

АНАЛИЗ ПРИЧИН ПОВРЕЖДЕНИЙ И ОТКАЗОВ СУДОВЫХ ВАЛОПРОВОДОВ

Г. А. Кушнер, В. А. Мамонтов, Д. А. Волков

*Астраханский государственный технический университет,
Астрахань, Российская Федерация*

Большинство судов российского флота оснащены судовым валопроводом, отказ работы которого влечет за собой существенные экономические потери. Исследованию причин повреждений и отказов судовых валопроводов посвящено большое количество как отечественных, так и зарубежных работ. Сложность сбора, систематизации и анализа статистических данных о поломках и повреждениях валопроводов заключается в том, что данные относятся к разным периодам времени, различным периодам эксплуатации и типам судов, а также содержатся в различных источниках. Предложен подход к систематизации современных статистических данных о повреждениях и отказах элементов судовых валопроводов, собранных на основе дефектно-технологических ведомостей астраханских судоремонтных заводов и информации из других источников. Приведены сведения о поломках судов и их элементов, о поломках судовых валопроводов на судах в период с 2010 по 2019 г. согласно Российскому речному регистру. Проведен анализ аварийности на судах класса Российского морского регистра судоходства. Установлены места возникновения и характер трещин гребных валов, позволяющий оценить величину разрушающих нагрузок, а также реальные запасы прочности. Приведена общая классификация расположения трещин гребных валов в порядке частоты их возникновения. Представлены результаты анализа дефектно-технологических ведомостей, позволяющие установить причины отказов судового валопровода, приведших к аварийному ремонту, и наиболее распространенные дефекты, выявленные в ходе планового докового ремонта судов. Оценено влияние диаметра гребных валов на характер и размер дефектов, частоту их проявления. Согласно результатам анализа предложено несколько направлений мероприятий по уменьшению количества аварий валопроводов проектируемых судов, обозначены наиболее перспективные направления для совершенствования уже разработанных конструкций валопроводов в эксплуатации. Результаты анализа являются дополнением к проводимым исследовательским и опытно-конструкторским работам по повышению надежности судовых энергетических комплексов.

Ключевые слова: судовый валопровод, статистика повреждений, гребной вал, дейдвудное устройство, дефекты.

Для цитирования: Кушнер Г. А., Мамонтов В. А., Волков Д. А. Анализ причин повреждений и отказов судовых валопроводов // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2021. № 3. С. 33–39. DOI: 10.24143/2073-1574-2021-3-33-39.

Введение

Валопровод является одним из ответственных элементов судовой энергетической установки, отказ которого в процессе эксплуатации может привести к серьезным экономическим потерям. Согласно данным Российского морского регистра судоходства, в 2020 г. общее число транспортных, обеспечивающих, рыбопромысловых и научно-исследовательских судов под флагом России составляло более 3 500 единиц. На классификационном учете Российского речного регистра состоит более 24 000 судов, существенная часть которых оснащена судовым валопроводом.

Одной из задач современного судостроения является повышение надежности эксплуатации судовых энергетических комплексов. Решение задачи подразумевает совершенствование существующих конструкций валопроводов и разработку новых конструктивных исполнений. Анализ статистических данных и результатов публикаций последних лет, в том числе в зарубежных журналах, необходим для определения направлений исследований и методов повышения эксплуатационной надежности валопроводов.

Определенную сложность представляют собой задачи сбора, систематизации и анализа статистических данных о поломках и повреждениях валопроводов, сведения о которых относятся к разным периодам времени, эксплуатации, типам судов и содержатся в различных источниках. В большинстве статистических данных указано о наличии трещин гребных валов, но не приведены сведения о причинах и местах их образования [1].

В настоящей работе представлена систематизация современных статистических данных о повреждениях и отказах элементов судовых валопроводов, собранных на основе дефектно-технологических ведомостей астраханских судоремонтных заводов и информации из других источников.

Анализ аварийности на судах

Актуальные статистические данные о поломках судов и их элементов, а также о поломках судовых валопроводов на судах с классом РРР в период с 2010 по 2019 г., предоставленные ФАУ «Российский речной регистр», содержат сведения о 838 случаях повреждений судов и их элементов, из которых 114 – повреждения судовых валопроводов [2]. Повреждения судовых валопроводов ежегодно составляют в среднем 13 % от общего числа повреждений судов (рис. 1).

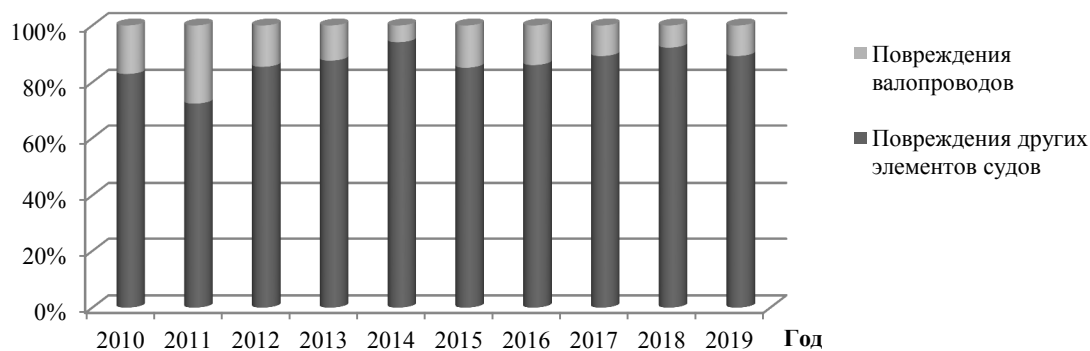


Рис. 1. Статистические данные о повреждениях валопроводов

Анализ аварийности на судах класса Российского морского регистра судоходства свидетельствует, что отказы валопроводов составляют 18 % от общего числа аварий пропульсивного комплекса судна, а количество аварий пропульсивного комплекса судна может достигать 10 % от общего числа аварийных случаев на судах [3].

Статистические данные об аварийных случаях, приводящих к потере хода и управляемости судна, связаны в основном с отказами элементов пропульсивного комплекса [4]. Распределение подвидов представлено в виде диаграммы на рис. 2.

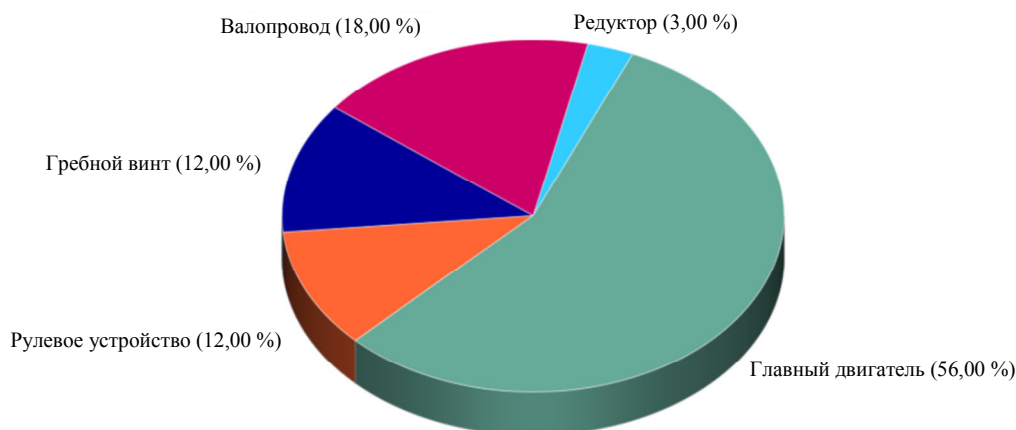


Рис. 2. Распределение подвидов отказов пропульсивного комплекса судна

Повреждения гребных валов и дейдвудных устройств

Анализ статистических данных о повреждениях судовых валопроводов подтвердил, что преобладающими являются дефекты гребных валов и дейдвудных устройств. Большая часть разрушений гребных валов происходит в районе большого диаметра основания конуса [5], а основными причинами повреждений являются усталостная коррозия и трещины [6, 7]. В некоторых случаях развитие трещин сопровождалось развитием коррозионных язв глубиной до 7 мм. В работе [8] приведены результаты выбраковки гребных валов в эксплуатации: 66 % гребных валов имели трещины в районе носового конца кормовой облицовки, 13 % – у кормового конца носовой облицовки. Трещина на конусе гребного вала была зафиксирована в одном случае.

Установление мест возникновения и характера трещин гребных валов позволяет косвенно установить характер и величину разрушающих нагрузок, а также реальные запасы прочности. В работе [9] приведена общая классификация трещин при разрушении валов по их расположению: под углом 45° к оси вала, вдоль оси вала и поперек оси вала. Помимо этого, определены варианты характерного расположения трещин и изломов согласно результатам исследований причин поломок гребных валов:

1. Трещины проходят под углом около 45°. Причины разрушения – ударные или вибрационные нагрузки при кручении. Сложная винтовая поверхность излома вала соответствует максимальным касательным напряжениям при его кручении;

2. Трещины расположены под углом около 90° к оси вала с ясно выраженной зоной долома. Причины разрушения – вибрации и ударные нагрузки гребного вала при его изгибе. В большей части случаев в плоскости поперечных разрушений имелись концентраторы напряжений: стыки, галтели, раковины и поры;

3. Трещины расположены под углом около 25° к оси вала. Поломки такого рода сопровождалась утерей части гребного вала с винтом. Причины разрушения – низкие механические свойства материала вала и производственные дефекты при поверхностной наплавке.

Статистические данные о повреждениях гребных валов позволяют привести общую классификацию расположения трещин гребных валов в порядке частоты их возникновения: непосредственно в теле вала, в шпоночном пазе и у отверстий для крепления шпонки, в месте перехода вала из конуса в цилиндр кормовой оконечности, в облицовках, у носовых и кормовых кромок облицовок, в сварных швах и околосшовных зонах облицовок. В качестве основной причины возникновения повреждений гребных валов указаны усталостные и коррозионно-усталостные процессы [1].

В случаях разрушений гребных валов среднетоннажных судов проектов 507, 1565, 05074М основной причиной образования трещин стала наплавка, которая производилась вместо ранее насаженных облицовок [10]. При этом места разрушений вала различались: в средней части вне зоны наплавки, в районе носовой бронзовой облицовки, в зоне наплавки, у кормового торца кормовой облицовки и в зоне кормовой шейки.

Анализ более 450 дефектно-технологических ведомостей астраханских судоремонтных заводов за период с 2010 по 2020 г. позволяет установить причины отказов судового валопровода, приведших к аварийному ремонту (табл. 1), и наиболее распространенные дефекты, выявленные в ходе планового докового ремонта судов (табл. 2).

Таблица 1

Дефекты при аварийном ремонте валопроводов

| Характер дефекта | Доля от общего числа аварий, % |
|--|--------------------------------|
| Гребные валы | |
| Волнообразная выработка на носовой шейке в районе дейдвудного сальника глубиной более 3,5 мм | 20 |
| Кольцевые риски на кормовой шейке глубиной более 4 мм | 20 |
| Кольцевые риски в районе дейдвудных подшипников глубиной более 2,5 мм | 20 |
| Трещина в кормовой рабочей шейке со стороны гребного винта | 15 |
| Превышение допустимого радиального биения на кормовых шейках при проверке в центрах | 12 |
| Трещины на цевье в районе носовой облицовки | 8 |
| Слом основного металла вала по диагонали | 5 |
| Трещины основного металла под вскрытой облицовкой | 5 |
| Трещина/отрыв кронштейна гребного вала | 3 |

Окончание табл. 1

| Характер дефекта | Доля от общего числа аварий, % |
|--|--------------------------------|
| Дейдвудные устройства | |
| Износ носового уплотнения | 20 |
| Износ кормового уплотнения | 15 |
| Повреждение внутренней поверхности подшипников: вырыв, отслоение, растрескивание и расплавление антифрикционного материала | 10 |

Таблица 2

Дефекты валопроводов при доковом ремонте судов

| Характер дефекта | Доля от общего числа повреждений, % |
|---|-------------------------------------|
| Гребные валы | |
| Неглубокие кольцевые риски на шейках вала | 80 |
| Выработка кормовой и носовой шеек в районе сальников | 45 |
| Износ носовой шейки в районе сальника | 40 |
| Износ рабочих шеек (бронза) | 40 |
| Повреждение изоляции со стороны кормовой облицовки | 25 |
| Местные поры на кормовой шейке гребного вала | 12 |
| Отслоение наплавленного металла шейки под сальниковое уплотнение | 12 |
| Язвы по диаметру вала вблизи конуса гребного винта | 12 |
| Волнообразная выработка в районе работы сальниковой набивки | 10 |
| Глубокие кольцевые риски облицовок (бронза) | 10 |
| Круговые паутинообразные трещины в районе торцов облицовок | 10 |
| Язвы и коррозия носовой шейки | 10 |
| Вырывы металла на рабочих шейках | 8 |
| Дейдвудные устройства | |
| Кольцевые риски и резбообразная выработка рабочей поверхности подшипников | 60 |
| Отслоение резины от основания втулки | 50 |
| Достижение предельно допустимого зазора в кормовом подшипнике | 40 |
| Износ и вырывы резины сегментов кронштейнового подшипника | 25 |
| Оплавление кормового подшипника с кормового торца (капролон) | 25 |
| Множественное подплавление подшипников | 25 |
| Отслоение рабочей поверхности подшипника (капролон) | 20 |
| Износ кронштейновой цельной резинометаллической втулки | 15 |
| Растрескивание и вырывы резины носовой дейдвудной втулки | 15 |
| Достижение предельно допустимого зазора в носовом подшипнике | 12 |
| Задир и износ кормового подшипника (бронза) при носовом подшипнике, допущенном к эксплуатации | 10 |
| Смещение сегмента резинометаллического кормового подшипника в результате поломки крепежных болтов | 5 |

В части случаев обнаружения дефектов одновременно зафиксированы существенное превышение зазора в кормовых втулках и повреждения внутренней поверхности дейдвудных подшипников: расслоение и повреждение антифрикционного слоя, износ и отрыв нижних планок. Носовые втулки выходят из рабочего состояния в меньшем количестве случаев, менее 25 %. При этом наработка дейдвудных подшипников до обнаружения повреждений составила от 11 000 до 60 000 ч, а средняя наработка подшипников в 30 случаях составила менее 25 000 ч.

Следует также отметить, что диаметр гребных валов влияет не только на характер и размер дефектов, но и на частоту их проявления. Большая часть из рассмотренных в работе случаев повреждений относится к валам диаметром до 400 мм. Наиболее подвержены к образованию трещин в облицовках валы диаметром от 100 до 200 мм, а трещины в теле вала наиболее характерны для валов диаметром от 200 до 400 мм. Характеристики прочих дефектов и частота их проявлений приведены в табл. 3.

Таблица 3

Наиболее распространенные дефекты гребных валов различного диаметра

| Диаметр гребного вала, мм | Характер дефекта и размер | Частота проявления от общего числа дефектов, % |
|---------------------------|---|--|
| ≤ 100 | Нарушение антикоррозионного покрытия, коррозионные разъедания между кормовой шейкой и конусом | 75 |
| | Коррозия шеек, носовых и кормовых шпоночных пазов | 50 |
| | Круговая выработка шейки сальника глубиной 0,5 мм | 40 |

| Диаметр гребного вала, мм | Характер дефекта и размер | Частота проявления от общего числа дефектов, % |
|--|--|--|
| ≤ 100 | Коррозионные язвы цевья глубиной до 1,5 мм | 25 |
| | Смятие и износ носовой и кормовой резьбы, гайки полумуфты | 15 |
| | Коррозионные язвы на большем диаметре кормового конуса глубиной до 0,9 мм | 10 |
| | Конусность кормовой шейки (кронштейновой – до 0,2 мм, сальниковой – до 0,4 мм) | 10 |
| | Конусность носовой шейки до 0,11 мм | 10 |
| 100–200 | Нарушение антикоррозионного покрытия цевья | 40 |
| | Коррозионные язвы кормовой и носовой шейки глубиной до 1 мм | 30 |
| | Круговые риски кормовой шейки глубиной до 0,3 мм | 30 |
| | Радиальное биение кормовой шейки до 0,6 мм | 20 |
| | Радиальное биение носовой шейки до 0,35 мм | 15 |
| 200–400 | Выработка шейки сальника глубиной до 0,5 мм | 10 |
| | Отслоение изоляции | 25 |
| | Язвы обтекателя до 1 мм | 20 |
| | Износ предвинтового уплотнения | 20 |
| | Круговые риски кормовых и носовых шеек шириной до 40 мм, глубиной до 1,3 мм, задиры глубиной до 0,6 мм | 15 |
| Круговые борозды кормовых и носовых шеек шириной до 5 мм, глубиной до 0,3 мм | 15 | |

Сведения о повреждениях валов диаметром более 400 мм [1] позволяют сделать вывод об увеличении количества повреждений валов диаметром от 400 до 600 мм. С дальнейшим увеличением диаметра вала повреждаемость падает.

Анализ статистики повреждений проиллюстрировал, что из всех случаев выявления дефектов в 5 % случаев гребные валы ремонту не подлежат. При обнаружении трещин на поверхности вала 62 % валов было заменено, 38 % валов – подверглись операциям ремонта. При трещинах в облицовке вала большая часть (около 70 %) была отремонтирована.

Заключение

Приведенные данные анализа повреждений и аварийных случаев не могут быть исчерпывающими, поскольку их количество увеличивается регулярно. Однако упомянутые случаи позволяют говорить об общих причинах отказов валопроводов на большинстве судов: превышение часов наработки, неточности проектирования, нарушения технологий изготовления, ремонта, сборки и монтажа, коррозионно-усталостные процессы и длительная эксплуатация, связанная с циклическими нагрузками, имеющими стохастический характер.

На основе проведенного исследования предлагается несколько направлений мероприятий для уменьшения количества аварий валопроводов:

- совершенствование методов проектирования;
- разработка методик и создание программно-аппаратных комплексов для мониторинга фактического состояния и прогнозирования отказов;
- развитие теории комбинированного анализа отказов.

Наиболее перспективные направления для уже разработанных конструкций валопроводов в эксплуатации:

- разработка универсальных материалов подшипников скольжения;
- внедрение технических решений по защите дейдвудных устройств от коррозии и абразивного износа;
- модернизация конструкции и подбор материалов уплотнений гребных валов.

Проведение исследовательских и опытно-конструкторских работ по вышеперечисленным направлениям с учетом опыта эксплуатации судовых валопроводов позволит повысить надежность эксплуатируемых и вновь проектируемых судовых энергетических комплексов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чура М. Н., Файвисович А. В. Эксплуатационные повреждения гребных валов // Трансп. дело России. 2011. № 11. С. 110–112.
2. О предоставлении информации: письмо главного управления ФАУ «Российский речной регистр» № 23-02.2-1966 от 09.09.2020 / ФАУ «Российский речной регистр». 1 с.

3. Шурпак В. К., Сергеев А. А. Анализ аварийности на судах с классом регистра // Науч.-техн. сб. Рос. мор. регистра судоходства. 2005. № 28. С. 33–46.
4. Емельянов М. Д. Система компьютерного мониторинга технического состояния морских судов с оценкой рисков // Науч.-техн. сб. Рос. мор. регистра судоходства. 2008. № 31. С. 23–43.
5. Искрицкий Д. Е., Рейнберг Е. С. Пути изменения требований Регистра СССР к расчету судовых валов на прочность // Судостроение. 1962. № 11. С. 5–24.
6. Dorey S. F. Marine Machinery Defects - Their Causes and Prevention. Transaction 1 // Marine Engineering. 1935. Vol. 47. N. 12. P. 19–26.
7. Виноградов С. С., Гавриш П. И. Износ и надежность винто-рулевого комплекса судов. М.: Транспорт, 1970. 232 с.
8. Вейнгаартен А. М., Куприянова В. К., Розен М. П., Соколов Н. Н. Результаты обследования состояния гребных валов на судах // Технология судостроения. 1966. № 2. С. 31–38.
9. Кондратьев Н. Н. Характерное расположение трещин и изломов на валах и баллерах // Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. Сер.: Морская техника и технология. 2004. № 1. С. 119–121.
10. Сагиров И. В., Гаркуша Г. Г., Власов В. Т., Жерлицина О. В. Исследование причин усталостного разрушения судовых гребных валов // Наука та виробництво: зб. наукових праць. Маріуполь: ДВНЗ «ПДТУ», 2019. Вип. 21. С. 12–20.

Статья поступила в редакцию 16.05.2021

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Гурий Алексеевич Кушнер – канд. техн. наук; доцент кафедры судостроения и энергетических комплексов морской техники; Астраханский государственный технический университет; Россия, 414056, Астрахань; guriy.kushner@mail.ru.

Виктор Андреевич Мамонтов – д-р техн. наук, доцент; профессор кафедры судостроения и энергетических комплексов морской техники; Астраханский государственный технический университет; Россия, 414056, Астрахань; sopromat112@mail.ru.

Дмитрий Александрович Волков – аспирант кафедры судостроения и энергетических комплексов морской техники; Астраханский государственный технический университет; Россия, 414056, Астрахань; volkovdima95@mail.ru.



ANALYSIS OF DAMAGE AND FAILURE OF SHIP PROPULSION SHAFTS

G. A. Kushner, V. A. Mamontov, D. A. Volkov

*Astrakhan State Technical University,
Astrakhan, Russian Federation*

Abstract. The paper highlights the problem of a ship shaft line failure, which entails significant economic losses, because most vessels of the Russian fleet are equipped with a shaft line. A large number of domestic and foreign works are devoted to studying the causes of damage and failures of ship shafting. The complexity of collecting, systematizing and analyzing statistical data on breakdowns and damages of shafting lies in the fact that the data refer to different periods of time, different periods of operation and types of ships, and are also contained in various sources. There has been considered the approach to systematization of modern statistical data on damages and failures of ship shafting elements collected on the basis of defect-technological lists of the Astrakhan shipyards and from other sources. Information on breakdowns of ships, their elements and ship shaft lines within 2010 - 2019 provided by the Russian River Register of Shipping is given. The analysis of accidents on ships of the class of the Russian Maritime Register of Shipping. The places of occurrence and the nature of the propeller shaft cracks have been established, which makes it possible to assess the nature and magnitude of the destructive loads, as well as the real safety margins. The general classification of the location of the propeller shaft cracks in the order of the frequency of their occurrence is given. There have been shown the results of the analysis

of defect-technological lists, which make it possible to establish the causes of ship shafting failures, which led to emergency repair, and the most common defects identified during the scheduled dock repair of ships. The influence of the diameter of propeller shafts on the nature and size of defects, as well as the frequency of their manifestation, is estimated. Based on the results of the analysis, certain measures have been proposed to reduce the number of accidents in shafting of projected vessels, and the most promising directions for improving the already developed structures of shafting in operation are outlined. The results of the analysis are in addition to the ongoing research and development work to improve the reliability of ship power systems.

Key words: ship shafting, damage statistics, propeller shaft, stern tube device, faults.

For citation: Kushner G. A., Mamontov V. A., Volkov D. A. Analysis of damage and failure of ship propulsion shafts. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies*. 2021;3:33-39. (In Russ.) DOI: 10.24143/2073-1574-2021-3-33-39.

REFERENCES

1. Chura M. N., Faivisovich A. V. Ekspluatatsionnye povrezhdeniia grebnykh valov [Operational damages of propeller shafts]. *Transportnoe delo Rossii*, 2011, vol. 11, pp. 110-112.
2. O predostavlenii informatsii: pis'mo glavnogo upravleniia FAU «Rossiiskii rechnoi registr» № 23-02.2-1966 ot 09.09.2020 [On the provision of information: letter from the main department of the FAU Russian River Register No. 23-02.2-1966 dated 09.09.2020]. FAU Russian River Register. 1 p.
3. Shurpiak V. K., Sergeev A. A. Analiz avariinosti na sudakh s klassom registra [Accident rate analysis on ships with register class]. *Nauchno-tehnicheskii sbornik Rossiiskogo morskogo registra sudokhodstva*, 2005, no. 28, pp. 33-46.
4. Emel'ianov M. D. Sistema komp'yuternogo monitoringa tekhnicheskogo sostoiianiia morskikh sudov s otsenkoi riskov [System of computer monitoring of technical condition of sea vessels with risk assessment]. *Nauchno-tehnicheskii sbornik Rossiiskogo morskogo registra sudokhodstva*, 2008, no. 31, pp. 23-43.
5. Iskritskii D. E., Reinberg E. S. Puti izmeneniia trebovaniy Registra SSSR k raschetu sudovykh valov na prochnost' [Ways of changing requirements of the Register of the USSR to analysis of ship shaft strength]. *Sudostroenie*, 1962, no. 11, pp. 5-24.
6. Dorey S. F. Marine Machinery Defects - Their Causes and Prevention. Transaction 1. *Marine Engineering*, 1935, vol. 47, no. 12, pp. 19-26.
7. Vinogradov S. S., Gavrish P. I. Iznos i nadezhnost' vinto-rulevogo kompleksa sudov [Wear and reliability of propeller-driven complex of ships]. Moscow, Transport Publ., 1970. 232 p.
8. Veingaarten A. M., Kupriianova V. K., Rozen M. P., Sokolov N. N. Rezul'taty obsledovaniia sostoiianiia grebnykh valov na sudakh [Results of examining ship propeller shafts]. *Tekhnologiya sudostroeniia*, 1966, no. 2, pp. 31-38.
9. Kondrat'ev N. N. Kharakternoe raspolozhenie treshchin i izlomov na valakh i ballerakh [Specific location of cracks and breaks on shafts and stocks]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Morskaia tekhnika i tekhnologiya*, 2004, no. 1, pp. 119-121.
10. Sagirov I. V., Garkusha G. G., Vlasov V. T., Zherlitsina O. V. Issledovanie prichin ustalostnogo razrusheniia sudovykh grebnykh valov [Investigating causes of fatigue destruction of ship propeller shafts]. *Nauka i proizvodstvo: sbornik nauchnykh trudov*. Mariupol', DVNZ «PDTU», 2019. Iss. 21. Pp. 12-20.

The article submitted to the editors 16.05.2021

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Guriy A. Kushner – Candidate of Technical Sciences; Assistant Professor of the Department of Shipbuilding and Marine Power Complexes; Astrakhan State Technical University; Russia, 414056, Astrakhan; guriy.kushner@mail.ru.

Victor A. Mamontov – Doctor of Technical Sciences, Assistant Professor; Professor of the Department of Shipbuilding and Marine Power Complexes; Astrakhan State Technical University; Russia, 414056, Astrakhan; sopromat112@mail.ru.

Dmitry A. Volkov – Postgraduate Student of the Department of Shipbuilding and Marine Power Complexes; Astrakhan State Technical University; Russia, 414056, Astrakhan; volkovdima95@mail.ru.

