

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И МАШИННО-ДВИЖИТЕЛЬНЫЕ КОМПЛЕКСЫ

SHIP ELECTRIC POWER INSTALLATIONS AND MACHINE-PROPULSIVE COMPLEXES

Научная статья

УДК 621.43

<https://doi.org/10.24143/2073-1574-2022-2-51-57>

Разработка системы охлаждения судовых малоразмерных дизелей, работающих при различных температурах забортной воды в условиях лаборатории

*Михаил Николаевич Покусаев¹, Алексей Викторович Трифонов^{2✉},
Василий Александрович Костыренко³*

¹⁻³*Астраханский государственный технический университет,
Астрахань, Россия, trifonov91@inbox.ru*

Аннотация. Использование системы охлаждения на водном транспорте считается наиболее результативным способом повышения энергоэффективности судна. В настоящее время активно применяются замкнутые системы охлаждения и частотно-регулируемые приводы электронасосов забортной воды. Изучается вариант повышения энергоэффективности систем охлаждения с навешенными насосами забортной воды. Приведена гидравлическая схема установки с энергоэффективной системой охлаждения судового двигателя. Для изучения способов снижения механических потерь на привод вспомогательных механизмов судового двигателя в лаборатории «Судовые дизели» ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет» разработан стенд испытаний двигателя Iveco 8041106. Система охлаждения двигателя не имеет термостата для регулирования теплового состояния, вместо термостата на двигателе между валом отбора мощности двигателя и насосом ВКС1/16 установлен вариатор с электронным управлением. При постоянной частоте вращения двигателя вариатор позволяет менять частоту вращения насоса, изменять подачу забортной воды через теплообменник и таким образом регулировать тепловое состояние двигателя. Отмечено, что во время испытаний двигателя необходимо поддерживать температуру забортной воды постоянной. Приведено описание применения на стенде емкостей с теплоизоляцией для снижения теплообмена с окружающей средой. Рассматриваются варианты типов емкостей и материалов для изоляции. Для подготовки воды нужной температуры в систему охлаждения на экспериментальном стенде подключается чиллер. Приводится расчет теплоизоляции и сравнение результата с реальным испытанием. На существующих стендах для испытания дизелей изменение теплового состояния двигателя осуществляется только изменением нагрузки на двигатель. На разработанном стенде тепловое состояние также можно менять, в том числе за счет регулирования температуры забортной воды, что расширяет его возможности по моделированию реальных процессов.

Ключевые слова: энергоэффективность, система охлаждения, судовой насос, испытания двигателей, теплоизоляция, коэффициент теплопроводности

Благодарности: статья подготовлена в рамках договора с Фондом содействия инновациям № 3954ГС1/63283 от 24 февраля 2021 г. о предоставлении гранта на проведение научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ.

Для цитирования: Покусаев М. Н., Трифонов А. В., Костыренко В. А. Разработка системы охлаждения судовых малоразмерных дизелей, работающих при различных температурах забортной воды в условиях лаборатории // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2022. № 2. С. 51–57. <https://doi.org/10.24143/2073-1574-2022-2-51-57>.

Original article

Developing cooling system for small-sized marine diesel engines operating at different seawate temperatures in laboratory conditions

Mikhail N. Pokusaev¹, Aleksei V. Trifonov²✉, Vasily A. Kostyrenko³

¹⁻³Astrakhan State Technical University,
Astrakhan, Russia, trifonov91@inbox.ru ✉

Abstract. Using a cooling system in water transport is considered the most effective way to increase the energy efficiency of a vessel. Currently, closed-loop cooling systems and frequency-controlled drives of seawater electric pumps are actively used. An option of improving the energy efficiency of cooling systems with mounted seawater pumps is being studied. The hydraulic scheme of the unit with an energy-efficient ship engine cooling system is presented. To study ways to reduce mechanical losses in the drive of auxiliary mechanisms of a marine engine, the laboratory “Marine Diesels” of Astrakhan State Technical University developed a test bench for the Iveco 8041I06 engine. The engine cooling system does not have a thermostat to control the thermal state; instead of a thermostat on the engine, an electronically controlled variator is installed between the engine power take-off shaft and the BKC 1/16 pump. At a constant engine speed, the variator allows changing the pump speed, supply of sea water through the heat exchanger and regulating the thermal state of the engine. It has been found that during engine tests it is necessary to maintain the temperature of the outboard water constant. A description is given of the use of tanks with thermal insulation at the stand to reduce heat exchange with the environment. Variants of types of containers and materials for insulation are considered. To prepare water of the required temperature a chiller is connected to the cooling system at the experimental stand. The calculation of thermal insulation and comparison of the result with a real test is given. On the stands for testing diesel engines the change in the thermal state of the engine is carried out only by changing the load on the engine. On the developed stand, the thermal state can also be changed, including by controlling the seawater temperature, which expands its capabilities for modeling real processes.

Keywords: energy efficiency, cooling system, marine pump, engine testing, heat insulation, heat conductivity coefficient

Acknowledgements: the article was prepared under an agreement with the Innovation Promotion Foundation No. 3954GS1/63283 dated February 24, 2021 on the provision of a grant for research and design works.

For citation: Pokusaev M. N., Trifonov A. V., Kostyrenko V. A. Developing cooling system for small-sized marine diesel engines operating at different seawate temperatures in laboratory conditions. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies*. 2022;2:51-57. (In Russ.) <https://doi.org/10.24143/2073-1574-2022-2-51-57>.

Введение

В настоящее время стратегия повышения уровня энергоэффективности является основным направлением развития на водном транспорте, что подтверждается международными и национальными нормативными актами. В России основные положения этой стратегии изложены в Федеральном законе № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности» [1].

В Приложении VI Международной конвенции по предотвращению загрязнения с судов МАРПОЛ 73/78 2013 г. действуют обязательные требования, обязывающие судовладельцев разрабатывать судовой план управления энергоэффективностью и каждые пять лет снижать значение конструктивного коэффициента энергоэффективности судна [2]. Для выполнения этих требований судовладельцам необходимо применять на судах технологии, которые будут уменьшать выбросы парниковых газов от энергетической установки.

Перспективным направлением для повышения энергоэффективности судна является система

охлаждения. Получили распространение такие разработки, как замкнутые системы охлаждения и частотно-регулируемые приводы электронасосов забортной воды. В целях развития данного направления изучается вариант повышения энергоэффективности систем охлаждения с навешенными насосами забортной воды.

В научной лаборатории «Судовые дизели» ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет» разработан стенд для испытания судового малоразмерного двигателя. Стенд предназначен для проведения исследований энергоэффективности системы охлаждения конвертированного дизеля Iveco 8041I06.

Материалы исследования

Охлаждение позволяет деталям двигателя сохранять свои механические свойства для выполнения их рабочих функций. Для отвода тепла от двигателя используется подводимая по трубопроводам системы вода. Пресная вода используется для охлаждения непосредственно деталей двигателя,

заборная вода – для охлаждения пресной воды, проходящей через теплообменник. На обеспечение работы насоса затрачивается дополнительная мощность от двигателя, вследствие чего расход топлива двигателя повышается [3]. Чтобы снизить энергетические затраты на привод насосов системы охлаждения, необходимо обеспечивать их работу на режиме, при котором потребляемая от двигателя мощность минимальна.

На распространенных вспомогательных двигателях и на главных малоразмерных двигателях насосы системы охлаждения обычно имеют привод от коленчатого вала двигателя – навешенные насосы.

Одним из наиболее перспективных направлений повышения энергоэффективности является снижение потерь на привод вспомогательных механизмов. Использование устройств для регулирования частоты вращения навешенных насосов позволит менять расход охлаждающей жидкости при изменении теплового состояния двигателя.

На двигателе между валом отбора мощности двигателя и насосом ВКС1/16 установлен вариатор с электронным регулятором. При постоянной частоте вращения двигателя вариатор позволяет менять частоту вращения насоса, изменять подачу заборной воды через теплообменник и таким образом регулировать тепловое состояние двигателя. Испытания двигателя проводятся в соответствии с ГОСТ Р 52517-2005 [4]. При испытании двигателя на стенде для моделирования электрической нагрузки используются нагрузочные электромеханические устройства.

На рис. 1 проиллюстрирована гидравлическая схема системы охлаждения судового двигателя на экспериментальном стенде.

Из цистерны воды внешнего контура 1 вода откачивается насосом внешнего контура 10, проходя через краны 3, 4, 7 для подачи воды внешнего контура. Приводит насос во вращение дизельный двигатель 13. Вода проходит через расходомер 8 и через насос 10 нагнетается в кожухотрубный водоводяной теплообменник 12. Вода из теплообменника поступает на выход из системы. Чиллер 2 охлаждает или нагревает воду в цистернах 1. Термометры 5 и 6 фиксируют температуру в цистернах 1. Изменение теплового состояния двигателя возможно при изменении режима его работы и температурных условий окружающей среды: температуры воздуха, заборной воды. Цистерны 1 имеют теплоизоляцию для поддержания постоянной температуры во время испытаний.

Для проведения испытаний необходимо иметь воду для охлаждения с постоянной заданной температурой. Обеспечить постоянство температуры во время испытаний можно при использовании емкостей с теплоизоляцией для снижения теплообмена с окружающей средой.

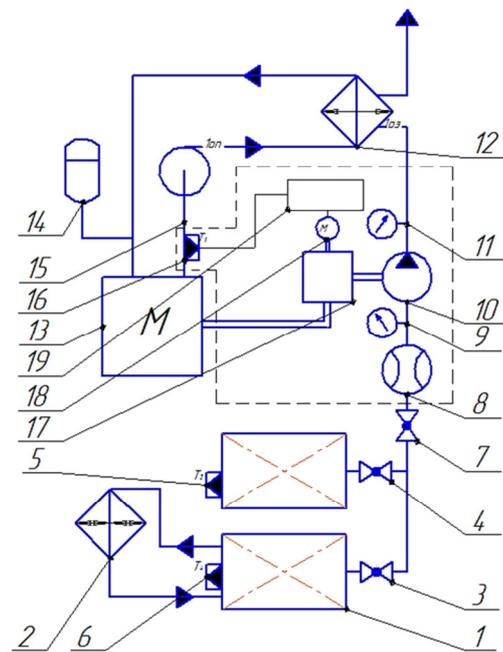


Рис. 1. Гидравлическая схема установки с энергоэффективной системой охлаждения судового двигателя:
 1 – цистерны воды внешнего контура; 2 – чиллер;
 3, 4, 7 – краны для подачи воды внешнего контура;
 5, 6 – датчики температуры воды внешнего контура в цистернах; 8 – расходомер; 9 – вакуумметр;
 10 – насос внешнего контура; 11 – манометр;
 12 – кожухотрубный водоводяной теплообменник;
 13 – двигатель (M); 14 – расширительный бак;
 15 – насос внутреннего контура;
 16 – датчик температуры внутреннего контура на выходе из двигателя; 17 – вариатор; 18 – сервомотор;
 19 – программируемое реле

Fig. 1. Hydraulic scheme of the unit with an energy-efficient marine engine cooling system:
 1 - tanks of the external circuit water; 2 - chiller;
 3, 4, 7 - taps for the water supply from the external circuit;
 5, 6 - external circuit water temperature sensors in tanks;
 8 - flow meter; 9 - vacuum gauge; 10 - external circuit water pump; 11 - manometer; 12 - shell-and-tube water-to-water heat exchanger; 13 - engine (M); 14 - expansion tank;
 15 - internal circuit water pump; 16 - outlet temperature sensor of the internal circuit; 17 - variator; 18 - servomotor;
 19 - programmable relay

Существует большой выбор подходящих для стенда термоизолированных емкостей большого объема. Главным их недостатком является большая масса, поэтому был выбран путь применения неизолированной емкости с последующей ее изоляцией. Из доступных емкостей и баков для воды без изоляции были выбраны еврокубы – кубические емкости из пластика в стальной обрешетке. Еврокубы имеют плоскую поверхность, что упрощает их теплоизоляцию.

Для изоляции котлов, емкостей и трубопроводов применяют минераловатные плиты, вспененный каучук, пенополиуретановое напыление. Более доступная теплоизоляция применяется в строительстве: минеральная вата, пеностекло, пенополи-

стирол, пенополиуретановый утеплитель, утеплитель из вспененного полиэтилена, пеноизол.

В таблице приведено сравнение коэффициента теплопроводности распространенных теплоизоляционных материалов [5].

Коэффициент теплопроводности материалов

Thermal conductivity coefficient of materials

Материал	Минеральная вата	Пенополиуретан	Пеноизол	Пенополистирол	Вспененный каучук
Коэффициент теплопроводности δ , Вт/(м·К)	0,052–0,058	0,019–0,03	0,028–0,037	0,041	0,036
Плотность ρ , кг/м ³	15–150	35–160	8–25	15–35	50–70

Вследствие широкой распространенности и низкой плотности материалом для изоляции выбран экструдированный пенополистирол. Для охлаждения работающего двигателя при проведении испытаний в течение одного часа достаточно двух цистерн. Цистерны с водой были изолированы пено-

полистироловыми плитами толщиной 100 мм. Трубопроводы, подводящие охлаждающую воду к теплообменнику, также изолированы теплоизоляцией из вспененного полиэтилена. Цистерны с изоляцией приведены на рис. 2.



Рис. 2. Цистерны для воды внешнего контура

Fig. 2. External circuit water tanks

К цистернам подключается чиллер Hailea HC-2200BH для охлаждения или нагрева воды. При проведении испытания заранее готовится вода необходимой температуры. В летний период при

температуре воздуха 35 °С в помещении вода охлаждается с 25 до 7 °С за 12 ч, а подогревается с 25 до 33 °С за 1,5 ч (рис. 3).

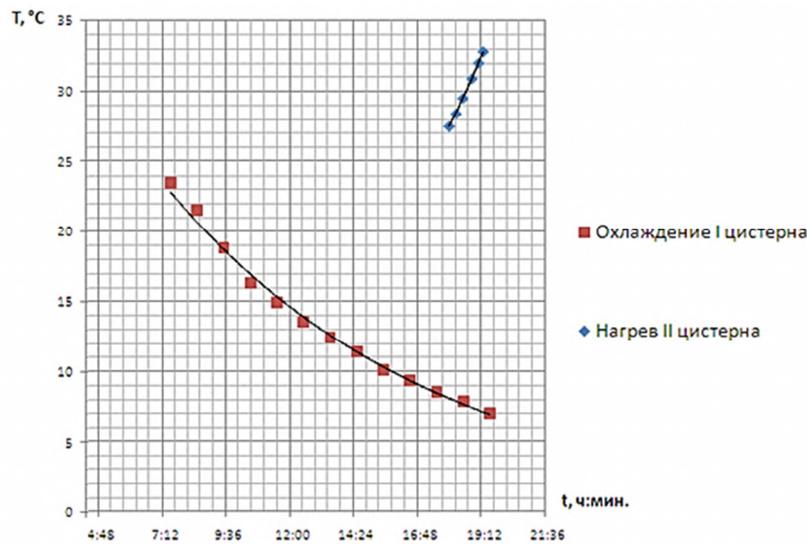


Рис. 3. Температура в цистернах при нагреве и охлаждении воды внешнего контура

Fig. 3. Temperature in tanks during heating and cooling water of the external circuit

Результаты исследований и их обсуждение

Для теплового расчета изоляции согласно СП 41-103-2000 «Проектирование тепловой изоляции оборудования и трубопроводов» используются уравнения стационарной теплопередачи через плоские и криволинейные поверхности.

Теплопередача стенки плоской теплоизоляционной конструкции рассчитывается по формуле

$$q_F = \frac{t_b - t_n}{R_{вн} + R_{ст} + R_{из} + R_n},$$

где q_F – поверхностная плотность теплового потока через плоскую теплоизоляционную конструкцию, Вт/м²; t_b – температура среды внутри изолируемого оборудования, °С; t_n – температура окружающей среды, °С; $R_{вн}$ и R_n – термическое сопротивление теплоотдаче на внутренней поверхности стенки изолируемого объекта и на наружной поверхности теплоизоляции соответственно, (м²·°С)/Вт; $R_{ст}$ и $R_{из}$ – термическое сопротивление кондуктивному переносу теплоты стенки изолируемого объекта и плоского слоя изоляции соответственно, (м²·°С)/Вт;

$$q_F = \frac{35 - 7}{\frac{1}{1595,2} + \frac{0,002}{0,22} + \frac{0,1}{0,03} + \frac{1}{29,3}} = \frac{28}{3,38} = 8,3.$$

Термические сопротивления теплоотдаче и переносу теплоты определяются по следующим формулам:

$$R_{вн} = \frac{1}{\alpha_{вн}}; \quad R_n = \frac{1}{\alpha_n};$$

$$R_{из} = \frac{\delta_{из}}{\lambda_{из}}; \quad R_{ст} = \frac{\delta_{ст}}{\lambda_{ст}},$$

где $\alpha_{вн}$, α_n – коэффициенты теплоотдачи внутренней поверхности стенки изолируемого объекта и наружной поверхности изоляции, Вт/(м²·°С); $\delta_{из}$, $\delta_{ст}$ – толщина изоляции и стенки изолируемого объекта, м; $\lambda_{из}$, $\lambda_{ст}$ – коэффициенты теплопроводности материала изоляции и стенки изолируемого объекта соответственно, Вт/(м·°С);

$$\alpha_{вн} = \frac{Nu \cdot \lambda}{L},$$

то есть $\alpha_{вн} = 696 \cdot 0,573 / 0,25 = 1\,595,2$ Вт/(м²·К).

Для ориентированной вниз холодной поверхности в горячей среде число Нуссельта при $10^4 \leq Ra \leq 10^{11}$ [6]:

$$Nu = 0,15 \cdot Ra^{1/3} = 0,15 \cdot 10^{11/3} = 696.$$

Число Рэлея можно записать как произведение чисел Грасгофа и Прандтля:

$$Ra = Gr \cdot Pr, \quad \text{т. е. } 9,04 \cdot 10^6 \cdot 11\,087 = 10^{11}.$$

Характерная длина стенки, м:

$$L = \frac{S}{P},$$

где S – площадь, м²; P – периметр, м;

$$L = \frac{1}{4} = 0,25 \text{ м.}$$

Число Грасгофа рассчитываем формуле

$$Gr = \frac{gL^3\beta(t_c - t_0)}{\nu^2},$$

где g – ускорение свободного падения, м/с^2 ; L – характерная длина стенки, м ; β – температурный коэффициент объемного расширения воды, К^{-1} ; t_c – температура поверхности теплообмена, $^{\circ}\text{C}$; t_0 – температура воды, $^{\circ}\text{C}$; ν – кинематическая вязкость воды, $\text{м}^2/\text{с}$;

$$Gr = \frac{9,81 \cdot 0,25^3 \cdot 0,68 \cdot 10^{-4} \cdot (9 - 7)}{(1,515 \cdot 10^{-6})^2} = \frac{0,208 \cdot 10^{-4}}{2,3 \cdot 10^{-12}} = 9,04 \cdot 10^6.$$

Число Прандтля:

$$Pr = \frac{\eta c_p}{\lambda},$$

где η – динамическая вязкость воды, $\text{Па}\cdot\text{с}$; c_p – удельная теплоемкость воды при постоянном давлении, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$; λ – коэффициент теплопроводности воды, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$;

$$Pr = \frac{1514 \cdot 10^{-3} \cdot 4196}{0,573} = 11087.$$

Согласно вышеуказанным выражениям произведем дальнейшие расчеты:

$$\alpha_{\text{вн}} = \frac{274 \cdot 0,0267}{0,25} = 29,3 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К});$$

$$Nu = 0,15 \cdot 2,74 \cdot 10^{6/3} = 274;$$

$$Ra = 3,19 \cdot 10^6 \cdot 0,7 = 2,74 \cdot 10^6;$$

$$Gr = \frac{9,81 \cdot 0,25^3 \cdot 0,0033 \cdot (35 - 33)}{(16 \cdot 10^{-6})^2} = \frac{10^{-3}}{256 \cdot 10^{-12}} = 3,91 \cdot 10^6;$$

Список источников

1. Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности: Федеральный закон от 23.11.2009 № 261-ФЗ. URL: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=394824> (дата обращения: 06.10.2021).
2. Приложение VI к МАРПОЛ 73/78. Правила предотвращения загрязнения атмосферы с судов. СПб.: ЦНИИМФ, 2004. 80 с.
3. Трифонов А. В., Покусаев М. Н. Анализ способов повышения энергоэффективности насосов систем охлаждения судовых двигателей // Науч. проблемы трансп. Си-

$$Pr = \frac{18,6 \cdot 10^{-6} \cdot 1005}{0,0267} = 0,7.$$

Тепловой поток, Вт, всей поверхности куба с шестью гранями:

$$Q = Sq_F, \text{ т. е. } 6 \cdot 8,3 = 49,8 \text{ Вт.}$$

При таком тепловом потоке для нагрева 1 м^3 воды на 1°C потребуется время, ч:

$$t = \frac{cm\Delta T}{Q},$$

где c – удельная теплоемкость воды, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$; m – масса воды, кг ;

$$t = \frac{4196 \cdot 1000 \cdot 1}{49,8} = 83920 \text{ с} = 23,3 \text{ ч.}$$

При испытании изоляции емкостей после прекращения охлаждения температура с 7°C увеличилась на $1,5^{\circ}\text{C}$ за сутки. Имеющееся несоответствие объясняется наличием в изоляции стыков между листами с пониженным термическим сопротивлением. При этом цель обеспечить постоянную температуру забортной воды за время проведения испытаний достигнута, полученный результат является удовлетворительным.

Заключение

Приведено описание системы охлаждения внешнего контура на экспериментальном стенде для испытания судового малоразмерного двигателя. На разработанном стенде тепловое состояние двигателя может регулироваться нагрузкой на приводном генераторе, а также за счет изменения температуры забортной воды, что расширяет его возможности по моделированию реальных процессов. Приведен расчет теплоизоляции для системы поддержания температуры забортной воды на экспериментальном стенде. Результаты расчета свидетельствуют о том, что изоляция системы охлаждения достаточна для проведения испытаний.

бири и Дальнего Востока. 2018. № 1. С. 122–126.

4. ГОСТ Р 52517-2005. Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Характеристики. Ч. 1. Стандартные исходные условия, объявление мощности, расхода топлива и смазочного масла. М.: Стандартинформ, 2006. 36 с.

5. Тихомиров А. В. Теплоизоляционные материалы и технологии: учеб. пособие. М.; Вологда: Инфра-Инженерия, 2021. 196 с.

6. Incropera F. P., DeWitt D. P. Fundamentals of Heat and Mass Transfer. N. Y.: Wiley, 2006. 493 p.

References

1. *Ob energosberezhenii i o povyshenii energeticheskoi effektivnosti: Federal'nyi zakon ot 23.11.2009 № 261-FZ* [On energy saving and energy efficiency improvement: Federal Law No. 261- FZ dated November 23, 2009]. Available at: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=394824> (accessed: 06.10.2021).
2. *Prilozhenie VI k MARPOL 73/78. Pravila predotvrashcheniia zagriazneniia atmosfery s sudov* [Annex VI to MARPOL 73/78. Rules for the Prevention of Air Pollution from Ships]. Saint-Petersburg, TsNIIMF Publ., 2004. 80 p.
3. Trifonov A. V., Pokusaev M. N. Analiz sposobov povysheniia energoeffektivnosti nasosov sistem okhlazhdeniia sudovykh dvigatelei [Analysis of ways to improve energy efficiency of pumps of ship engine cooling systems]. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka*, 2018, no. 1, pp. 122-126.
4. *GOST R 52517-2005. Dvigateli vnutrennego sgoraniia porshnevye. Kharakteristiki. Part 1. Standartnye iskhodnye usloviia, ob"iavlennie moshchnosti, raskhoda topliva i smazochnogo masla* [GOST R 52517-2005. Piston internal combustion engines. Characteristics. Part 1. Standard reference conditions, declaration of power, fuel consumption and lubricating oil]. Moscow, Standartinform Publ., 2006. 36 p.
5. Tikhomirov A. V. *Teploizoliatsionnye materialy i tekhnologii: uchebnoe posobie* [Thermal insulation materials and technologies: textbook]. Moscow; Vologda, Infra-Inzheneriia Publ., 2021. 196 p.
6. Incropera F. P., DeWitt D. P. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. New York, Wiley Publ., 2006. 493 p.

Статья поступила в редакцию 24.01.2022; одобрена после рецензирования 28.02.2022; принята к публикации 05.04.2022
The article was submitted 24.01.2022; approved after reviewing 28.02.2022; accepted for publication 05.04.2022

Информация об авторах / Information about the authors

Михаил Николаевич Покусаев — доктор технических наук, профессор; заведующий кафедрой эксплуатации водного транспорта; Астраханский государственный технический университет; pokusaev@astu.org

Mikhail N. Pokusaev — Doctor of Technical Sciences, Professor; Head of the Department of Exploitation of Water Transport; Astrakhan State Technical University; pokusaev@astu.org

Алексей Викторович Трифонов — кандидат технических наук; доцент кафедры эксплуатации водного транспорта; Астраханский государственный технический университет; trifonov91@inbox.ru

Aleksei V. Trifonov — Candidate of Technical Sciences; Assistant Professor of the Department of Exploitation of Water Transport; Astrakhan State Technical University; trifonov91@inbox.ru

Василий Александрович Костыренко — аспирант кафедры эксплуатации водного транспорта; Астраханский государственный технический университет; kostyrenkova@gmail.com

Vasiliy A. Kostyrenko — Postgraduate Student of the Department of Exploitation of Water Transport; Astrakhan State Technical University; kostyrenkova@gmail.com

