется следующее уравнение:

$$S = 1 - e^{-\left(\frac{z}{a_m}\right)^n}.$$

Здесь S — фракция суммарного объема капель, диаметр которых находится в диапазоне от минимального до заданного значения;

a_m — параметр размера, применяемый в уравнении Розина – Раммлера;

¹ ТУ 38.101567–2005. Топливо маловязкое судовое. Технические условия. Магазин стандартов. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.docum.ru/tu.asp?id=595697> (дата обращения: 17.04.2025).

z — рассматриваемый диаметр капли;

n — параметр, показывающий уровень однородности распыления.

Анализ относительных характеристик распыливания дизельного топлива и судового маловязкого топлива был выполнен с использованием специализированного программного обеспечения, разработанного профессором С. А. Калашниковым [5].

Сравнительный анализ полученных характеристик дизельного и судового маловязкого топлива позволит определить одну из основных причин ухудшения процесса сгорания. Однако при этом необходимо учитывать, что характеристики распыления являются лишь одним из факторов, влияющих на эффективность сгорания и экологические показатели судового двигателя. Другие факторы, такие как конструкция камеры сгорания, турбулентность воздушного заряда, наддува и система управления подачей топлива, также играют не менее важную роль.

Для всестороннего анализа процесса тепловыделения важно учитывать не только характеристики топлива и распыления, но и особенности конструкции двигателя, а также условия его эксплуатации. Например, геометрия камеры сгорания оказывает непосредственное влияние на формирование факела пламени и интенсивность перемешивания топлива с воздухом. Оптимизация формы камеры сгорания может существенно повысить эффективность сгорания и снизить выбросы вредных веществ.

Турбулентность воздушного заряда, создаваемая завихрителями и другими элементами конструкции, также играет важную роль в обеспечении качественного перемешивания топлива и воздуха. Высокий уровень турбулентности способствует более быстрому и полному сгоранию топлива, что приводит к повышению эффективности двигателя и снижению выбросов. Система наддува, обеспечивающая подачу большего количества воздуха в цилиндры, позволяет сжигать большее количество топлива за один цикл, повышая мощность двигателя. Однако при этом необходимо тщательно контролировать соотношение топлива и воздуха, чтобы избежать образования сажи и других вредных веществ.

Система управления подачей топлива, включающая форсунки и электронный блок управления, играет ключевую роль в обеспечении оптимального впрыска топлива в цилиндры. Современные системы управления позволяют точно регулировать момент впрыска, его продолжительность и давление, что позволяет оптимизировать процесс сгорания в зависимости от условий эксплуатации двигателя. Поэтому для изучения и анализа процесса тепловыделения необходимо проводить комплексные исследования, учитывающие все факторы, рассмотренные в публикациях [6, 7].

Результаты (Results)

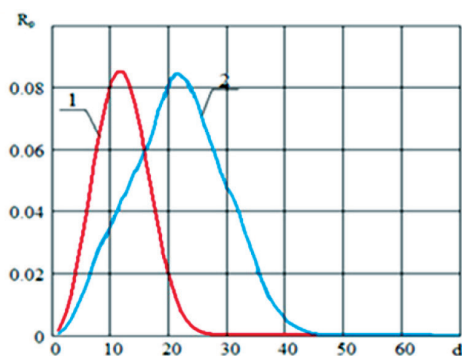
Сравнительное исследование показало, что судовое маловязкое топливо (СМТ) демонстрирует несколько иные характеристики распыления по сравнению с дизельным топливом. В частности, наблюдается тенденция формирования более крупных капель при использовании СМТ, что может быть обусловлено его большей вязкостью и плотностью (данные приведены в таблице). Это, в свою очередь, может способствовать увеличению времени испарения и времени диффузионного горения.

Перечень параметров, которые были использованы при расчетах, относящихся к дизельному топливу и судовым маловязким видам топлива

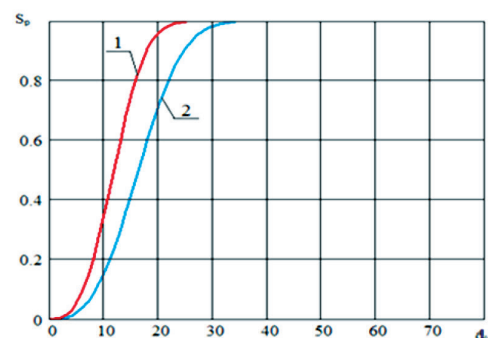
Вид топлива	Плотность ρ , кг/м ³ ;	Вязкость кинематическая ν , м ² /с;	Давление воздуха p , МПа
Дизельное топливо	0,845	0,00000361	3,5
Судовое маловязкое топливо	0,860	0,00000675	3,5

На рисунке *а* представлены графики дифференциальных характеристик распыливания исследуемых топлив, на рисунке *б* приведены интегральные характеристики распыливания топлива дизельной форсункой.

а)



б)



Относительные дифференциальные (а) и интегральные (б) характеристики распыливания топлива

Условные обозначения:

1 — топливо дизельное по ГОСТу 305–2013;

2 — судовое маловязкое топливо (СМТ) по ТУ 38.101567–87;

d_k — размер капель, выраженный в микрометрах;

S_p — доля совокупного объема капель, размер которых варьируется от наименьшего до рассматриваемого в общем объеме всех имеющихся капель;

R_p — процентное соотношение объема капель, имеющих размер от минимального до заданного значения, к суммарному объему всех капель

При интерпретации графика необходимо учитывать, что более близкое расположение кривой распыливания (линия 1 на рисунке) к оси ординат свидетельствует о более тонком и однородном распыливании топлива. Соответственно, чем дальше кривая (линия 2 на рисунке) отстоит от оси ординат, тем распыливание характеризуется большей грубостью и неоднородностью.

Обсуждение (Discussion)

В настоящее время основными направлениями комплексного улучшения энергетических и экологических характеристик дизелей является повышение давления впрыскивания (до 200–250 МПа и более) и применение микропроцессорного управления подачей топлива. Недостатком этих способов является необходимость внесения значительных изменений в конструкцию двигателей. Стоимость такого дизеля по сравнению с базовым двигателем увеличивается в 2–2,5 раза [8].

Для находящихся в эксплуатации дизелей относительно недорогими и легко осуществимыми являются способы дополнительной обработки низкокачественных видов топлива непосредственно на борту судна [9]. Для улучшения эксплуатационных свойств тяжелых сортов топлива используется эмульсия с водой [10, 11], ультразвуковая обработка [12], а также магнитные и электрические поля [13].

Сравнительный анализ характеристик дизельного топлива и СМТ показал, что судовое маловязкое топливо — более плотное и вязкое и содержит значительное количество тяжелых высокомолекулярных фракций. Для разрушения высокомолекулярных соединений, содержащихся в топливе, в лаборатории СДВС в ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет водного транспорта» была спроектирована, изготовлена и прошла успешные испытания опытная экспериментальная установка, в которой был использован высоковольтный электрический заряд. После обработки в установке плотность СМТ уменьшилась на 4 кг/м³ при весьма незначительном увеличении кинематической вязкости (на 0,08 сСт) [14].

Пробные сравнительные стендовые испытания отсека Ч 10,5/12 показали, что при переводе двигателя с дизельного топлива на судовое маловязкое топливо удельный расход увеличился на 12–14 %. При переводе двигателя на СМТ, обработанном высоковольтным электрическим зарядом, расход топлива увеличился на 2–6 %. Температура отработавших газов при переводе

на базовое СМТ повысилась на 10–15°, а при переводе на обработанное топливо — на 0–5°. Дымность отработавших газов при работе на необработанном СМТ повысилась в 10 раз, а на модифицированном СМТ — в 2 раза [15].

Анализ полученных при расчете относительных характеристик распыливания показал, что с повышением плотности и вязкости топлива увеличиваются размеры капель. Топливо-воздушная смесь становится более грубой и неоднородной. Увеличивается масса капель и доля совокупного объема капель, размер которых варьируется от наименьшего до рассматриваемого. Область образования максимального количества капель сместилась с 12 мкм до 22 мкм. Область образования наиболее крупных капель сместилась с 25 мкм до 45 мкм.

В результате проведенного анализа сделан вывод о том, что при переводе с дистиллятного на судовое маловязкое топливо произойдут следующие негативные изменения:

- увеличится расстояние, пройденное вершиной топливной струи за определенный период времени, в результате часть капель будет оседать на стенках камеры сгорания в виде пленки;
- увеличится время горения крупных капель топлива, процесс тепловыделения сместится на линию расширения.

Указанные факторы приведут к увеличению удельного расхода топлива, температуры отработавших газов и количества вредных выбросов.

Заключение (Conclusion)

Широкое использование на речном флоте судового маловязкого топлива обусловлено получением судовладельцами дополнительной прибыли за счет снижения его стоимости. На практике применение СМТ связано с ухудшением энергетических и экологических показателей двигателей.

Выполненные в работе расчеты и анализ относительных характеристик распыливания СМТ показали, что образующийся конгломерат капель получается более грубым и неоднородным, что является одной из основных причин смещения процесса сгорания на линию расширения. Это приводит к увеличению времени испарения топлива и ухудшению перемешивания топливовоздушной смеси, что в конечном итоге снижает эффективность сгорания и увеличивает выбросы вредных веществ. Более крупные капли топлива, попадая на стенки камеры сгорания, не успевают испариться и сгорают не полностью, образуя нагар и увеличивая тепловые потери.

Выполненное исследование позволяет выявить причины ухудшения рабочего процесса при работе на СМТ и предложить технологию улучшения энергетических и экологических показателей судовых дизелей, находящихся в эксплуатации при переводе их на дешевые низкокачественные сорта топлива.

В перспективе дальнейшие исследования должны быть направлены на разработку новых методов распыливания СМТ, основанных на использовании инновационных технологий. Это позволит значительно улучшить характеристики распыла и обеспечить более эффективное и экологически чистое сгорание данного типа топлива.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Губин Е. С. Результаты испытаний отсека дизеля ч 10,5/12 на топливе с газовой водородосодержащей присадкой / Е. С. Губин, И. В. Швецов, Г. С. Юр, А. С. Дмитриев // Труды Крыловского государственного научного центра. — 2025. — № 1(411). — С. 135–142. — EDN WIIICZC.
2. Юр Г. С. Исследование процесса микросмесеобразования в возмущенной газовой среде при различных давлениях впрыскивания топлива / Г. С. Юр, Е. С. Губин, А. С. Дмитриев // Транспортное дело России. — 2025. — № 3. — С. 151–154. — EDN MADVHU.
3. Лышевский А. С. Процессы распыливания топлива дизельными форсунками / А. С. Лышевский. — М: Машгиз, 1963. — 180 с.
4. Лышевский А. С. Распыливание топлива в судовых дизелях / А. С. Лышевский. — Л.: Судостроение, 1971. — 245 с.

5. Калашников С. А. Численное исследование влияния некоторых параметров рабочего процесса дизеля на выбросы оксидов азота / С. А. Калашников // Дизельные энергетические установки речных судов. — Новосибирск: Изд-во НГавт, 2005. — С. 7–13.

6. Покусаев М. Н. Моделирование образования вредных выбросов в выхлопных газах судового дизеля многотопливных систем / М. Н. Покусаев, А. Ю. Грабарчук, Т. В. Хоменко // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 3. — С. 490–500. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-3-490-500. — EDN HVFSIL.

7. Ерофеев П. А. Классификация современных методов совершенствования рабочего процесса судовых дизелей / П. А. Ерофеев, В. А. Жуков, С. Г. Черный // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 4. — С. 765–774. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-4-765-774. — EDN JQBJAN.

8. Новиков Л. А. Основные направления создания малотоксичных транспортных двигателей / Л. А. Новиков // Двигателестроение. — 2002. — № 2. — С. 23–27.

9. Губин Е. С. Исследование вредных выбросов судового дизеля при работе на топливе с газовой присадкой, содержащей водород / Е. С. Губин, Г. С. Юр, И. В. Швецов, С. В. Титов // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2025. — № 2. — С. 107–113. DOI: 10.24143/2073-1574-2025-2-107-113. — EDN SLAWVT.

10. Лебедев О. Н. Водотопливные эмульсии в судовых дизелях / О. Н. Лебедев, В. А. Сомов, В. Д. Синин. — Л: Судостроение, 1988. — 105 с.

11. Zhang, T. Experimental study on water particles action in the combustion of marine four-stroke diesel engine operated with emulsified fuels / T. Zhang, H. Okada, T. Tsukamoto, K. Ohe // Paper № 193. — Vienna: CIMAC, 2007.

12. Пивоварова Н. А. Улучшение свойств судового топлива ультразвуковой обработкой / Н. А. Пивоварова, Ю. Ш. Байрамова, Г. В. Власова // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 6. — С. 842–848. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-6-842-848. — EDN UFGUGG.

13. Вердиев М. Г. Оценка размеров ультрадисперсных частиц жидкостей, распылённых в электрическом поле / М. Г. Вердиев, М. К. Гусейнов, Ш. Ш. Набиев // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. — 2015. — № 1(36). — С. 17–23. — EDN TSNBRV.

14. Губин Е. С. Исследование характеристик модифицированного судового маловязкого топлива / Е. С. Губин, Г. С. Юр // Сибирский научный вестник Новосибирский научный центр Ноосферные знания и технологии Российской Академии естественных наук. Вып. XIV. — Новосибирск: Изд. СГУВТ, 2020. — С. 16–19.

15. Викулов С. В. Результаты сравнительных испытаний двигателя на дизельном и судовом маловязком топливе / С. В. Викулов, Е. С. Губин, И. Г. Мироненко [и др.] // Морские интеллектуальные технологии. — 2018. — № 4–4(42). — С. 125–128. — EDN YXSDJJ.

REFERENCES

1. Gubin, E. S., I. V. Shvetsov, G. S. Yur and A. S. Dmitriev. “Test results of compartment ch 10.5/12 on diesel fuel with gas hydrogen additive.” *Transactions Of The Krylov State Research Centre* 1(411) (2025): 135–142.

2. Yur, G. S., E. S. Gubin and A. S. Dmitriev. “Study of the process of micromixture formation in a disturbed gaseous environment at various fuel injection pressures.” *Transport Business Of Russia* 3 (2025): 151–154.

3. Lyshevskiy, A. S. *Protsessy raspylivaniya topliva dizel'nyimi forsunkami* M: Mashgiz, 1963: 180.

4. Lyshevskiy, A. S. *Raspylivanie topliva v sudovykh dizelyakh* L: Sudostroenie, 1971: 245.

5. Kalashnikov, S. A. “Chislennoe issledovanie vliyaniya nekotorykh parametrov rabocheho protsessa dize-lya na vybrosy oksidov azota.” *Dizel'nye energeticheskie ustanovki rechnykh sudov*. Novosibirsk: Izd-vo NGAVT, 2005: 7–13.

6. Pokusaev, M. N., A. Yu. Grabarchuk and T. V. Khomenko. “Simulation of the harmful emissions formation in the exhaust gases of marine diesel of multi-fuel systems.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admiral S. O. Makarova* 15.3 (2023): 490–500. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-3-490-500.

7. Erofeev, P. A., V. A. Zhukov and S. G. Chernyy. “Classification of modern methods for improving the working process of marine diesel engine.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admiral S. O. Makarova* 12.4 (2020): 765–774. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-4-765-774.

8. Novikov, L. A. "Osnovnye napravleniya sozdaniya malotoksichnykh transportnykh dvigateley." *Dvigatelstroenie* 2 (2002): 23–27.
9. Gubin, E. S., G. S. Yur, I. V. Shvetsov and S. V. Titov. "Study of harmful emissions of a marine diesel when operating on fuel with a gas additive containing hydrogen." *Vestnik Of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering And Technologies* 2 (2025): 107–113. DOI: 10.24143/2073-1574-2025-2-107-113.
10. Lebedev, O. N., V. A. Somov and V. D. Sisin. *Vodotoplivnye emul'sii v sudovykh dizelyakh* L: Sudostroyeniye, 1988: 105.
11. Zhang, T., H. Okada, T Tsukamoto and K. Ohe "Experimental study on water particles action in the combustion of marine four-stroke diesel engine operated with emulsified fuels." *Paper No. 193*. Vienna: CIMAC, 2007.
12. Pivovarova, N. A., Yu. Sh. Bayramova and G. V. Vlasova. "Improving the properties of marine fuel by ultrasonic processing." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admiral S. O. Makarova* 13.6 (2021): 842–848. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-6-842-848.
13. Verdiev, M. G., M. K. Guseynov and Sh. Sh. Nabiev. "Assessment of the sizes of nanolarge-scale particles of the liquids sprayed in electric field." *Herald Of Daghestan State Technical University. Technical Sciences* 1(36) (2015): 17–23.
14. Gubin, E. S. and G. S. Yur. "Issledovanie kharakteristik modifitsirovannogo sudovogo malovyazkogo topliva." *Sibirskiy nauchnyy vestnik Novosibirskiy nauchnyy tsentr Noosfernye znaniya i tekhnologii Rossiyskoy Akademii estestvennykh nauk. Vyp. XIV*. Novosibirsk: Izd. SGUVT, 2020: 16–19.
15. Vikulov, S. V., E. S. Gubin and I. G. Mironenko et al. "Results of comparative engine tests with diesel and marine low-viscosity fuel." *Morskie intellektual'nye tekhnologii* 4–4(42) (2018): 125–128.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Юр Геннадий Сергеевич —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «СГУВТ»
630099, Российская Федерация, г. Новосибирск,
ул. Щетинкина, 33
e-mail: smf@nsawt.ru
Губин Евгений Сергеевич —
кандидат технических наук, доцент кафедры
Судовых энергетических установок ФГБОУ ВО
«СГУВТ»
630099, Российская Федерация, г. Новосибирск,
ул. Щетинкина, 33
e-mail: e.v.gubin@nsawt.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Yur, Gennady S. —
Dr. of Technical Sciences, professor
Siberian State University of Water Transport
33 Schetinkina St., Novosibirsk, 630099,
Russian Federation
e-mail: smf@nsawt.ru
Gubin, Evgeny S. —
PhD, associate professor of the Department of Marine
Power Plants
Siberian State University of Water Transport
33 Schetinkina St., Novosibirsk, 630099,
Russian Federation
e-mail: e.v.gubin@nsawt.ru

Статья поступила в редакцию: 19 июня 2025 г.
Received: June 19, 2025.