

Научная статья
УДК 629.5
<https://doi.org/10.24143/2073-1574-2024-1-64-71>
EDN XJEMTN

Экономическая эффективность применения систем мониторинга крутильных колебаний на судах

*Михаил Николаевич Покусаев, Максим Михайлович Горбачев[✉],
Артем Максимович Горбачев*

*Астраханский государственный технический университет,
Астрахань, Россия, max9999_9@mail.ru[✉]*

Аннотация. Исследуется система мониторинга крутильных колебаний, произведена оценка экономической эффективности от ее внедрения на судах. Проиллюстрирована принципиальная схема системы мониторинга крутильных колебаний и приведен фотоснимок экспериментального образца системы мониторинга. Проводится оценка экономической эффективности от внедрения систем мониторинга крутильных колебаний на судах для предотвращения возникновения аварийных ситуаций с судовыми машинно-двигательными комплексами. В качестве материалов были использованы правила классификационных обществ, научно-техническая литература в области крутильных колебаний и промышленной экономики, собственные исследования авторов. В качестве методов использованы анализ и расчетный эксперимент. Получены данные по экономическим затратам судовладельца при возникновении аварийных ситуаций при усталостных разрушениях элементов судовых машинно-двигательных комплексов. Произведена оценка затрат при разработке, монтаже и техническом обслуживании системы мониторинга крутильных колебаний на судах; а также ориентировочная оценка объема внутреннего рынка России по услугам установки и технического обслуживания систем мониторинга крутильных колебаний на морских судах. Отмечено, что стоимость последствий поломок гребных валов составляет от нескольких миллионов до десятков миллионов рублей. Сделаны выводы о том, что разработка и внедрение систем мониторинга крутильных колебаний позволят уменьшить затраты судовладельца на регламентную оценку технического состояния элементов демпферов крутильных колебаний и снизить риски возникновения дорогостоящих аварий с судовыми машинно-двигательными комплексами.

Ключевые слова: судовые машинно-двигательные комплексы, крутильные колебания, система мониторинга, техническая диагностика, демпфер крутильных колебаний, экономическая эффективность

Для цитирования: Покусаев М. Н., Горбачев М. М., Горбачев А. М. Экономическая эффективность применения систем мониторинга крутильных колебаний на судах // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2024. № 1. С. 64–71. <https://doi.org/10.24143/2073-1574-2024-1-64-71>. EDN XJEMTN.

Original article

Cost-effectiveness of ships torsional vibrations monitoring systems application

Mikhail N. Pokusaev, Maxim M. Gorbachev[✉], Artem M. Gorbachev

*Astrakhan State Technical University,
Astrakhan, Russia, max9999_9@mail.ru[✉]*

Abstract. A torsional vibration monitoring system is being investigated, and an assessment of the economic efficiency of its implementation on ships is made. A schematic diagram of the torsional vibration monitoring system is illustrated and a photograph of an experimental sample of the monitoring system is provided. An assessment of the economic efficiency of the implementation of torsional vibration monitoring systems on ships is being carried out to prevent the occurrence of emergency situations with marine propulsion systems. The rules of classification societies, scientific and technical literature in the field of torsional oscillations and industrial economics, and the authors' own research were used as materials. The methods used are analysis and computational experiment. Data on the economic costs

of the shipowner in the event of emergency situations in case of fatigue failures of elements of ship's engine and propulsion systems were obtained. An assessment of the costs for the development, installation and maintenance of a torsional vibration monitoring system on ships was made; as well as an approximate assessment of the volume of the Russian domestic market for installation and maintenance of torsional vibration monitoring systems on ships. It is noted that the cost of the consequences of propeller shaft failures ranges from several million to tens of millions of rubles. It is concluded that the development and implementation of torsional vibration monitoring systems will reduce the cost of the shipowner for a routine assessment of the technical condition of torsional vibration dampers and reduce the risks of costly accidents with shipboard engine complexes.

Keywords: marine propulsion systems, torsional vibrations, monitoring system, technical diagnostics, torsional vibration damper, economic efficiency

For citation: Pokusaev M. N., Gorbachev M. M., Gorbachev A. M. Cost-effectiveness of ships torsional vibrations monitoring systems application. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine engineering and technologies.* 2024;1:64-71. (In Russ.). <https://doi.org/10.24143/2073-1574-2024-1-64-71>. EDN XJEMTN.

Введение

Применение систем мониторинга крутильных колебаний позволяет снизить риск возникновения серьезных аварий, связанных с усталостными разрушениями элементов судового машинно-двигательного комплекса. Мониторинг подразумевает постоянный контроль касательных напряжений, возникающих в элементах судового валопровода от крутильных колебаний, и сравнение их с допустимыми значениями, определенных по правилам

классификационных обществ – Российского морского регистра судоходства (РМРС) [1] или Российского классификационного общества (РКО) [2], а также выполнение других функций системой.

Материалы исследований

Принципиальная схема разработанной авторами системы мониторинга крутильных колебаний представлена на рис. 1, а общий вид экспериментального образца системы – на рис. 2.

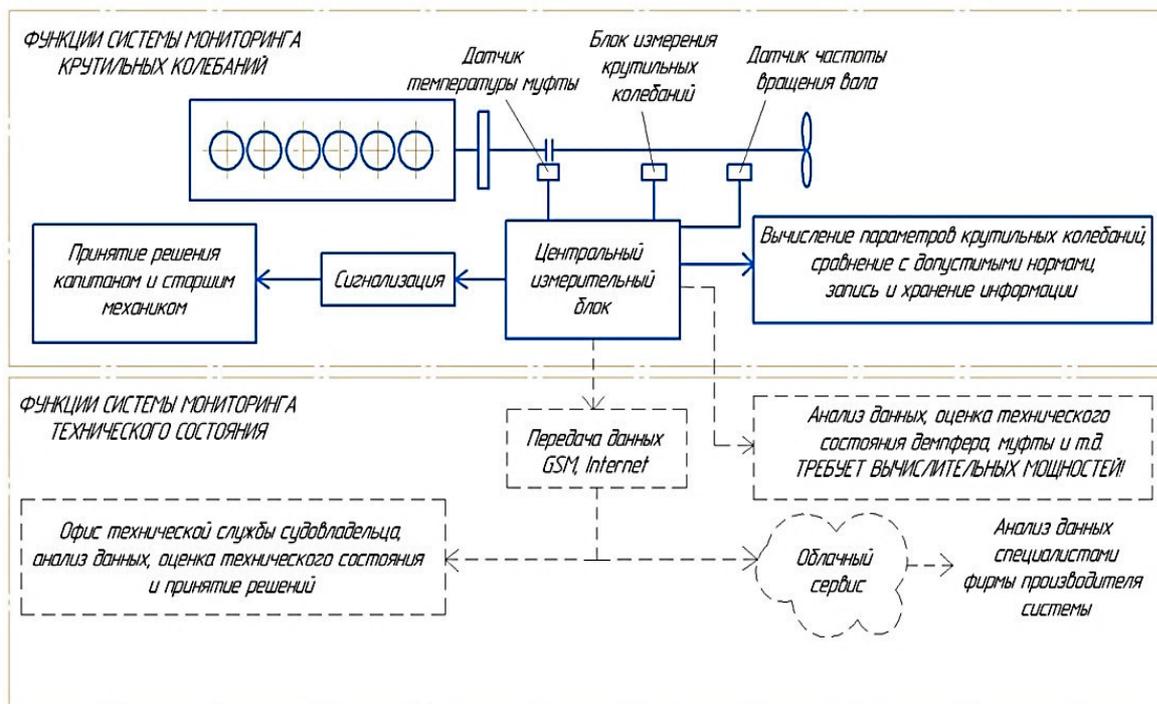


Рис. 1. Принципиальная схема системы мониторинга крутильных колебаний

Fig. 1. Schematic diagram of the torsional vibration monitoring system

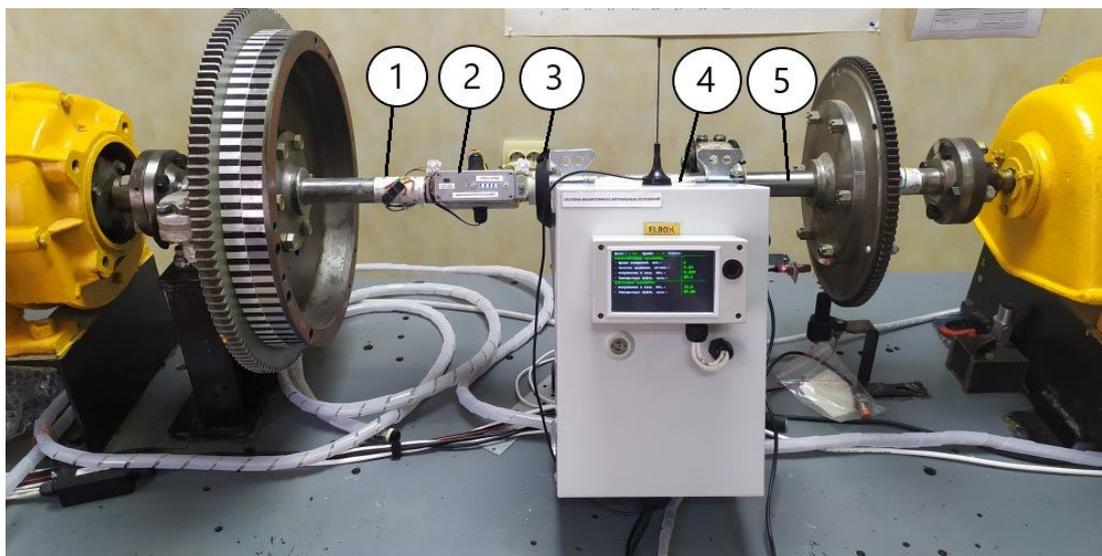


Рис. 2. Экспериментальный образец системы мониторинга: 1 – тензорезисторы; 2 – автономный блок измерения напряжений тензорезисторами; 3 – беспроводная зарядка аккумулятора автономного блока; 4 – центральный измерительный блок; 5 – вал лабораторной установки

Fig. 2. An experimental sample of the monitoring system: 1 – strain gauges; 2 – an autonomous voltage measurement unit with strain gauges; 3 – wireless charging of the battery of an autonomous unit; 4 – a central measuring unit; 5 – a laboratory installation shaft

Технические аспекты применения систем мониторинга рассматриваются в источниках [3–5] и авторских исследованиях [6–8], но экономический эффект от применения систем мониторинга крутильных колебаний в них не определен, поэтому рассмотрим его в данной статье.

Анализ финансовых потерь судовладельца при возникновении аварийных ситуаций от развития крутильных колебаний

Одной из существенных финансовых потерь для судовладельца является простой судна, в том числе по причине возникновения аварийной ситуации. Стоимость аренды судов существенно отличается в зависимости от их назначения и для бункеровщика с водоизмещением до 10 тыс. т составляет 500 тыс. руб. в сутки, а буксира – может достигать 250 тыс. руб. в сутки. Поэтому при возникновении аварийной ситуации, связанной с развитием опасных крутильных колебаний, а тем более с учетом времени и затрат на ремонт судового машинно-двигательного комплекса, финансовые потери судовладельца могут превышать несколько миллионов рублей.

В работах [9, 10] приводится пример распределения затрат судовладельца при аварийной поломке и замене гребного вала (диаметром 290 мм и длиной 7 850 мм) танкера с водоизмещением

3 500 т. Если опираться на данные источников [9, 10] и составить диаграмму относительных затрат (без привязки к цене в денежном выражении для упрощения учета изменения курса валют с 2009 г. и других экономических факторов), то ее вид может быть следующим (рис. 3).

Согласно рис. 3 наибольшую долю затрат судовладельца составляет в данном случае простой судна, а потеря прибыли в денежном выражении в 2009 г. для подобного танкера насчитывала 360 тыс. долл. США [9, 10].

Дополнительно приведем затраты судовладельцев, которые возникли при поломках судовых гребных и промежуточных валов, в том числе и от усталостных разрушений:

– поломка гребного вала и затопление рыболовного судна «Леди Гертруда» в 2016 г. – 400 тыс. долл. США [11];

– поломка гребного вала и затопление рыболовного судна «Бен энд Кейси» в 2017 г. – 191 тыс. долл. США [12];

– усталостное разрушение гребного вала и выход сломанной части с гребным винтом с поступлением воды танкера «Эланд», тип «Беломорский» в 2019 г. – 8 836 816 руб. [13];

– поломка гребного вала сухогруза *Canopus* в 2019 г. – 57 тыс. евро [14].



Рис. 3. Распределение затрат судовладельца при аварийной замене гребного вала танкера с водоизмещением 3 500 т

Fig. 3. Distribution of the shipowner's costs in case of emergency replacement of the propeller shaft of a tanker with a displacement of 3 500 tons

В соответствии с представленными примерами стоимость последствий поломок гребных валов составляет от нескольких миллионов до десятков миллионов рублей.

Анализ затрат судовладельца при проведении регламентного торсиографирования крутильных колебаний

При средней стоимости зарубежной системы мониторинга TVC компании *Geislinger* 9 тыс. евро [15] и предварительной оценочной стоимости экспериментального образца отечественной системы мониторинга крутильных колебаний 220 тыс. – 250 тыс. руб. экономическая выгода применения систем мониторинга даже для небольшого судна очевидна. Однако в процессе работы судна при условии обеспечения качественной технической эксплуатации и соблюдения периодичности ремонта машинно-двигательного комплекса непредвиденный простой судна по вине крутильных колебаний может не произойти, поэтому необходимо обосновать выгоду судовладельца путем замены периодического торсиографирования установкой системы мониторинга. Торсиографирование (или тензометрирование) производится с целью оценки эффективности работы демпферов – устройств, предусмотренных для снижения развития опасных крутильных колебаний, и данная процедура производится периодически, через каждые 10 тыс. – 15 тыс. ч работы.

В настоящее время измерение крутильных колебаний в России осуществляет несколько органи-

заций, в том числе: ИЦ «МТС» ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет» (г. Астрахань), РКБ «Стапель» (г. Ростов), ООО «Горсио» (г. Санкт-Петербург), «Астра-НН» (г. Нижний Новгород) и др. Средняя стоимость торсиографирования (тензометрирования) однолопастного машинно-двигательного комплекса и термометрирования упругой муфты составляет от 40 тыс. до 60 тыс. руб. Жизненный цикл силиконового демпфера крутильных колебаний судового дизеля до его замены составляет до 90 тыс. ч, а гарантийный срок эксплуатации – до 30 тыс. ч. Таким образом, после гарантийной эксплуатации демпфера требуется проведение периодической процедуры оценки технического состояния. Продолжительность назначенного ресурса при увеличении наработки демпфера снижается, что приводит к необходимости проведения до 6-и торсиографирований за жизненный цикл демпфера. В денежном выражении это составит от 240 тыс. до 360 тыс. руб., что сопоставимо с обозначенной ранее стоимостью системы мониторинга. При массовом производстве системы мониторинга ее стоимость может снизиться, что будет еще более выгодно для судовладельцев.

Следует упомянуть, что в данном случае мы не учли затраты на работу инспектора классификационного общества, который присутствует при измерениях и проводит анализ предоставляемых после торсиографирования результатов, и это дополнительно увеличит затраты судовладельца.

Экономическая заинтересованность судовладельцев в системах мониторинга крутильных колебаний подтверждается докладом *Torsional vibration monitoring of large container vessel propulsion train* («Контроль крутильных колебаний силовой установки крупнотоннажного контейнеровоза») представителя компании *CPO Containerschiffreederei, Geislinger GmbH, GasKraft Engineering*, сделанном на симпозиуме 2022 г., прошедшем в г. Зальсбурге (Австрия) [16]. В частности, в докладе сообщалось, что компания *Geislinger* разработала новую систему мониторинга крутильных колебаний и установила ее на контейнеровозе *MSC La Spezia* класса *Super-Postpanamax*. В результате испытаний компания судовладелец *CPO Containerschiffreederei* решила внедрить эту систему на всех девяти судах своего флота класса «Италия». Необходимо отметить, что системы мониторинга серии *GMS* компании *Geislinger* устанавливаются в комплекте с демферами этой фирмы на судах достаточно давно, в сети Интернет (например, на интернет-аукционе *ebay.com*) есть данные о продаже быв-

ших в эксплуатации блоков систем, датированных 2004–2007 гг.

Для обоснования применения системы мониторинга крутильных колебаний и заинтересованности судовладельцев возможно использовать авторскую методику на базе теории рисков, которая включает в себя оценку экономических рисков при помощи матрицы рисков; а технических рисков – при помощи дерева неисправностей (отказов) [17].

Оценка экономических затрат на разработку экспериментального образца системы мониторинга

Приведем подробный расчет экономических затрат, которые были произведены на разработку экспериментального образца системы мониторинга крутильных колебаний при выполнении авторами гранта по программе «СТАРТ-1», полученного от ФГБУ «Фонд содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере» (Фонд содействия инновациям) [18]. Результат приводится в табл. 1, цены указаны на 2022 г.

Таблица 1

Table 1

Основные статьи затрат на разработку экспериментального образца системы мониторинга крутильных колебаний

The main cost items for the development of an experimental sample of a torsional vibration monitoring system

| Статьи затрат | Затраты, руб. |
|---|----------------|
| Комплекующие системы | 169 298 |
| Сырье | 6 450 |
| Зарплата и отчисления на зарплату сотрудников | 55 800 |
| Производственные расходы | 23 500 |
| <i>Итого</i> | <i>255 048</i> |

Стоимость серийного образца системы мониторинга будет определяться с учетом затрат на получение одобрения со стороны классификационного общества, применения компонентов морского исполнения и отечественного производства, разработку специализированного программного обеспечения, потребности в контроле нескольких валовых линий и может увеличиться. В качестве стоимости, к которой должен стремиться серийный образец системы, можно принять величину, обозначенную ранее, – 360 тыс. руб.

Оценка экономического эффекта от внедрения системы мониторинга

Упрощенно оценим те затраты $P_{см}$, которые судовладелец несет при установке системы мониторинга крутильных колебаний:

$$P_{см} = P_c + TP_{то},$$

где P_c – единовременные затраты на изготовление, доставку и монтаж системы мониторинга; $P_{то}$ – ежегодные затраты на техническое обслуживание и ремонт системы мониторинга; $P_{то} = 0,25 \cdot P_c$; T – период эксплуатации системы, принимаем равным 10 лет;

$$P_c = P_1 + P_2 + P_3 + P_4,$$

где P_1 – стоимость системы мониторинга; P_2 – стоимость монтажа системы мониторинга; $P_2 = 0,1 \cdot P_1$; P_3 – стоимость доставки системы мониторинга; $P_3 = 0,05 \cdot P_1$; P_4 – неучтенные затраты: $P_4 = 0,1 \cdot P_1$;

$$P_c = 360\,000 + 0,1 \cdot 360\,000 + 0,05 \cdot 360\,000 + 0,1 \cdot 360\,000 = 450\,000 \text{ руб.};$$

$$P_{то} = 0,25 \cdot 450\,000 = 112\,500 \text{ руб.};$$

$$P_{см} = 450\,000 + 10 \cdot 112\,500 = 1\,575\,000 \text{ руб.}$$

Согласно результатам проведенного расчета, стоимость затрат судовладельца при эксплуатации системы в течение 10 лет составит 1 575 000 руб.

Учитывая, что минимальный ущерб среди рассмотренных ранее случаев поломок гребных валов составил порядка 2 млн руб., затраты на установку и обслуживание системы мониторинга окупаются.

Для каждого проекта судов можно оценить экономические риски при возникновении аварий от развита крутильных колебаний. Это можно сделать при помощи авторской методики оценки рисков, рассматриваемой в исследовании [19]. Например, для судна типа «Волгонефть» последствия поломки валопровода от воздействия крутильных колебаний оцениваются на уровне 5 млн руб. Согласно проведенному авторами расчету, вероятность наступления подобных аварий для судов типа «Волгонефть» составляет 0,0136, что по классификации ИМО относится к «высокой вероятности» события.

Таким образом, разрушение валопровода вполне реально может произойти за 10 лет при эксплуатации судна без системы мониторинга крутильных колебаний. Это приводит к очевидному выводу об экономической выгоде применения систем мониторинга для этого типа судов. Подобный анализ можно произвести практически для любого проекта судов и выяснить экономическую эффективность от внедрения системы мониторинга крутильных колебаний.

Перспектива коммерциализации систем мониторинга крутильных колебаний основана на большом объеме рынка – количество только морских судов в России на 2021 г. составляет около 2 704 шт. (табл. 2) [20].

Таблица 2

Table 2

Статистика морских судов в России
Statistics of sea vessels in Russia

| Типы судна | 2010 г. | 2015 г. | 2019 г. | 2020 г. | 2021 г. |
|--|---------|---------|---------|---------|---------|
| Всего | 2 779 | 2 760 | 2 726 | 2 733 | 2 704 |
| Нефтеналивные | 311 | 430 | 397 | 389 | 385 |
| Наливные (прочие) | 22 | 18 | 17 | 17 | 17 |
| Нефтенавалочные и нефтерудовозы | 32 | 24 | 14 | 9 | 7 |
| Рудовозы и навалочные | 20 | 13 | 6 | 4 | 4 |
| Для перевозки генеральных грузов | 620 | 533 | 541 | 552 | 560 |
| Грузопассажирские | 9 | 13 | 12 | 8 | 9 |
| Контейнерные, баржевозы, доковые | 8 | 10 | 11 | 12 | 13 |
| Рыбопромысловые базы и рыботранспортные суда | 38 | 26 | 20 | 20 | 21 |
| Рыболовные | 932 | 843 | 832 | 836 | 825 |
| Пассажирские и пассажирские бескоачные | 47 | 42 | 37 | 38 | 38 |
| Суда обеспечения, обслуживающие суда | 36 | 42 | 45 | 46 | 42 |
| Буксиры | 312 | 338 | 369 | 372 | 360 |
| Земснаряды | 16 | 14 | 14 | 16 | 18 |
| Ледоколы | 34 | 31 | 32 | 35 | 33 |
| Научно-исследовательские | 73 | 75 | 68 | 63 | 62 |
| Прочие | 269 | 308 | 311 | 316 | 310 |

Максимальный объем рынка (для получения единовременного дохода) оценивается в 973,44 млн руб., исходя из средней стоимости системы (360 тыс. руб.) и количества морских судов, на которых требуется установка системы мониторинга (2 704 шт.). Ежегодный максимальный доход от технического обслуживания систем мониторинга может достигать 304,2 млн руб.

Выводы

1. Системы мониторинга крутильных колебаний могут снизить риски возникновения аварийных ситуаций, которые могут привести к большим финансовым затратам судовладельца как из-за ремонта, так и из-за простоя судна.

2. Системы мониторинга могут дать возможность перехода от регламентной проверки технического состояния демпферов крутильных колебаний к оценке по состоянию, что будет способствовать экономии затрат судовладельца при серийном выпуске систем мониторинга.

3. Ориентировочные затраты, которые возникнут у судовладельцев при установке и обслуживании системы мониторинга, за 10 лет составят порядка 1 млн 575 тыс. руб., а затраты на ремонт и простой могут составлять от нескольких миллионов до десятков миллионов рублей в зависимости от вида судна и его назначения, что свидетельствует об экономической выгоде мониторинга крутильных колебаний для судовладельца.

4. Максимальный внутренний рынок услуг по установке систем мониторинга крутильных колебаний с учетом количества морских судов под россий-

ским флагом оценивается на уровне 973,44 млн руб., а максимальный рынок по техническому обслуживанию систем – на уровне 304,2 млн руб. ежегодно.

Список источников

1. Правила классификации и постройки морских судов. Ч. VII. Механические установки. СПб.: Изд-во РМРС, 2023. 115 с.
2. Правила классификации и постройки судов (ПКПС). М.: Изд-во РКО, 2019. 1685 с.
3. Geislinger Monitoring System. Catalog, 2018. 34 p.
4. Geislinger Monitoring System MK6. URL: <https://www.geislinger.com/en/products/product/geislinger-monitoring-mk6> (дата обращения: 30.10.2023).
5. Geislinger Dampher D60/14/2. Salzburg, 2001. 8 p.
6. Горбачев М. М., Сибряев К. О., Ибадуллаев А. Д. Разработка блока обработки информации для программно-аппаратного комплекса системы мониторинга крутильных колебаний судового валопровода // Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. 2021. № 1 (71). С. 22–28.
7. Горбачев М. М., Колыванов В. В. Выбор методов постоянного мониторинга крутильных колебаний в судовых машинно-двигательных комплексах // Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. Сер.: Морская техника и технология. 2023. № 2. С. 54–65.
8. Горбачев М. М., Покусаев М. Н. Результаты испытаний прототипа системы мониторинга крутильных колебаний на судне «Иван Поддубный» // Наука и практика – 2022: материалы Всерос. междисциплинар. науч. конф. (Астрахань, 10–15 октября 2022 г.). Астрахань: Изд-во АГТУ, 2022. С. 271–274. 1 CD-диск. URL: <http://www.astu.org/Content/Page/5833> (дата обращения: 30.10.2023). № гос. регистрации 0322300896.
9. Чура М. Н. Прогнозирование начальной стадии усталостного разрушения судовых гребных валов (на примере т/х «Волго-Нефть» пр. 1577/550А). Новороссийск: Изд-во ГМУ им. адм. Ф. Ф. Ушакова, 2010. 57 с.
10. Тинь Д. Разработка и обоснование методики прогнозирования долговечности судовых валов с трещинами при ремонте: дис. ... канд. техн. наук. Астрахань, 2009. 128 с.
11. National Transportation Safety Board, Marine Acci-

dent Brief, Sinking of Fishing Vessel Lady Gertrude, № DCA16FM051, 2017. 5 p.

12. National Transportation Safety Board, Marine Accident Brief, Flooding and Sinking of Fishing Vessel Ben & Casey, № DCA18FM004, 2018. 7 p.

13. Гирин С. Н., Матвеев Ю. И. Анализ поломки гребного вала теплохода «ЭЛАНД» // Науч. проблемы вод. трансп. 2022. № 71 (2). С. 15–27.

14. «Ингосстрах» заплатил за повреждение гребного вала. URL: <https://sudostroenie.info/novosti/27694.html?ysclid=I9qzbcivk559284670> (дата обращения: 30.10.2023).

15. Torsional vibrations in steam turbine shaft trains. Report 2018:522, Energiforsk, 2018. 62 p.

16. Ohorn H., Thalhammer A., Mohr H. Torsional vibration monitoring of large container vessel propulsion train // Program Torsional Vibration Symposium, Salzburg: Schwingungstechnischer Verein, 2022. 52 p.

17. Горбачев М. М. Методика оценки рисков возникновения аварий из-за крутильных колебаний в судовых машинно-двигательных комплексах // Proceedings of Azerbaijan State Marine Academy. 2023. № 1. С. 99–103.

18. Горбачев М. М., Покусаев М. Н., Сибряев К. О. Результаты разработки и испытания прототипа системы мониторинга крутильных колебаний судовых валопроводов в рамках реализации научного гранта «СТАРТ-1» // Материалы 66-й Междунар. науч. конф. Астрахан. гос. техн. ун-та (Астрахань, 25–29 апреля 2022 г.). Астрахань: Изд-во АГТУ, 2022. С. 466–468. 1 CD-диск. URL: <http://www.astu.org/Content/Page/5833> (дата обращения: 30.10.2023). № гос. регистрации 0322203804.

19. Горбачев М. М. Методика оценки рисков возникновения аварий из-за крутильных колебаний в судовых машинно-двигательных комплексах // Proceedings of Azerbaijan State Marine Academy. 2023. № 1. С. 99–103.

20. Транспорт в России. 2022: стат. сб. М.: Росстат, 2022. 101 с.

References

1. *Pravila klassifikatsii i postroiki morskikh sudov. Part VII. Mekhanicheskie ustanovki* [Rules of classification and construction of marine vessels. Part VII. Mechanical installations]. Saint-Peterburg, Izd-vo RMRS, 2023. 115 p.
2. *Pravila klassifikatsii i postroiki sudov (PKPS)* [Rules for the Classification and Construction of Ships (SCPS)]. Moscow, Izd-vo RKO, 2019. 1685 p.
3. *Geislinger Monitoring System*. Catalog, 2018. 34 p.
4. *Geislinger Monitoring System MK6*. Available at: <https://www.geislinger.com/en/products/product/geislinger-monitoring-mk6> (accessed: 30.10.2023).
5. *Geislinger Dampher D60/14/2*. Salzburg, 2001. 8 p.
6. Gorbachev M. M., Sibriaev K. O., Ibadullaev A. D. Razrabotka bloka obrabotki informatsii dlia programmo-apparatnogo kompleksa sistemy monitoringa krutit'nykh kolebanii sudovogo valoprovoda [Development of an information processing unit for the hardware and software com-

plex of the torsional vibration monitoring system of the ship's shaft line]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2021, no. 1 (71), pp. 22–28.

7. Gorbachev M. M., Kolyvanov V. V. Vybor metodov postoiannogo monitoringa krutit'nykh kolebanii v sudovykh mashinno-dvizhitel'nykh kompleksakh [Selection of methods for continuous monitoring of torsional vibrations in marine propulsion systems]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Morskaya tekhnika i tekhnologiya*, 2023, no. 2, pp. 54–65.

8. Gorbachev M. M., Pokusaev M. N. Rezul'taty ispytaniy prototipa sistemy monitoringa krutit'nykh kolebanii na sudne «Ivan Poddubnyi». *Nauka i praktika – 2022* [Test results of the prototype of the torsional vibration monitoring system on the ship “Ivan Poddubny”. *Science and Practice – 2022*]. *Materialy Vserossiiskoi mezhdistsiplinarnoi nauchnoi konferentsii (Astrakhan', 10–15 oktiabria 2022 g.)*. Astra-

khan', Izd-vo AGTU, 2022. Pp. 271-274. 1 CD-disk. Available at: <http://www.astu.org/Content/Page/5833> (accessed: 30.10.2023). № gosudarstvennoi registratsii 0322300896.

9. Chura M. N. *Prognozirovanie nachal'noi stadii ustalostnogo razrusheniia sudo-vykh grebnykh valov (na primere t/kh «Volgoneft» pr. 1577/550A)* [Forecasting of the initial stage of fatigue failure of ship's propeller shafts (using the example of t/h Volgoneft ave. 1577/550A)]. Novorossiisk, Izd-vo GMU imeni admirala F. F. Ushakova, 2010. 57 p.

10. Tin' D. *Razrabotka i obosnovanie metodiki prognozirovaniia dolgovechnosti sudovykh valov s treshchinami pri remonte: dis. ... kand. tekhn. nauk* [Development and justification of a methodology for predicting the durability of ship shafts with cracks during repair: dis. ... Candidate of Technical Sciences]. Astrakhan', 2009. 128 p.

11. *National Transportation Safety Board, Marine Accident Brief, Sinking of Fishing Vessel Lady Gertrude, № DCA16FM051*, 2017. 5 p.

12. *National Transportation Safety Board, Marine Accident Brief, Flooding and Sinking of Fishing Vessel Ben & Casey, № DCA18FM004*, 2018. 7 p.

13. Girin S. N., Matveev Iu. I. *Analiz polomki grebnogo vala teplokhoda «ELAND»* [Analysis of the breakdown of the propeller shaft of the ship "ELAND"]. *Nauchnye problemy vodnogo transporta*, 2022, no. 71 (2), pp. 15-27.

14. *«Ingosstrakh» zaplatil za povrezhdenie grebnogo vala* [Ingosstrakh paid for damage to the propeller shaft]. Available at: <https://sudostroenie.info/novosti/27694.html?ysclid=19qzzbcivk559284670> (accessed: 30.10.2023).

15. *Torsional vibrations in steam turbine shaft trains*. Report 2018:522, Energiforsk, 2018. 62 p.

16. Ohorn H., Thalhammer A., Mohr H. *Torsional vibra-*

tion monitoring of large container vessel propulsion train. Program Torsional Vibration Symposium, Salzburg, Schwingungstechnischer Verein, 2022. 52 p.

17. Gorbachev M. M. *Metodika otsenki riskov vozniknoveniia avarii iz-za krutil'nykh kolebanii v sudovykh mashinno-dvizhitel'nykh kompleksakh* [Methodology for assessing the risks of accidents due to torsional vibrations in marine propulsion systems]. *Proceedings of Azerbaijan State Marine Academy*, 2023, no. 1, pp. 99-103.

18. Gorbachev M. M., Pokusaev M. N., Sibiriev K. O. *Rezultaty razrabotki i ispytaniia prototipa sistemy monitoringa krutil'nykh kolebanii sudovykh valoprovodov v ramkakh realizatsii nauchnogo granta «START-1»* [The results of the development and testing of a prototype system for monitoring torsional vibrations of marine pipelines within the framework of the implementation of the scientific grant "START-1"]. *Materialy 66-i Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta (Astrakhan', 25–29 apreliia 2022 g.)*. Astrakhan', Izd-vo AGTU, 2022. Pp. 466-468. 1 CD-disk. Available at: <http://www.astu.org/Content/Page/5833> (accessed: 30.10.2023). № gosudarstvennoi registratsii 0322203804.

19. Gorbachev M. M. *Metodika otsenki riskov vozniknoveniia avarii iz-za krutil'nykh kolebanii v sudovykh mashinno-dvizhitel'nykh kompleksakh* [Methodology for assessing the risks of accidents due to torsional vibrations in marine propulsion systems]. *Proceedings of Azerbaijan State Marine Academy*, 2023, no. 1, pp. 99-103.

20. *Transport v Rossii. 2022: statisticheskii sbornik* [Transport in Russia. 2022: statistical collection]. Moscow, Rosstat Publ., 2022. 101 p.

Статья поступила в редакцию 13.11.2023; одобрена после рецензирования 20.12.2023; принята к публикации 24.01.2024
The article was submitted 13.11.2023; approved after reviewing 20.12.2023; accepted for publication 24.01.2024

Информация об авторах / Information about the authors

Михаил Николаевич Покусаев – доктор технических наук, профессор; заведующий кафедрой эксплуатации водного транспорта и промышленного рыболовства; Астраханский государственный технический университет; evt@astu.org

Максим Михайлович Горбачев – кандидат технических наук; доцент кафедры эксплуатации водного транспорта и промышленного рыболовства; Астраханский государственный технический университет; max9999_9@mail.ru

Артем Максимович Горбачев – студент института морских технологий, энергетики и транспорта; Астраханский государственный технический университет; Art_ru@inbox.ru

Mikhail N. Pokusaev – Doctor of Technical Sciences, Professor; Head of the Department of Operation of Water Transport and Industrial Fishing; Astrakhan State Technical University; evt@astu.org

Maxim M. Gorbachev – Candidate of Technical Sciences; Assistant Professor of the Department of Operation of Water Transport and Industrial Fishing; Astrakhan State Technical University; max9999_9@mail.ru

Artem M. Gorbachev – Student of the institute of marine technology, energy and transport; Astrakhan State Technical University; Art_ru@inbox.ru

