

## ОЖИДАЕМЫЙ ЭКОНОМИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ ПРИ УСТАНОВКЕ ВАРИАТОРА ДЛЯ НАСОСА СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ ГЛАВНОГО ДВИГАТЕЛЯ

*М. Н. Покусаев, А. В. Трифонов, Е. Г. Ильина*

*Астраханский государственный технический университет,  
Астрахань, Российская Федерация*

Рассматривается направление повышения энергоэффективности главных судовых двигателей, которое связано со снижением потерь мощности на привод вспомогательных механизмов. Наиболее распространенные на судах системы охлаждения с двумя контурами пресной и забортной воды имеют недостаток: потребляемая приводом насоса внешнего контура мощность не изменяется при смене температуры охлаждающей забортной воды, значительна доля отбираемой насосом мощности от эффективной мощности двигателя. Предложено техническое решение, которое позволит регулировать частоту вращения навешенного насоса и добиться снижения потребления топлива. Приведена схема вариатора в приводе насоса забортной воды двигателя 8ЧСП13/14. Между насосом и валом отбора мощности двигателя устанавливается вариатор с автоматическим управлением, который регулирует необходимую частоту вращения рабочего колеса, достаточную для нормального охлаждения двигателя. Наибольший эффект от предлагаемой модернизации будет в случае работы судна в условиях с температурой забортной воды ниже расчетной. Приведено описание разработанного в лаборатории ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет» экспериментального стенда, моделирующего систему охлаждения судового двигателя 8ЧСП13/14. Проиллюстрирован график изменения крутящего момента от времени при частоте вращения рабочего колеса 1 800 об/мин; отмечено, что механические характеристики насоса для разных режимов работы, полученные в результате экспериментальных исследований, позволяют оценить экономический эффект от снижения расхода топлива. Приведены результаты экономического расчета по установке регулируемого привода в системе охлаждения судового двигателя на примере судна «Москва-169» (астраханского пассажирского теплохода).

**Ключевые слова:** судовые конвертированные двигатели, энергоэффективность, система охлаждения, навешенные насосы, вариатор для насоса.

**Для цитирования:** Покусаев М. Н., Трифонов А. В., Ильина Е. Г. Ожидаемый экономический эффект при установке вариатора для насоса системы охлаждения главного двигателя // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2020. № 4. С. 87–94. DOI: 10.24143/2073-1574-2020-4-87-94.

### Введение

В настоящее время стратегия повышения уровня энергоэффективности является основным направлением развития в сфере водного транспорта, что подтверждается международными и национальными нормативными актами. В России основные положения этой стратегии изложены в Федеральном законе от 23.11.2009 № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации».

С 2013 г. для судовладельцев действуют обязательные требования (Приложение VI Международной конвенции МАРПОЛ 73/78) к разработке судового плана управления энергоэффективностью и снижения значений конструктивного коэффициента энергоэффективности судна каждые пять лет [1, 2]. Для выполнения данных требований судовладельцам необходимо применять на судах технологии, которые будут уменьшать выбросы парниковых газов от энергетической установки. Использование более эффективных насосов судовых систем охлаждения являются важным направлением для снижения энергозатрат. В настоящей работе будет рассмотрен вариант повышения энергоэффективности систем охлаждения с навешенными насосами забортной воды.

### Материалы исследования

Охлаждение позволяет деталям двигателя сохранять свои механические свойства для выполнения рабочих функций. Для отвода тепла от двигателя используется циркулирующая по трубопроводам системы вода. Пресная вода используется для охлаждения непосредственно деталей двигателя, в то время как забортная вода используется для охлаждения пресной воды, проходящей через теплообменник. На обеспечение работы насоса затрачивается дополнительная мощность от двигателя, каждый навешенный на двигатель агрегат вносит свою долю в повышение расхода топлива [3]. Чтобы снизить энергетические затраты на привод насосов системы охлаждения, необходимо обеспечивать их работу на режиме, при котором потребляемая от двигателя мощность минимальна [4].

В настоящее время в качестве главных двигателей для малоразмерных судов чаще применяются конвертированные автотракторные и тепловозные двигатели. Для обеспечения циркуляции забортной воды используются насосы различных конструкций. С целью удешевления конвертации на двигатели такого рода для забортной воды устанавливаются вихревые самовсасывающие насосы общехозяйственного назначения, которые обычно имеют внушительный запас по мощности. Также вихревые насосы обладают меньшим КПД, чем центробежные насосы той же производительности.

Как одно из возможных решений проблемы получили распространение замкнутые системы охлаждения, которые не имеют в своем составе насоса забортной воды. В замкнутых системах охлаждения используется естественная конвекция. Охлаждающая пресная вода циркулирует по пучку труб, установленному в кингстонном ящике. Тепло передается от трубок в забортную воду, заставляя ее подниматься из-за меньшей плотности и создавая естественную восходящую циркуляцию. Из-за отсутствия насоса забортной воды подобные системы являются более экономичными.

Электрические насосы судовых систем охлаждения для более экономичной работы подключают через частотные преобразователи, которые с помощью встроенного регулятора устанавливают необходимую частоту вращения [5–8]. Для насосов с постоянным механическим приводом от коленчатого вала судового двигателя отсутствуют технологии с подобным эффектом [9].

На автотракторных двигателях в системе охлаждения применяется привод вентилятора через вязкостную муфту. При нормальной рабочей температуре муфта вентилятора частично отключает вентилятор охлаждения радиатора двигателя с механическим приводом, обычно расположенный в передней части двигателя и приводимый в движение ремнем и шкивом, соединенными с коленчатым валом двигателя. Приведенное техническое решение экономит топливо, т. к. двигатель затрачивает меньше мощности на привод вентилятора. Если температура двигателя поднимается выше заданной температуры, вентилятор включается полностью, тем самым обеспечивая большую подачу воздуха через радиатор автомобиля.

Американская компания BorgWarner Inc. разработала регулируемый насос охлаждающей жидкости Heavy-Duty Controlled Coolant Pump (HDCCP) с электронным управлением для повышения энергоэффективности двигателей грузовых автомобилей. Данная технология обеспечивает точное и надежное управление температурой двигателя и вспомогательных механизмов. Конструкция HDCCP объединяет в себе электронную вязкостную муфту и насос пресной воды. Контроль частоты вращения крыльчатки насоса обеспечивает желаемый расход охлаждающей жидкости для повышения экономии топлива. Привод напрямую реагирует на потребности двигателя в охлаждении, что приводит к увеличению доступной мощности, повышению топливной эффективности и снижению выбросов.

По аналогии применение регулирования насосов судовой системы охлаждения позволит контролировать расход забортной воды (при использовании двух контуров охлаждения), требуемой для охлаждения работающих агрегатов. При использовании данного метода можно минимизировать энергетические потери на привод навесных насосных агрегатов.

Для уменьшения потребляемой мощности при регулировании теплового состояния судового двигателя предлагается установить вариатор с электронным регулированием (в отличие от BorgWarner Inc., которая применяет вязкостную муфту), что позволит изменять частоту вращения навешенного насоса при неизменной частоте вала двигателя.

На примере насоса забортной воды ВКС2/26 двигателя 8ЧСП13/14 (ЯМЗ-238) приведено описание установки предлагаемого устройства. Вал отбора мощности двигателя и вал насоса соединяются с вариатором. При этом необходимо установить дополнительные полумуфты для соединения вариатора и насоса (рис. 1).

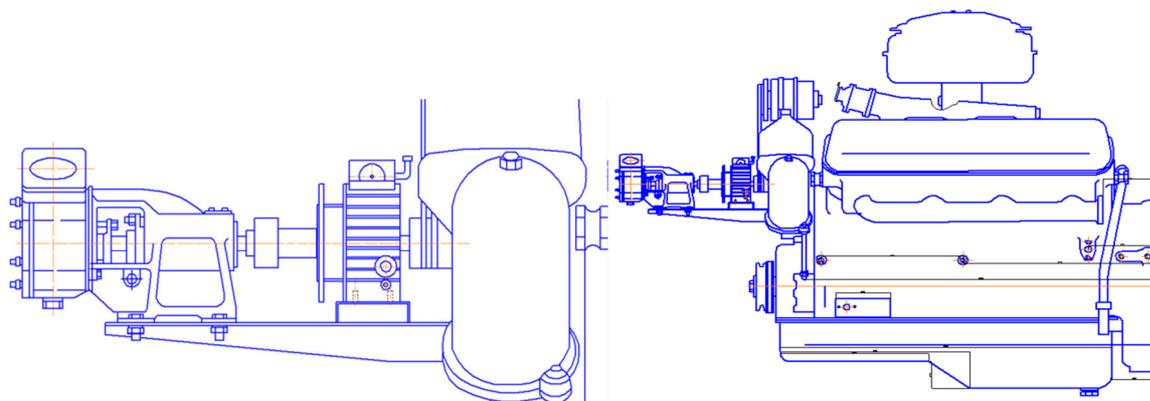


Рис. 1. Вариатор в приводе насоса забортной воды двигателя 8ЧСП13/14

Представленное техническое решение позволит регулировать частоту вращения навешенного насоса вариатором в зависимости от режима работы судового двигателя и температурных условий окружающей среды. Наибольший экономический эффект может быть достигнут, когда температура забортной воды будет иметь значение ниже расчетного, что поспособствует снижению расхода топлива.

#### Экспериментальная часть

В лаборатории ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет» (АГТУ) разработан экспериментальный стенд, который конструктивно моделирует систему охлаждения судового двигателя 8ЧСП13/14 [10]. На данном стенде установлен насос ВКС1/16 с характеристиками, подобными насосу судового конвертированного двигателя 8ЧСП13/14. Для определения мощности насоса через крутящий момент при испытаниях была использована бесконтактная система тензометрических измерений Astech Electronics.

Построены зависимости крутящего момента на валу насоса от времени. Пример записи показаний крутящего момента на валу насоса при частоте 900 об/мин представлен на рис. 2.

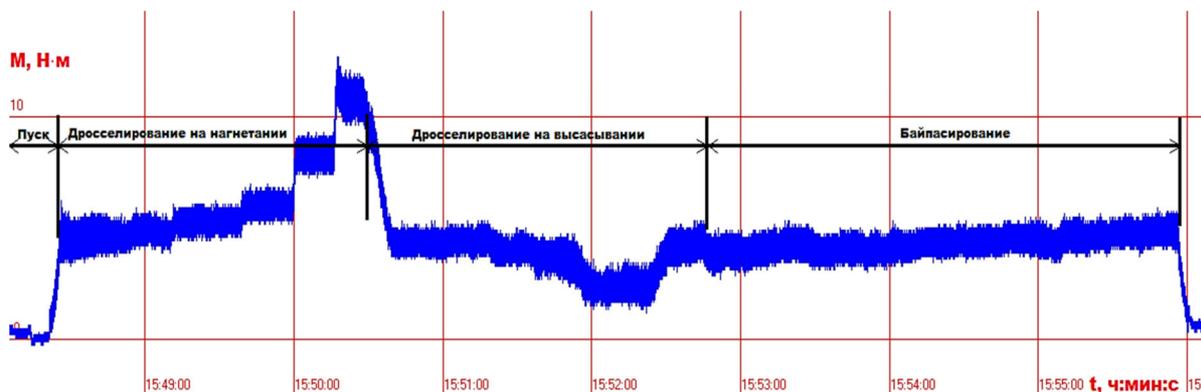


Рис. 2. График изменения крутящего момента от времени при частоте вращения рабочего колеса 1 800 об/мин

Рисунок 2 иллюстрирует повышение крутящего момента на валу при включении насоса, увеличение крутящего момента при постепенном закрытии нагнетательного крана, пиковое значение крутящего момента при полном закрытии крана [10].

Согласно полученным результатам построены механические характеристики насоса для разных режимов работы, что в дальнейшем позволило оценить экономический эффект от снижения расхода топлива.

### Результаты исследований и их обсуждение

Для примера расчета срока окупаемости предлагаемого проекта [11] по модернизации системы охлаждения установкой вариатора для навешенного насоса системы охлаждения двигателя выбрано судно «Москва-169». Астраханский пассажирский теплоход работает на следующем маршруте [12]: «Отель «Азимут» – Комсомольская Набережная – ерик Перекатный-1 – ерик Перекатный-2 – село Яманцуг».

Среднее время работы главного двигателя за 1 неделю – 32 ч. За 31 неделю время работы двигателя составляет 992 ч. Большую часть времени двигатель работает с частотой вращения ниже номинальной – 1 200 об/мин. Удельный расход топлива на этом режиме  $g_e = 0,260$  кг/(кВт·ч), а эффективная мощность  $N_e = 60$  кВт.

Так как температура забортной воды меняется в определенном диапазоне в зависимости от погоды и времени года, то изменяется и теплота, отводимая водой системы охлаждения. Для обеспечения достаточной степени отвода теплоты можно регулировать подачу насоса забортной воды изменением его частоты вращения при неизменной частоте вращения двигателя. Технически этого можно добиться, установив между двигателем и насосом забортной воды предлагаемый вариатор с электронным управлением. Работа будет обеспечивать поддержание температуры пресной воды двигателя на необходимом уровне.

При дальнейшем расчете будет использовано значение средней температуры забортной воды за рассматриваемый период. В реке Волге средняя температура забортной воды в рассматриваемый период составляет 13,2 °С. Для эффективного охлаждения двигателя при такой температуре забортной воды достаточно подачи забортной воды с расходом  $Q_3 = 2,63$  м<sup>3</sup>/ч. Вихревой насос забортной воды двигателя 6ЧСП15/18 имеет такую производительность при работе на режиме 800 об/мин.

Для нормальной работы теплообменника необходимо ограничить теплоперепад на входе и на выходе значением 15 °С, в системе управления – установить минимальное значение частоты вращения насоса 900 об/мин, при этом подача насоса – 3,28 м<sup>3</sup>/ч.

Автоматическое регулирование вариатора будет осуществляться по температуре пресной воды. Температура на выходе из двигателя будет поддерживаться постоянной. При этом в случае необходимости регулирования будет вращаться сервомотор, устанавливая маховик вариатора в нужное положение. На рис. 3 представлен внешний вид вариатора на экспериментальном стенде АГТУ.

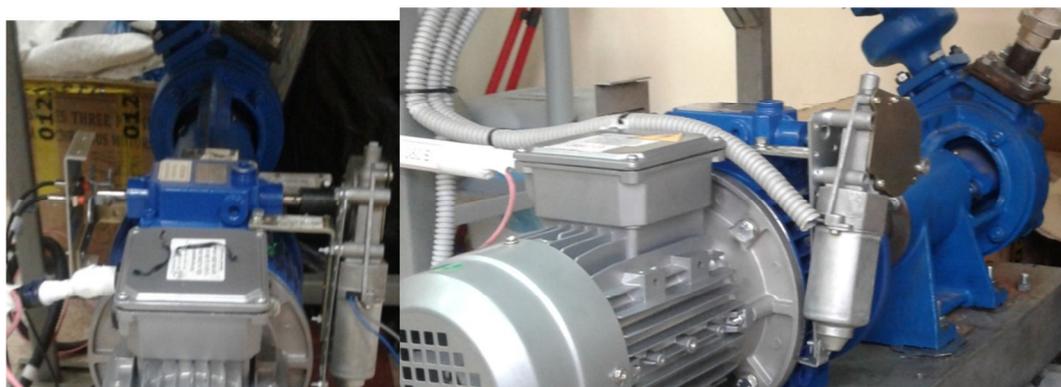


Рис. 3. Вариант установки вариатора для насоса на экспериментальном стенде

Модернизация даст эффект снижения удельного расхода топлива на 2,5 % до значения  $g_e = 0,254$  кг/(кВт·ч).

В соответствии с графиком работы судна за 1 неделю двигатель в среднем будет работать 32 ч, затраты топлива на работу:

$$H_6 = N_e g_{e1} T_x = 60 \cdot 0,26 \cdot 32 = 499 \text{ кг.}$$

В варианте с установленным вариатором насоса системы охлаждения:

$$H_m = N_e g_{e2} T_x = 60 \cdot 0,254 \cdot 32 = 488 \text{ кг.}$$

В течение 1 года судно работает 31 неделю, затраты топлива составят за этот период:

$$ГР_6 = 31 \cdot 499 = 15\,469 \text{ кг.}$$

В модернизированном варианте годовой расход топлива:

$$ГР_m = 31 \cdot 488 = 15\,128 \text{ кг.}$$

Экономия топлива:

$$\Delta ГР = 15\,469 - 15\,128 = 341 \text{ кг.}$$

Если принять цену дизельного топлива  $Ц_T = 34,4$  руб/кг, то экономия составит в денежном выражении:

$$\Delta З_T = \Delta ГР \cdot Ц_T = 341 \cdot 34,4 = 11\,730 \text{ руб.}$$

При установке оборудования для системы охлаждения с электронноуправляемым вариатором капитальные вложения  $K_{пр} = 80\,000$  руб.

Срок окупаемости модернизации двигателя:

$$CO = \frac{K_{пр}}{\Delta З_T} = \frac{80\,000}{11\,730} = 6,8 \text{ лет.}$$

Согласно результатам расчета за один сезон работы судно в модернизированном варианте экономит 0,34 т дизельного топлива. За счет экономии проект по модернизации одного двигателя может окупиться через 7 лет при эксплуатации судна в Волго-Каспийском районе на заданном маршруте.

### **Заключение**

Приведен экономический расчет по установке регулируемого привода в системе охлаждения судового двигателя на выбранном для примера судне «Москва-169». При модернизации ожидается уменьшение расхода топлива главного двигателя и снижение выбросов парниковых газов в атмосферу. Экономический расчет подтвердил целесообразность проведения модернизации по предлагаемой схеме. Представленное техническое решение рекомендуется для использования на судовых двигателях с навешенными насосами забортной воды. Для дальнейших исследований в данном направлении планируется установка вариатора для насоса системы охлаждения на реальном объекте и проведение натурных испытаний.

### *СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ*

1. *Руководство* 2012 года по разработке плана управления энергоэффективностью судна (ПУЭС). СПб.: ЗАО ЦНИИМФ, 2012. 39 с.
2. *Правила* предотвращения загрязнения атмосферы с судов: Приложение VI к МАРПОЛ 73/78 / Международная конвенция по предотвращению загрязнения с судов. СПб.: ЗАО ЦНИИМФ, 2004. 80 с.
3. *Несиоловский О. Г., Виноградов Е. А.* Тенденции развития конструкций приводов агрегатов системы охлаждения современных автотракторных ДВС // История и перспективы развития транспорта на Севере России. 2013. № 1. С. 148–153.
4. *Трифонов А. В., Покусаев М. Н.* Анализ способов повышения энергоэффективности насосов систем охлаждения судовых двигателей // Науч. проблемы трансп. Дальнего Востока и Сибири. 2018. № 1. С. 122–126.
5. *Grundfos* поможет судовладельцам экономить до полумиллиона долларов на каждом корабле. URL: <http://ru.grundfos.com/about-us/news-and-press/news/marina-economy.html> (дата обращения: 17.07.2020).

6. *Dampskibsselskabet NORDEN A/S saves energy on seawater pumps with frequency converters.* URL: <http://www.danfoss.com/NR/rdonlyres/D4FE392A-EE30-4BAB-8265-3ABBF48AA021/0/DSNordenDKDDPC206A102.pdf> (дата обращения: 17.07.2020).
7. *Drive solutions for Marine & Offshore.* URL: [http://www2.solar.dk/Download/danfoss\\_marine\\_seminar\\_2014/](http://www2.solar.dk/Download/danfoss_marine_seminar_2014/) (дата обращения: 17.07.2020).
8. *Стандартные решения «Данфосс». Экономия электроэнергии, сокращение капитальных затрат и увеличение срока службы.* URL: <http://www.privodplus.ru/files/uploads/pdf/chastotnie-preobrazovateli/Standartniye-resheniya-Danfoss.pdf> (дата обращения: 24.06.2020).
9. *Шурняк В. К.* Учет особенностей систем охлаждения при оценке энергетической эффективности судов // Науч.-техн. сб. Рос. мор. регистра судоходства. 2014. Вып. 37. С. 51–55.
10. *Трифонов А. В., Покусаев М. Н., Шахов В. В., Ковалев О. П., Булгаков В. П.* Экспериментальное определение параметров вихревых насосов судовых дизелей с использованием тензометрии. Мор. интеллектуал. технологии. 2019. № 1 (43). Т. 4. С. 83–87.
11. *Бастрыкин С. В., Обухова Н. С.* Экономическое обоснование проектирования (модернизации, реконструкции) судовых энергетических установок: учеб. пособие. Астрахань: Изд-во АГТУ, 2016. 96 с.
12. *Открылись дачные маршруты.* URL: <https://av30.ru/otkrylsja-dachnyj-marshrut/> (дата обращения: 24.06.2020).

Статья поступила в редакцию 20.07.2020

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Покусаев Михаил Николаевич** – Россия, 414056, Астрахань, Астраханский государственный технический университет; д-р техн. наук, профессор; зав. кафедрой эксплуатации водного транспорта; pokusaevmn@mail.ru.

**Трифонов Алексей Викторович** – Россия, 414056, Астрахань, Астраханский государственный технический университет; ассистент кафедры эксплуатации водного транспорта; trifonov91@inbox.ru.

**Ильина Елена Георгиевна** – Россия, 414056, Астрахань, Астраханский государственный технический университет; канд. экон. наук; доцент кафедры эксплуатации водного транспорта; ilyinaeg@mail.ru.



### EXPECTED ECONOMIC EFFECT AFTER INSTALLING VARIATOR FOR MAIN ENGINE COOLING SYSTEM PUMP

*M. N. Pokusaev, A. V. Trifonov, E. G. Ilyina*

*Astrakhan State Technical University,  
Astrakhan, Russian Federation*

**Abstract.** The article describes the process of increasing power efficiency of the ship's main engines along with reducing power losses on the drive of auxiliary mechanisms. The most common ship cooling systems with two circuits of fresh water and seawater have a disadvantage: the power consumed by the external circuit pump drive does not change when the temperature of the cooling seawater changes. The amount of energy taken from the effective power of the engine by the pump is significant. The technical solution proposed allows to regulate the speed of the mounted pump and to reduce fuel consumption. The chart of the variator in the seawater pump drive of the engine 8ChSP13/14 has been shown. The variator with automatic control is installed between the pump and the engine power take-off shaft, which helps to regulate the speed of the impeller for normal engine cooling. The maximal effect of the proposed modernization can be obtained under the ves-

sel's operation with the seawater temperature below the calculated one. The description of the experimental stand developed in the laboratory of Astrakhan State Technical University, which is simulating the cooling system of the marine engine 8ChSP13 / 14, has been given. The graph of the change in torque versus time is illustrated at the impeller speed of 1 800 rpm. It has been stated that the mechanical characteristics of the pump for different operating modes obtained as a result of experimental studies allow to assess the economic effect from reducing fuel consumption. The results of economic design of installing a variable speed drive in the cooling system of a marine engine are presented as a case study of the vessel Moscow-169 (Astrakhan passenger motor ship).

**Key words:** marine converted engines, energy efficiency, cooling system, mounted pumps, pump variator.

**For citation:** Pokusaev M. N., Trifonov A. V., Ilyina E. G. Expected economic effect after installing variator for main engine cooling system pump. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies*. 2020;4:87-94. (In Russ.) DOI: 10.24143/2073-1574-2020-4-87-94.

#### REFERENCES

1. *Rukovodstvo 2012 goda po razrabotke plana upravleniia energoeffektivnost'iu sudna (PUES)* [Guide 2012 to developing ship energy efficiency management plan (SEEMP)]. Saint-Petersburg, ZAO TsNIIMF, 2012. 39 p.
2. *Pravila predotvrashcheniia zagriazneniia atmosfery s sudov: Prilozhenie VI k MARPOL 73/78* [Regulations for the Prevention of Air Pollution from Ships: Annex VI to MARPOL 73/78]. Mezhdunarodnaia konventsia po predotvrashcheniiu zagriazneniia s sudov. Saint-Petersburg, ZAO TsNIIMF, 2004. 80 p.
3. Nesiolovskii O. G., Vinogradov E. A. Tendentsii razvitiia konstruksii privodov agregatov sistemy okhlazhdeniia sovremennykh avtotraktornykh DVS [Trends in development of drive designs of cooling system units in modern automotive ICEs]. *Istoriia i perspektivy razvitiia transporta na Severe Rossii*, 2013, no. 1, pp. 148-153.
4. Trifonov A. V., Pokusaev M. N. Analiz sposobov povysheniia energoeffektivnosti nasosov sistem okhlazhdeniia sudovykh dvigatelei [Analysis of methods of improving power efficiency of pumps in cooling systems of ship engines]. *Nauchnye problemy transporta Dal'nego Vostoka i Sibiri*, 2018, no. 1, pp. 122-126.
5. *Grundfos pomozhet sudovadel'tsam ekonomit' do polumilliona dollarov na kazhdom korable* [Grundfos helps shipowners save up to half a million dollars per ship]. Available at: <http://ru.grundfos.com/about-us/news-and-press/news/marina-economy.html> (accessed: 17.07.2020).
6. *Dampskibsselskabet NORDEN A/S saves energy on seawater pumps with frequency converters*. Available at: <http://www.danfoss.com/NR/rdonlyres/D4FE392A-EE30-4BAB-8265-3ABBF48AA021/0/DSNordenDKDDPC206A102.pdf> (accessed: 17.07.2020).
7. *Drive solutions for Marine & Offshore*. Available at: [http://www2.solar.dk/Download/danfoss\\_marine\\_seminar\\_2014/](http://www2.solar.dk/Download/danfoss_marine_seminar_2014/) (accessed: 17.07.2020).
8. *Standartnye resheniia «Danfoss». Ekonomiiia elektroenergii, sokrashchenie kapital'nykh zatrat i uvelichenie sroka sluzhby* [Danfoss standard solutions. Energy saving, capital costs reducing and service life extension]. Available at: <http://www.privodplus.ru/files/uploads/pdf/chastotnie-preobrazovateli/Standartniye-resheniya-Danfoss.pdf> (accessed: 24.06.2020).
9. Shurpiak V. K. Uchet osobennostei sistem okhlazhdeniia pri otsenke energeticheskoi effektivnosti sudov [Taking into account special features of cooling systems when assessing ship power efficiency]. *Nauchno-tekhnicheskii sbornik Rossiiskogo morskogo registra sudokhodstva*, 2014, iss. 37, pp. 51-55.
10. Trifonov A. V., Pokusaev M. N., Shakhov V. V., Kovalev O. P., Bulgakov V. P. Eksperimental'noe opredelenie parametrov vikhrevykh nasosov sudovykh dizelei s ispol'zovaniem tenzometrii [Experimental defining parameters of vortex pumps of marine diesel engines by using tensometry]. *Morskie intellektual'nye tekhnologii*, 2019, no. 1 (43), vol. 4, pp. 83-87.
11. Bastrykin S. V., Obukhova N. S. *Ekonomicheskoe obosnovanie proektirovaniia (modernizatsii, rekonstruksii) sudovykh energeticheskikh ustanovok: uchebnoe posobie* [Economic justification for designing (modernization, reconstruction) ship power plants: tutorial]. Astrakhan', Izd-vo AGTU, 2016. 96 p.
12. *Otkrylis' dachnye marshruty* [Summer cottage routes have opened]. Available at: <https://av30.ru/otkrylsja-dachnyj-marshrut/> (accessed: 24.06.2020).

The article submitted to the editors 20.07.2020

**INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

***Pokusaev Mikhail Nikolaevich*** – Russia, 414056, Astrakhan; Astrakhan State Technical University; Doctor of Technical Sciences, Professor; Head of the Department of Water Transport Operation; pokusaevmn@mail.ru.

***Trifonov Alexei Viktorovich*** – Russia, 414056, Astrakhan; Astrakhan State Technical University; Assistant of the Department of Water Transport Operation; trifonov91@inbox.ru.

***Ilyina Elena Georgievna*** – Russia, 414056, Astrakhan; Astrakhan State Technical University; Candidate of Economics; Assistant Professor of the Department of Water Transport Operation; ilyinaeg@mail.ru.

