

## Судовые энергетические установки и их элементы (главные и вспомогательные)

Научная статья

УДК 629.124.9.039.001.63

<https://doi.org/10.24866/2227-6858/2023-4/93-100>

Кучеров В.Н., Огай С.А., Соболенко А.Н., Г.Б. Горелик

КУЧЕРОВ ВЛАДИМИР НИКАНОРОВИЧ – к.т.н., доцент, migvladd@bk.ru

ОГАЙ СЕРГЕЙ АЛЕКСЕЕВИЧ – д.т.н., доцент, ogay@msun.ru

СОБОЛЕНКО АНАТОЛИЙ НИКОЛАЕВИЧ – д.т.н., профессор, sobolenko\_a@mail.ru

ГОРЕЛИК ГЕННАДИЙ БЕНЦИАНОВИЧ – д.т.н., профессор, старший научный сотрудник; ggorelik@mail.ru

Морской государственный университет имени адм. Г.И. Невельского

Владивосток, Россия

## Изменение пропульсивных характеристик транспортных судов в процессе эксплуатации

**Аннотация.** В статье приводится анализ результатов натурных замеров гидродинамических характеристик судна, с главной машины – дизелей фирмы MAN B&W LMC 50, проводимых в реальных условиях эксплуатации в районах плавания с высокой интенсивностью обрастания корпуса (моря Юго-Восточной Азии). Для сравнения приведены результаты изменения средней нагрузки на двигатель 5<sup>RD68</sup> транспортного рефрижератора в условиях эксплуатации в районах плавания с нормальной интенсивностью обрастания. Выполненные замеры сохраняют актуальность, так как позволяют подтвердить применяемые методики оценки пропульсивных качеств судна в эксплуатации. Показана существенная разница в приросте потребной мощности главного двигателя при разных условиях плавания.

Полученные результаты могут быть применены для приближенных оценок влияния пропульсивных характеристик судна на теплонапряженное состояние судовых главных энергетических установок и при назначении мощности полного хода.

**Ключевые слова:** пропульсивные качества, буксировочная мощность, шероховатость, теплонапряженность двигателей внутреннего сгорания, цилиндропоршневая группа

**Для цитирования:** Кучеров В.Н., Огай С.А., Соболенко А.Н., Горелик Г.Б. Изменение пропульсивных характеристик транспортных судов в процессе эксплуатации // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2023. № 4(57). С. 93–100.

### Введение

Стратегией развития судостроительной промышленности на период до 2035 г. определены амбициозные планы по строительству грузовых судов [2]. Обострившаяся проблема технологической независимости при строительстве грузовых судов во многом определяется развитием отечественного двигателестроения. В этой связи очень важен опыт испытаний пропульсивных качеств судов и вырабатываемой мощности главных дизелей производителей – мировых лидеров, в частности компании MAN-B&W, полученный при эксплуатации серии танкеров типа «Академик Векуа».

Дизели LMC различных модификаций и размерностей получили широкое распространение на судах морского флота. Указанные дизели нового поколения относятся к разряду современных длинноходовых, форсированных, экономичных машин.

Оценка влияния различных факторов на тепловую напряженность двигателя по рабочему состоянию поршневого комплекта усложняется тем, что в науке о диагностике теплового состояния цилиндровой втулки, а, по сути, всех элементов ЦПГ следует рассматривать температуры деталей как сумму эталонных значений и параметра состояния [5, 3]. За эталонные при заданной нагрузке следует принимать их стендовые значения.

Параметр состояния будет зависеть от совершенства рабочего процесса, а для элементов трения в определяющей степени добавляется составляющая от износов, геометрии сопрягаемых деталей и качества уплотнения в паре трения в данный момент, а также положения замков поршневых колец относительно точки измерения. По этим причинам температура цилиндровой втулки имеет случайный характер и большой разброс показаний – коэффициента вариации относительно среднего значения.

Большое влияние на тепловую напряженность и работоспособность поршневой группы оказывают изменения параметров гидродинамического комплекса винт–корпус. Обрастание корпуса судна и гребного винта, бухтины, вмятины, рост шероховатости поверхностей корпуса и рулевого устройства приводят к увеличению сопротивления движению судна и соответственно росту потребной мощности главного двигателя для обеспечения ранее установленной скорости хода.

В силу воздействия многих факторов на тепловое состояние деталей дизеля выделить «в чистом виде» составляющие от гидродинамических параметров судна не представляется возможным. В этой связи для получения прикладных зависимостей, позволяющих оценивать влияние изменений пропульсивных качеств судна на теплонапряженность двигателя, интерес представляют параллельные замеры характеристик мощности и ходовых характеристик в условиях реальных плаваний судна.

### **Условия работы пропульсивного комплекса и методики замеров**

Приморским морским пароходством были выполнены исследования на танкерах «Капитан Коротаев» и «Капитан Руднев» со свежеокрашенным корпусом и новой энергетической установкой сразу после ввода их в эксплуатацию после постройки на верфи г. Пула в Югославии

Главные двигатели исследуемых судов «ULYANICMAN\_B&W» 5L50MC имеют номинальную мощность 5700 кВт при частоте вращения 133 мин<sup>-1</sup>.

Заданная длительная эксплуатационная мощность равна 4689 эффективных кВт, или 82,3% от номинального значения. Соответствующая ей индикаторная мощность с учетом механического КПД может составлять около  $P_{ib} = 5300$  кВт. Дизель работает на винт регулируемого шага (ВРШ) по нагрузочной характеристике при номинальной частоте вращения с валогенератором либо по комбинаторной программе с  $n = var$ .

Силовая установка имеет степень автоматизации А1 для безвахтенного использования. Все основные параметры контролируются стрелочными приборами и одновременно электронной системой, которая представляет их в цифровом виде с акцентом на выход за уставку с передачей сигнала вахтенному, а затем старшему механику и воздействием на нагрузку главного двигателя (ГД) через ВРШ. Диагностическая система позволяет индицировать двигатель и получать необходимые параметры рабочего процесса в цилиндрах и индикаторную мощность двигателя.

Эффективная мощность на гребном валу определяется датчиками по углу закручивания и передается совместно с рассчитанным крутящим моментом, эффективной мощностью и частотой вращения на центральный пульт управления (ЦПУ) системой «Brolihe». Далее за вычетом нагрузки на валогенератор можно получить мощность, которая передается на гребной вал и винт.

Первый этап исследований выполнялся на танкере «Капитан Коротаев». По существующим нормам и правилам периодическое докование судов производится через два года. К моменту замеров танкер «Капитан Коротаев» отработал с постройки и без докования 2 года и 8 месяцев. За этот период заметного увеличения шероховатости поверхностей корпуса из-за коррозии не отмечалось. Имелось незначительное обрастание винта ракушками. В процессе

последующего докования в Сингапуре корпус был окрашен самополирующей и антиобрастающей краской, гребной винт отшлифован.

Далее из-за крупной аварии двигателя дизель-генератора судно простояло в тропических водах Сингапура около месяца. При этом было замечено интенсивное обрастание винта ракушками. После завершения ремонта вспомогательного двигателя, судно работало на линии Сингапур-Бангкок, где продолжились исследования гидродинамических характеристик судна. Длительная стоянка в тропических водах свежеокрашенного судна с отполированным винтом, как показали измерения, привела к увеличению сопротивления и снижению эффективности гребного винта большему, чем от более двухгодичного плавания до докования.



**Рис. 1. Замеры скоростей т/х «Капитан Каратаев» при соответствующих мощностях: на сдаточных ходовых испытаниях; перед первым докованием; после докования и вынужденного простоя с интенсивным обрастанием ракушками винта и корпуса судна**

Результаты замеров скоростей судна при соответствующих мощностях на гребном валу пропульсивного комплекса на сдаточных ходовых испытаниях танкера «Капитан Каратаев»; на ходу перед докованием; на ходу в тропических рейсах с обросшим винтом при аналогичных осадках судна позволили сравнить скорости при значении мощности примерно в одной области – около 3500 кВт. Согласно измерениям, потеря скорости судна при одинаковой мощности на гребном валу спустя междуковый период в 2 года и 8 месяцев, составила в среднем 1,0 узел. После докования до последующего вынужденного простоя, который привел к интенсивному обрастанию ракушками винта и корпуса, потеря скорости составила в среднем 1,5 узла.

Параллельно с замерами пропульсивных характеристик на т/х «Капитан Каратаев» были проведены углубленные комплексные исследования параметров рабочего процесса и теплового состояния цилиндрических втулок. Аналогичный комплекс исследований как пропульсивных характеристик, так и теплонапряженности ЦПГ был выполнен на т/х «Капитан Руднев», где после наработки 16 700 часов также не наблюдались срывы в работе ЦПГ, что в итоге позволило провести сравнительный анализ показателей гидромеханического комплекса этих танкеров одной серии, проходивших ходовые испытания с разрывом всего в 5 месяцев (рис. 2).

В ходе испытаний одновременно фиксировались параметры гидромеханического комплекса для оценки изменения энергетических и скоростных показателей в междуковый период. Танкер «Капитан Руднев» от постройки до первого докования отработал 1 год и 8 месяцев, а к моменту испытаний после первого докования – еще 1 год и 7 месяцев.

Сделанные замеры, как и для т/х «Капитан Каратаев», позволили сравнить скорости при значении мощности примерно в той же области – около 3500 кВт. Как следует из рис. 2, потеря скорости в среднем не превышает 0,6–0,7 узла, то есть после первого докования остаточная потеря скорости за счет повышения гидродинамического сопротивления движению судна оказалась незначительной.



**Рис. 2. Замеры скоростей т/х «Капитан Руднев» при соответствующих мощностях: на сдаточных ходовых испытаниях; спустя 1 год и 7 месяцев после первого докования**

Гидродинамические параметры винта с регулируемым шагом исследовались в режимах нагрузочных характеристик при постоянных числах оборотов  $n = \text{const}$ . Указанные танкеры принадлежат серии судов типа «Академик Векуа» дедвейтом 14826 т при осадке 8,5 м, и 16200 т при осадке 9,0 м, имеют паспортную скорость хода 15,06 узлов; главные размерения: длина между перпендикулярами  $L = 141,5$  м, ширина  $B = 22,4$  м, осадка 8,5/9,0 м, водоизмещение  $\Delta = 20599$  т при средней осадке 8,5 м.

### Характеристики пропульсивного комплекса

Исходными данными для анализа характеристик пропульсивных комплексов двух исследуемых судов одной серии и прошедших сдаточные ходовые испытания с временной дистанцией всего в 5 месяцев были замеры индикаторной мощности, геометрических характеристик винта и достигаемой скорости хода.

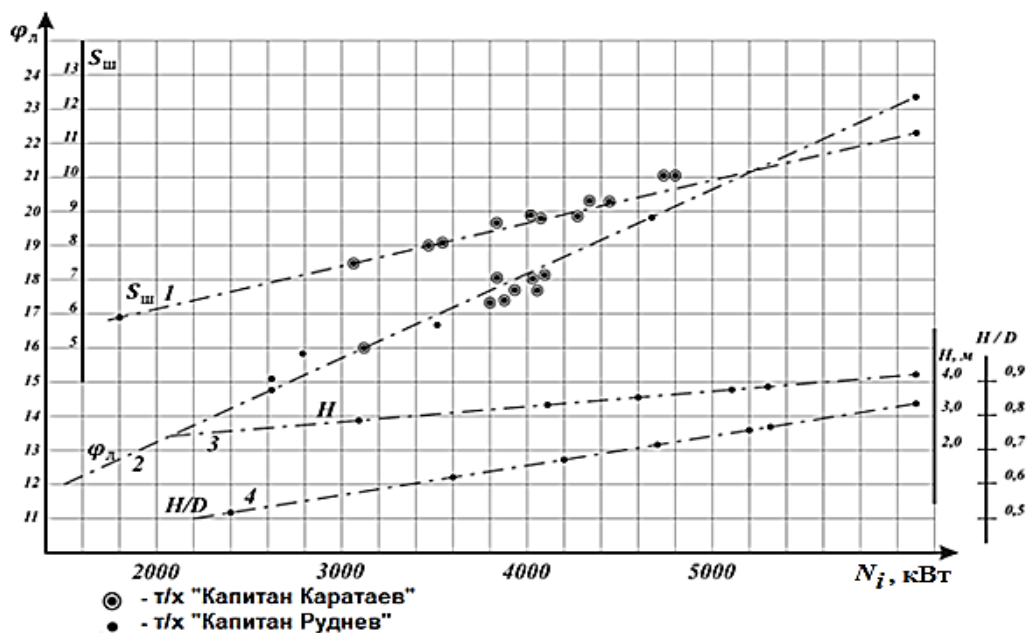
Значения указателя шага винта, которому соответствовали определенные значения угла разворота лопастей, шаг и шаговое отношение при снимаемых значениях индикаторной мощности главного двигателя для т/х «Капитан Коротаяев и т/х «Капитан Руднев» во время сдаточных испытаний представлены на рис. 3.

Полученные замеры геометрических характеристик винта: шаг  $H$ , шаговое отношение  $H/D$ , угол разворота лопастей  $\varphi_{\text{л}}$  и указатель шага винта  $S_{\text{ш}}$  находятся практически в линейной зависимости от индикаторной мощности.

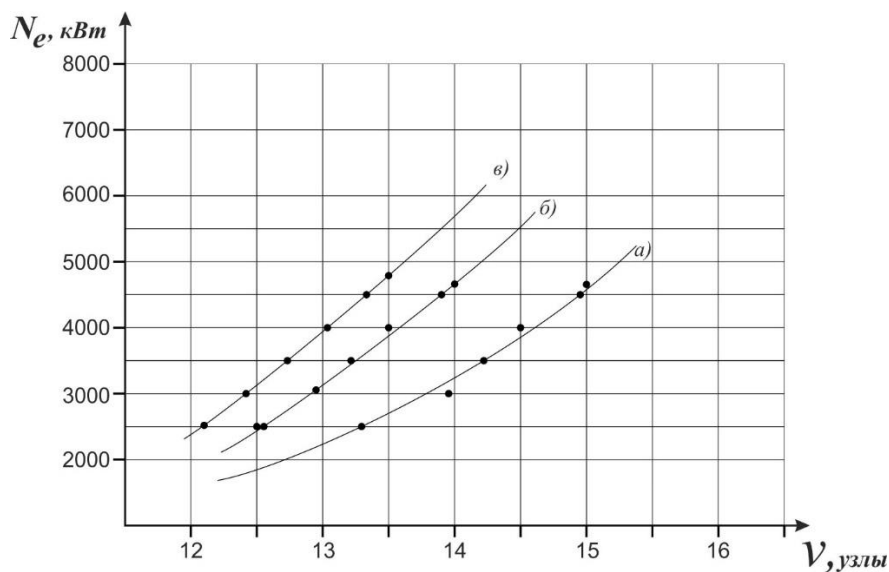
Четырехлопастной винт имеет диаметр  $D = 4,9$  м. Для номинального режима нагружения двигателя  $N_{\text{ср}} = 4,038$  м,  $H/D = 0,824$  и  $\varphi_i = 23,2^\circ$ .

По условиям работы на валу главного двигателя валогенератора предпочтительными режимами являются режимы работы с постоянной частотой вращения  $n = 133 \text{ мин}^{-1} = 2,22 \text{ с}^{-1}$ . Такому режиму работы главного двигателя соответствует указатель шага винта  $S_{\text{ш}} = 11,0$ , соответствующее ему значение номинальной мощности  $N_e = 5700$  кВт при частоте вращения  $n = 133 \text{ мин}^{-1}$ .

Эффективная мощность, крутящий момент, частота вращения, нагрузка валогенератора замерялись с использованием системы «Brolife». В результате получены регрессионные зависимости эффективной мощности от скорости хода для т/х «Капитан Каратаев» для трех эксплуатационных условий работы судна: для судна на сдаточных ходовых испытаниях со свежескрашенным корпусом; после 2 лет и 8 месяцев эксплуатации в морях Юго-Восточной Азии до докового ремонта; после докового ремонта и вынужденного длительного простоя в морях Юго-Восточной Азии с наблюдаемым интенсивным обрастанием корпуса и винта (рис. 4).



**Рис. 3. Зависимость геометрических характеристик винта от индикаторной мощности:**  
 1 – указатель шага винта  $S_w$ ; 2 – угол разворота лопасти винта  $\varphi_n$ ; 3 – шаг винта  $H$ ;  
 4 – шаговое отношение  $H/D$

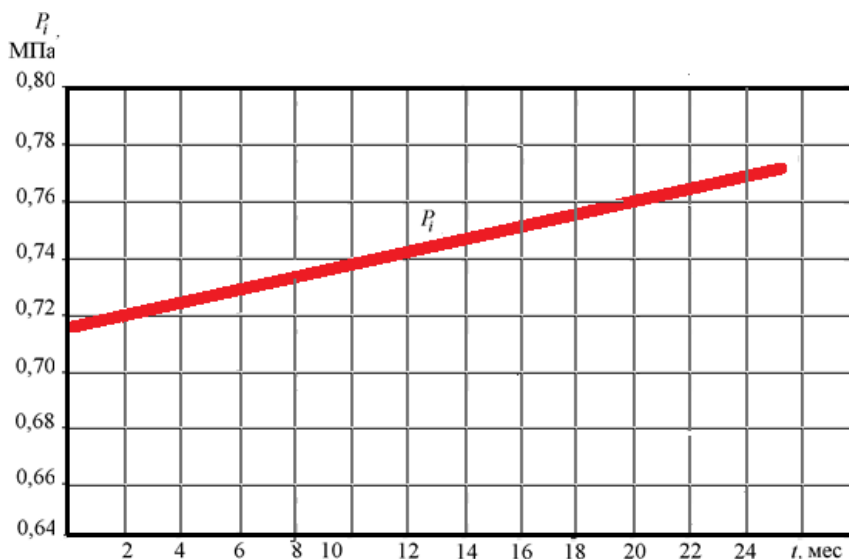


**Рис. 4. Зависимость эффективной мощности от скорости хода т/х «Капитан Каратаев»:**  
 а – по результатам сдаточных ходовых испытаний; б – после 2 лет и 8 месяцев эксплуатации до докового ремонта; в – после докового ремонта и вынужденного длительного простоя с наблюдаемым интенсивным обрастанием корпуса и винта

Полученные зависимости подтверждают параболический характер влияния скорости на эффективную мощность и существенный рост потребной мощности для достижения одинаковой скорости при сохранении оборотов главного двигателя, но для корпуса и винта подвергшимся обрастанию, особенно в случае интенсивного обрастания винта.

В отличие от рассмотренной серии танкеров типа «Академик Векуа» суда типа «Тарханск» эксплуатировались в районах плавания северо-восточной части Тихого океана с невысокой интенсивностью обрастания корпуса и занимались доставкой рыбопродукции в порт Владивосток из районов Берингового и Охотского морей. Транспортные рефрижераторы типа «Тарханск» имеют один главный малооборотный двигатель 5RD68 мощностью  $N_e = 4486$  кВт, работающий на винт фиксированного шага. Индицирование двигателя осуществлялось штатным

прибором типа «Майгак» регулярно один раз в две недели и фиксировалось в журнале тепло-технического контроля. Было набрано большое количество статистического материала (всего 10 судов) за несколько лет эксплуатации [7] (рис. 5).



**Рис. 5. Расчетная модель для определения среднего индикаторного давления  $P_i$**

Из рис. 5 следует, что 2 года междоковой эксплуатации приводят к повышению мощности на 7 %, тогда как для судов, работавших в районах плавания с высокой интенсивностью обрастания корпуса этот показатель составляет 26 % (см. рис. 4).

### Заключение

Выполненные замеры скоростей хода и индикаторной мощности при различных состояниях шероховатости корпуса исследуемых судов дали количественные оценки роста мощности для достижения соответствующих скоростей хода, что позволяет прогнозировать возрастание нагрузки на главную машину в реальных эксплуатационных условиях. Видимый существенный рост потребной мощности главного двигателя, который необходимо обеспечить для поддержания высоких скоростей хода (приблизненных к паспортным значениям), естественным образом приводит к повышению теплонапряженности деталей ЦПГ.

При работе судов в морях с высокой интенсивностью обрастания корпуса и гребного винта необходимо чаще производить корректировку номинальной мощности при назначении режима полного хода транспортного судна.

Ограничение нагрузки на главный двигатель может быть достигнуто для судов с винтом фиксированного шага снижением оборотов [1], для судов с ВРШ – уменьшением шага ВРШ на переходах.

Заявленный вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Братко В.А., Соболенко А.Н. Снижение энергонапряженности главных двигателей т/х типа «Тарханск» // Экспресс-информация. Серия: Эксплуатация флота рыбной промышленности. 1989. Вып 9. С. 13–18.
2. Стратегия развития судостроительной промышленности на период до 2035 года: Распоряжение Правительства Российской Федерации от 28 окт. 2019 г. № 2553-р.
3. Кучеров В.Н. Повышение надежности дизеля посредством диагностирования технического состояния элементов ЦПГ // Вестник Морского государственного университета. 2009. Вып. 31. С. 75–81.



4. Кучеров В.Н. Особенности рабочего процесса, эксплуатация и ресурсные возможности дизель-генераторов альтернативного типа // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2018. № 4. С. 59–65.
5. Кучеров В.Н. Рабочие режимы и ресурсные показатели дизелей 9L28/32A-F фирмы MAN-B&W в процессе эксплуатации // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2020. № 1. С. 94–105.
6. Пустошный А.С., Сверчков А.В., Шевцов С.В. Влияние шероховатости поверхности гребного винта на его пропульсивные характеристики // Труды Крыловского государственного научного центра. 2019. № 1(390). С. 11–26.
7. Соболенко А.Н. Обеспечение безопасной эксплуатации главных судовых дизелей: автореф. дис. д-ра техн. наук. Владивосток, 2002. 32 с.

FEFU: SCHOOL of ENGINEERING BULLETIN. 2023. N 4/57

*Ship power plants and their elements (main and auxiliary)*

[www.dvfu.ru/en/vestnikis](http://www.dvfu.ru/en/vestnikis)

Original article

<https://doi.org/10.24866/2227-6858/2023-4/93-100>

**Kucherov V.**, Ogay S., Sobolenko A., Gorelik G.

**VLADIMIR N. KUCHEROV**, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, [migvladd@bk.ru](mailto:migvladd@bk.ru)

**SERGEY A. OGAY**, Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor, [ogay@msun.ru](mailto:ogay@msun.ru)

**ANATOLIY N. SOBOLENKO**, Doctor of Engineering Sciences, Professor, [sobolenko\\_a@mail.ru](mailto:sobolenko_a@mail.ru)

**GENNADY B. GORELIK**, Doctor of Engineering Sciences, Professor, [ggorelik@mail.ru](mailto:ggorelik@mail.ru)  
*Maritime State University named after adm. G.I. Nevelskoy*  
 Vladivostok, Russia

## Changes in the propulsion characteristics of transport vessels during operation

**Abstract.** The article provides an analysis of the results of full-scale measurements of the hydrodynamic characteristics of the vessel, from the main engine – MAN B&W LMC 50 diesel engines, carried out under real operating conditions in navigation areas with a high intensity of hull fouling (the seas of Southeast Asia). For comparison, the results of changes in the average load on the 5RD68 transport refrigerator engine under operating conditions in navigation areas with normal fouling intensity are presented. The uniqueness of the measurements carried out maintains their relevance, as it allows us to confirm the applied methods for assessing the propulsion qualities of the vessel in operation. A significant difference in the increase in the required power of the main engine under different sailing conditions is shown.

The results obtained can be used for approximate estimates of the influence of the ship's propulsion characteristics on the thermally stressed state of the ship's main power plants and when assigning full speed power.

**Keywords:** propulsive qualities, towing power, roughness, thermal stress of internal combustion engines, cylinder piston group

**For citation:** **Kucherov V.**, Ogay S., Sobolenko A., Gorelik G. Changes in the propulsion characteristics of transport vessels during operation. *FEFU: School of Engineering Bulletin*. 2023;(4):93–100. (In Russ.).

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflict of interests.

## REFERENCES

1. Bratko V.A., Sobolenko A.N. Reducing the energy intensity of the main engines of m/v type "Tarkhansk". *Express information. Series: Operation of the fishing industry fleet*. 1989;(9):13–18. (In Russ.).

2. Strategy for the development of the shipbuilding industry for the period until 2035. Order of the Government of the Russian Federation dated October 28. 2019. No. 2553-р. (In Russ.).
3. Kucherov B.H. Increasing diesel reliability by diagnosing the technical condition of CPG elements. *Bulletin of the Maritime State University*. 2009;31:75–81. (In Russ.).
4. Kucherov V.N. Features of the work process, operation and resource capabilities of alternative type diesel generators. *Bulletin of the Astrakhan State Technical University. Series: Marine engineering and technology*. 2018;(4):59–65. (In Russ.).
5. Kucherov V.N. Operating modes and resource indicators of 9L28/32A-F diesel engines from MAN-B&W during operation. *Bulletin of the Astrakhan State Technical University. Series: Marine engineering and technology*. 2020;(1):94–105. (In Russ.).
6. Pustoshny A.S., Sverchkov A.V., Shevtsov S.V. The influence of the propeller surface roughness on its propulsion characteristics. *Proceedings of the Krylov State Scientific Center*. 2019;(1):11–26. (In Russ.).
7. Sobolenko A.N. Ensuring the safe operation of main marine diesel engines. Abstract of Doctor's degree dissertation. Vladivostok, 2002, 32 p. (In Russ.).