

Научная статья
УДК 621.431.74-44

<https://doi.org/10.24143/2073-1574-2025-2-107-113>
EDN SLAWVT

Исследование вредных выбросов судового дизеля при работе на топливе с газовой присадкой, содержащей водород

**Евгений Сергеевич Губин[✉], Геннадий Сергеевич Юр,
Игорь Витальевич Швецов, Сергей Владиленович Титов**

*Сибирский государственный университет водного транспорта,
Новосибирск, Россия, e.v.gubin@nsawt.ru[✉]*

Аннотация. Использование водорода как горючего продемонстрировало значительное экологическое преимущество, заключающееся в отсутствии вредных веществ в выхлопных газах судовых дизельных двигателей. Однако текущие исследования в основном сосредоточены на использовании водорода либо в чистом виде, либо в качестве добавки к поступающему воздуху. Изучена возможность применения газообразных водородосодержащих присадок непосредственно к дизельному топливу. Разработана, сконструирована и успешно испытана экспериментальная установка, предназначенная для получения водорода из дизельного топлива с использованием кавитационного процесса. Приведено описание экспериментальной установки для получения присадки водорода в дизельном дистиллятном топливе. Для проведения процесса газификации топлива использован процесс кавитации при помощи роторно-пульсационного аппарата. Применен принцип работы двух центробежных ступеней для преодоления кавитационного барьера. Выполнен хроматографический анализ полученной газовой смеси, проведен анализ физико-химических свойств топлива. Выявлен идеальный период времени для переработки горючего, обеспечивающий сохранение его качеств и достижение наибольшего объема гидратирующей добавки. Также была установлена закономерность испарения топлива с газовой присадкой в течение определенного времени. Представлены результаты исследования вредных выбросов судового дизеля при работе по винтовой характеристике на топливе с газовой присадкой, содержащей водород, и сделано заключение о пригодности работы данного вида топлива в судовых нуждах. Данное исследование существенно продвинет вопрос об энергоэффективности, экономичности и экологичности состава полученной присадки.

Ключевые слова: дистиллятное дизельное топливо, кавитация, газификация, водородосодержащий газ, физико-химические свойства, винтовые характеристики, вредные выбросы

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

Original article

Study of harmful emissions of a marine diesel when operating on fuel with a gas additive containing hydrogen

Evgeniy S. Gubin[✉], Gennadiy S. Yur, Igor V. Shvetsov, Sergey V. Titov

*Siberian State University of Water Transport,
Novosibirsk, Russia, e.v.gubin@nsawt.ru[✉]*

Abstract. The use of hydrogen as a fuel has demonstrated a significant environmental advantage in the absence of harmful substances in the exhaust gases of marine diesel engines. However, current research is mainly focused on using hydrogen either in its pure form or as an additive to incoming air. The possibility of using gaseous hydrogen-containing additives directly to diesel fuel has been studied. An experimental installation designed to produce hydrogen from diesel fuel using a cavitation process has been developed, constructed and successfully tested. An experimental setup for producing hydrogen additives in diesel distillate fuel is described. To carry out the process of fuel

gasification, a cavitation process using a rotary pulsation apparatus was used. The principle of operation of two centrifugal stages is applied to overcome the cavitation barrier. A chromatographic analysis of the resulting gas mixture was performed, and the physico-chemical properties of the fuel were analyzed. The ideal time period for fuel processing has been identified, ensuring the preservation of its qualities and achieving the largest volume of hydrating additives. A pattern of evaporation of fuel with a gas additive over a certain period of time was also established. The results of a study of harmful emissions from marine diesel when operating according to the screw characteristic on fuel with a gas additive containing hydrogen are presented, and a conclusion is made about the suitability of this type of fuel for marine needs. This study will significantly advance the issue of energy efficiency, cost-effectiveness and environmental friendliness of the composition of the resulting additive.

Keywords: distillate diesel fuel, cavitation, gasification, hydrogen-containing gas, physicochemical properties, propeller characteristics, harmful emissions

For citation: Gubin E. S., Yur G. S., Shvetsov I. V., Titov S. V. 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.* 2025;2:107-113. (In Russ.). <https://doi.org/10.24143/2073-1574-2025-2-107-113>. EDN SLAWVT.

Введение

При использовании водорода в качестве топлива полностью отсутствуют вредные выбросы. Конечным продуктом при его горении является вода.

В дизельных двигателях водород может использоваться в чистом виде, а также в составе присадок к воздушному потоку или топливу [1–5]. Включение присадок в процесс не требует существенных модификаций в конструкции серийно выпускаемых дизелей, уже эксплуатируемых в настоящее время.

Присутствие водорода в топливной смеси приводит к снижению пиковых температур в области горения, где обычно происходит окисление атмосферного азота. Одновременно в этих же областях происходит обратный процесс: оксиды азота, сформировавшиеся в процессе сгорания, распадаются до молекулярного азота и водяного пара.

Научно-исследовательские работы по использованию водорода в дизелях в основном были посвящены применению водорода в чистом виде либо в виде присадок к воздушному заряду. В области применения водородных газовых добавок к дизельному топливу ранее исследований не осуществлялось.

Целью представленного научного исследования является получение водорода из дизельного топлива прямо на борту судна. Также в рамках исследования будет проведен анализ объема вредных веществ, выделяемых дизельным двигателем при работе с винтовой нагрузкой, когда в дизельное топливо добавляется газообразная водородсодержащая присадка.

Экспериментальная установка для получения присадки водорода в дизельном топливе

В соответствии с требованиями Российского морского регистра судоходства использование топлива с температурой вспышки менее 61 °C запрещено. Исходя из этого, внедрение водорода в дизельное топливо должно происходить без по-

вышения температуры и последующего хранения образовавшегося газа на судне. В связи с этим для преобразования дизельного топлива в газообразное состояние используется метод кавитации.

Установлено, что при коллапсе парогазовых пузырьков, находящихся в жидкой среде, температура внутри них может подниматься до 1 500 °C, поскольку пузырьки могут резко сжиматься и расширяться под воздействием переменного локального давления, температура газа внутри пузырьков колеблется в широких пределах, а давление может превышать 15 МПа [6]. В таких условиях в дизельном топливе происходит деструкция молекул жидкого углеводорода и его преобразование в газ [7].

В лаборатории судовых энергетических установок Сибирского государственного университета водного транспорта была спроектирована и построена уникальная экспериментальная установка для извлечения водорода из дизельного топлива дистиллятного типа с использованием кавитационного процесса. Процесс газификации внутри корпуса установки осуществлялся при атмосферном давлении и комнатной температуре.

Установка разработана на основе известной и широко распространенной конструкции роторно-пульсационного аппарата (РПА) [8]. Для преодоления кавитационного барьера внутри корпуса РПА дополнительно установлены две центробежные ступени. Фотография опытной экспериментальной установки приведена на рис. 1.

Состав газовой смеси был исследован с помощью хроматографического анализа (результаты которого представлены в табл. 1), возникшего в дизельном топливе вследствие кавитации. При выполнении расчетов, представленных в табл. 1, из расчетных данных был исключен азот, входящий в состав атмосферного воздуха. Во время забора проб газовой смеси удавалось не полностью вытеснить воздух, который находился внутри, т. к. для функционирования хроматографа требуется

гелий. Анализ компонентного состава газовой смеси, отобранный из установки, был произведен в аккредитованной лаборатории физико-химических исследований органических соединений, содержащихся в горных породах, нефти и газах, в составе

Сибирского НИИ геологии, геофизики и минерального сырья (АО «СНИИГГиМС»). Определение проводилось на хроматографическом оборудовании модели HP6890, прошедшем сертификацию, с использованием методики СТО ИГ 026.11.



Рис. 1. Лабораторная установка для производства газообразного компонента с водородом из дизельного топлива

Fig. 1. Laboratory plant for production of gaseous component with hydrogen from diesel fuel

Таблица 1
Table 1

Химический состав газа
Chemical composition of the gas

Химический элемент и соединение	Дизельное топливо (ГОСТ 305-2013). Концентрация, % об.	
	Полный состав газа	Пересчет на исключение азота
He	0,003464	0,013816143
H	0,056352	0,224723124
O	24,47703	97,60952837
N	69,34365	0
CO ₂	0,309812	1,235471533
CH ₄	0,001184	0,004723551
C ₂ H ₆	2,54E-05	0,000101157
C ₂ H ₄	2,40E-05	9,58192E-05
C ₃ H ₈	1,00E-05	4,00295E-05
C ₃ H ₆	1,46E-05	5,82754E-05
C ₄ H ₁₀	0,000143352	0,000571671
C ₄ H ₁₀ (Н-бутан)	0,001080014	0,004306867
C ₄ H ₈	0	0
C ₅ H ₁₂	4,14E-05	0,000165271
C ₅ H ₁₂ (Изопентан)	0,009888481	0,03943326
C ₅ H ₁₀	0,007508534	0,029942516
C ₆ H ₁₄	0,045611197	0,181888304
C ₆ H ₁₄ (Н-гексан)	0,016899557	0,067392042
C ₇ H ₁₆	0,113695736	0,453395775
C ₇ H ₁₆ (Н-гептан)	0,030573873	0,121922473
C ₆ H ₆	0,003115443	0,012423764

Затем были определены температура вспышки, плотность и количество испарившихся из топлива газообразных фракций с течением времени. Ре-

зультаты исследований представлены в табл. 1, 2 и на рис. 1.

*Таблица 2**Table 2***Температура вспышки стандартного и улучшенного дизельного топлива, °C (согласно ГОСТ 305-2013)****Flash point of standard and improved diesel fuel, °C (according to ISS 305-2013)**

Дизельное топливо	Через 10 мин после воздействия	Через 24 ч после воздействия
Без обработки	65	65
После 5 мин обработки	65	65
После 7,5 мин обработки	64	66
После 10 мин обработки	64	66
После 12,5 мин обработки	64	66

Данные приводят температуру вспышки обычного дизельного топлива и дизельного топлива, подвергшегося модификации (в соответствии с ГОСТ 305-2013). Представлены значения, измеренные через 10 мин и через 24 ч после проведения обработки. В табл. 2 приведены результаты для необработанного топлива, а также топлива, обработанного в течение различного времени: 5; 7,5; 10 и 12,5 мин.

Согласно табл. 2 температура вспышки зависит от времени обработки дизельного топлива, находо-

дящегося внутри корпуса экспериментальной установки. Через 7,5 мин после начала процесса обработки температура вспышки уменьшилась на 1 °C. Через 24 ч хранения топлива с газовой присадкой в открытой емкости вспышка повысилась на 2 °C. Данный эффект обусловлен тем, что летучая газовая присадка, содержащаяся в дизельном топливе, испаряется в окружающую среду.

В табл. 3 представлены итоги замеров плотности дизельного топлива, подвергнутого обработке посредством кавитационного процесса.

*Таблица 3**Table 3***Изменение плотности дизельного топлива (базового и с добавлением газовой присадки), кг/м³****Change in the density of diesel fuel (base and with the addition of a gas additive), kg/m³**

Дизельное топливо	Через 10 мин после воздействия	Через 1 ч после воздействия
Без обработки	848	848
После 5 мин обработки	846	846
После 7,5 мин обработки	829	847
После 10 мин обработки	834	847
После 12 мин обработки	840	848

Результаты анализа данных, представленных в табл. 3, демонстрируют, что пиковое значение концентрации газовой фракции, присутствующей в модифицированном топливе, достигается на 7,5-й мин с момента старта процесса. После этого времени наблюдается активное удаление газов из объема реактора, что приводит к постепенному увеличению плотности модифицированного топлива.

Таким образом, для разработанного нами прототипа реактора оптимальная продолжительность обработки топлива, позволяющая получить наибольший выход водородсодержащей добавки, составляет 7,5 мин.

На рис. 2 приведен график, отражающий динамику испарения пробы полученного на установке

топлива, содержащего газовую присадку в течение 96 ч. Дизельное топливо обрабатывалось в установке в течение 7,5 мин.

Согласно рис. 2 в результате испарения со временем происходит потеря веса топлива с газовой присадкой, содержащейся в обработанном дизельном топливе газа. Важно подчеркнуть, что наиболее активное испарение наблюдается в первые 24 ч. Впоследствии данный процесс продолжался неуклонно в течение двухнедельного периода. После полного высвобождения водородсодержащего газа в окружающую среду исчезает мутная непрозрачность и горючее приобретает прозрачность, идентичную исходному дизельному топливу.

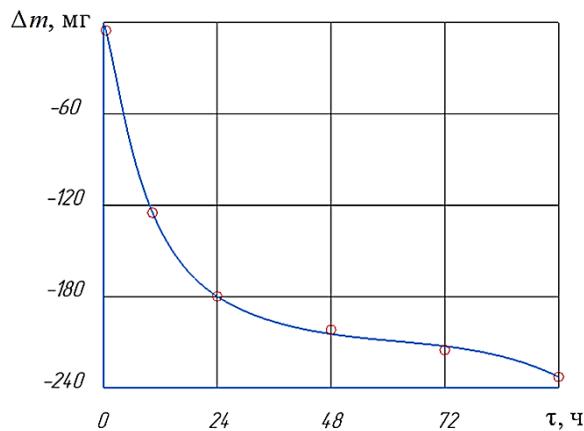


Рис. 2. Динамика уменьшения веса образца топлива с газовой присадкой в количестве 200 г с течением времени

Fig. 2. Dynamics of weight reduction of a fuel sample with a gas additive in the amount of 200 grams over time

Результаты испытаний дизеля на топливе с газовой присадкой, содержащей водород

Для проведения сравнительного анализа ис-

пользовался дизельный двигатель модели Ч10,5/12 (Д 21), оснащенный электрическим нагрузочным стендом (рис. 3).

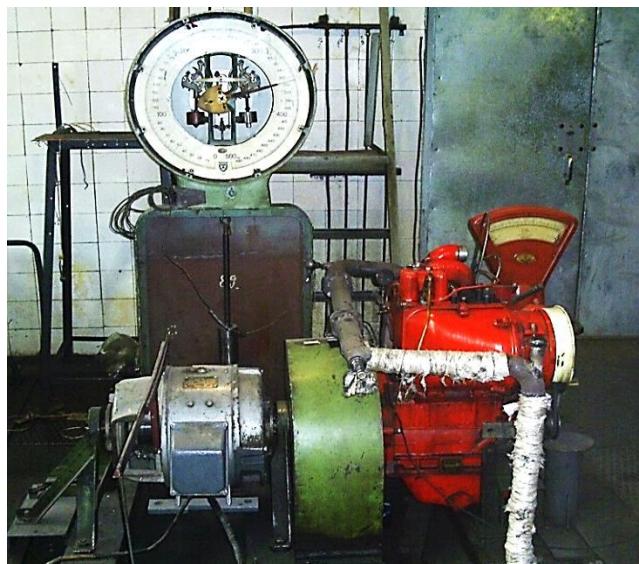


Рис. 3. Фотография испытательного стенда

Fig. 3. Photograph of the test stand

Горючее с добавлением газообразного водорода производилось на специальном стенде непосредственно перед его использованием в двигателе внутреннего сгорания.

Концентрация нормируемых газообразных химических соединений и токсичности отработавших газов определялась прибором – газоанализатором «ГИАМ-29-М-4» (СПО «Аналитприбор»). При помощи него проводились измерения концентрации оксидов азота,monoоксида углерода, суммарных углеводородов, диоксида серы и кислорода. Его

паспортные значения соответствуют требованиям ГОСТ Р 31967-2012 «Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Выбросы вредных веществ с отработавшими газами. Нормы и методы определения».

На рис. 4 представлены итоги испытания дизельного двигателя, работающего как на стандартном топливе, так и на топливе с водородной добавкой (использованы следующие обозначения: NO_x – уровень концентрации оксидов азота, ppm; N – показатель дымности выхлопных газов, измененный по шкале Hartrige, %; CO – уровень концен-

тации оксида углерода, ppm; CH – уровень концен-

трации суммарных углеводородов, ppm).

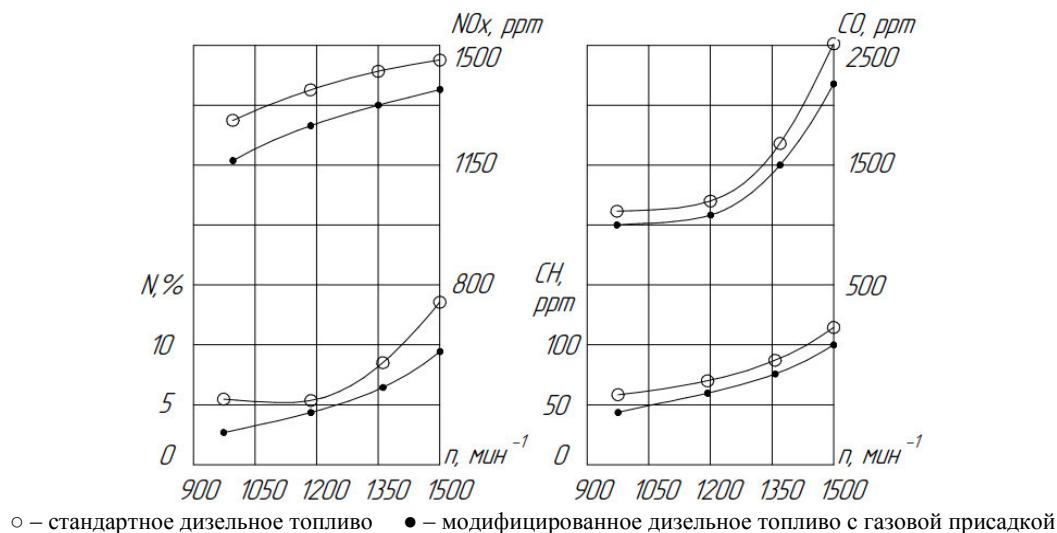


Рис. 4. Выбросы двигателя Ч10,5/12 при работе по винтовой характеристике

Fig. 4. Engine emissions CH10.5/12 when operating according to the screw characteristic

Согласно рис. 4 использование водорода в качестве присадки к дизельному топливу сокращает выбросы при работе дизеля по винтовой характеристике.

Эксперименты проводились с дизельным топливом, соответствующим стандарту ГОСТ 305-2013. Варьировались параметры ультразвукового воздействия: частота в диапазоне от 20 до 40 кГц и мощность от 100 до 300 Вт. Продолжительность каждого эксперимента составляла от 30 до 60 мин. Контролировалась температура топлива в реакторе, давление, а также состав выделяемого газа.

Заключение

Результаты экспериментов свидетельствуют о том, что процесс кавитации эффективно генерирует водород из дизельного топлива. С увеличением мощности ультразвукового воздействия наблюдается рост концентрации водорода в газовой сме-

си. Также повышение частоты приводит к более интенсивному газообразованию. Однако превышение определенного порога мощности и частоты может привести к перегреву топлива и образованию побочных продуктов.

Оптимальные параметры для получения максимального выхода водорода были определены экспериментально: частота – 30 кГц; мощность – 250 Вт. При этих условиях содержание водорода в газовой смеси достигало 15–20 %. Дальнейшие исследования направлены на оптимизацию конструкции кавитационного реактора и разработку системы отделения водорода от других газообразных компонентов для повышения чистоты получаемого продукта.

В дизельных энергетических установках, применяемых на водном транспорте, целесообразно использовать топливные смеси с добавлением водорода в роли газообразной присадки.

Список источников

- Гайворонский А. И., Гордин М. В., Марков В. А., Карпец Ф. С. Технология промышленного получения водорода и его использования в транспортных энергетических установках // Двигателестроение. 2022. № 1 (287). С. 3–20.
- Abn-Jrai A., Tsolakis A., Megaritis A. The influence of H₂ and CO on diesel engine combustion characteristics, exhaust gas emissions and after treatment selective catalytic NO_x reduction // International Journal of Hydrogen Energy. 2007. V. 32. N. 15. P. 3565–3571.
- Авраменко А. Н., Левтеров А. М., Бганцев В. Н., Гладкова Н. Ю., Киреева В. Н. Перспективы применения микродобавок водорода для улучшения экологических показателей дизельного двигателя // Journal of Mechanical Engineering. 2019. Т. 22. № 1. С. 70–75.
- Новиков Л. А. Основные направления создания малотоксичных транспортных двигателей // Двигателестроение. 2002. № 2. С. 23–27.
- Титов С. В., Юр Г. С., Коновалов В. В., Девяткин А. А. Исследование эффективности использования газовой присадки к воздушному заряду для снижения концентрации оксидов азота в отработавших газах судового дизеля // Транспорт. Горизонты развития: тр. I Междунар. науч.-пром. форума (Нижний Новгород, 25–28 мая 2021 г.). Н. Новгород: Изд-во ВГУТ, 2021. С. 174–175.
- Маргулис М. А. Звукохимические реакции и со-

нолюминисценция. М.: Химия, 1986. 288 с.

7. Каптерев С. В., Юр Г. С., Пословина Л. П., Степанов В. Г., Ионэ К. Г. Получение низших олефинов низкотемпературным пиролизом углеводородного сырья // Химия нефти и газа: материалы IV Междунар. конф., посвященной 275-летию Рос. акад. наук и 30-летию Ин-

та химии нефти СО РАН (Томск, 02–06 октября 2000 г.). Томск: СТТ, 2000. С. 294–297.

8. Промтов М. А. Пульсационные аппараты роторного типа: теория и практика. М.: Машиностроение-1, 2001. 260 с.

References

1. Gaivoronskii A. I., Gordin M. V., Markov V. A., Karpets F. S. Tekhnologija promyshlennogo poluchenija vodoroda i ego ispol'zovaniija v transportnykh energeticheskikh ustrojstvakh [Technology of industrial production of hydrogen and its use in transport power plants]. *Dvigatelstroenie*, 2022, no. 1 (287), pp. 3-20.
2. Abn-Jrai A., Tsolakis A., Megaritis A. The influence of H₂ and CO on diesel engine combustion characteristics, exhaust gas emissions and after treatment selective catalytic NO_x reduction. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2007, vol. 32, no. 15, pp. 3565-3571.
3. Avramenko A. N., Levterov A. M., Bgantsev V. N., Gladkova N. Iu., Kireeva V. N. Perspektivi primeneniija mikrodobavok vodoroda dlja uluchsheniija ekologicheskikh pokazatelei dizejl'nogo dvigatelia [Prospects of using hydrogen microadditives to improve the environmental performance of a diesel engine]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2019, vol. 22, no. 1, pp. 70-75.
4. Novikov L. A. Osnovnye napravlenija sozdaniija malotoksichnykh transportnykh dvigatelei [The main directions of creation of low-toxic transport engines]. *Dvigatelstroenie*, 2002, no. 2, pp. 23-27.
5. Titov S. V., Iur G. S., Konovalov V. V., Deviatkin A. A. Issledovanie effektivnosti ispol'zovaniija gazovoij prisadki

k vozdušnomu zariadu dlja snizhenija kontsentratsii oksidov azota v otrobotavshikh gazakh sudovogo dizelia. Transport. Gorizonty razvitiia [Investigation of the effectiveness of using a gas additive to an air charge to reduce the concentration of nitrogen oxides in the exhaust gases of a marine diesel engine. Transport. Horizons of development]. *Trudy I Mezhdunarodnogo nauchno-promyshlennogo foruma (Nizhnii Novgorod, 25–28 maia 2021 g.)*. Nizhnii Novgorod, Izd-vo VGUVT, 2021. Pp. 174-175.

6. Margulis M. A. Zvukokhimicheskie reaktsii i sonoluminisentsija [Sound chemical reactions and sonoluminescence]. Moscow, Khimiia Publ., 1986. 288 p.

7. Kapterev S. V., Iur G. S., Poslovina L. P., Stepanov V. G., Ione K. G. Poluchenie nizshikh olefinov nizkotemperaturnym pirolyzom uglevodorodnogo syr'ja. Khimiia nefti i gaza [Production of lower olefins by low-temperature pyrolysis of hydrocarbon raw materials. Chemistry of oil and gas]. Materialy IV Mezhdunarodnoi konferentsii, posviashchennoi 275-letiju Rossiiskoi akademii nauk i 30-letiju Instituta khimii nefti SO RAN (Tomsk, 02–06 oktiabria 2000 g.). Tomsk, СТТ, 2000. Pp. 294-297.

8. Promtov M. A. Pul'satsionnye apparaty rotornogo tipa: teoriia i praktika [Rotary type pulsating devices: theory and practice]. Moscow, Mashinostroenie-1 Publ., 2001. 260 p.

Статья поступила в редакцию 21.03.2025; одобрена после рецензирования 29.04.2025; принята к публикации 13.05.2025
The article was submitted 21.03.2025; approved after reviewing 29.04.2025; accepted for publication 13.05.2025

Информация об авторах / Information about the authors

Евгений Сергеевич Губин – кандидат технических наук; доцент кафедры судовых энергетических установок; Сибирский государственный университет водного транспорта; e.v.gubin@nsawt.ru

Evgeniy S. Gubin – Candidate of Technical Sciences; Assistant Professor of the Department of Marine Power Plants; Siberian State University of Water Transport; e.v.gubin@nsawt.ru

Геннадий Сергеевич Юр – доктор технических наук, профессор; профессор кафедры судовых энергетических установок; Сибирский государственный университет водного транспорта; gs.yur@yandex.ru

Gennadiy S. Yur – Doctor of Technical Sciences, Professor; Professor of the Department of Marine Power Plants; Siberian State University of Water Transport; gs.yur@yandex.ru

Игорь Витальевич Швецов – заведующий лабораторией кафедры судовых энергетических установок; Сибирский государственный университет водного транспорта; ksdvs@nsawt.ru

Igor V. Shvetsov – Head of the Laboratory of the Department of Marine Power Plants; Siberian State University of Water Transport; ksdvs@nsawt.ru

Сергей Владиленович Титов – доктор технических наук, доцент; доцент кафедры судовых энергетических установок; Сибирский государственный университет водного транспорта; svtcom@bk.ru

Sergey V. Titov – Doctor of Technical Sciences, Assistant Professor; Assistant Professor of the Department of Marine Power Plants; Siberian State University of Water Transport; svtcom@bk.ru

