DOI: 10.24143/2073-1574-2018-1-74-80
УДК 629.123

В. В. Родыгин, Н. И. Николаев, М. В. Гриценко

ОЦЕНКА УРОВНЕЙ ВИБРАЦИИ ДЕЙДВУДНЫХ УСТРОЙСТВ С МАСЛЯНОЙ СИСТЕМОЙ СМАЗКИ

Периодические изменения крутящего момента, передаваемые на валопровод двигателем, и неравномерность гидродинамического сопротивления гребного винта сопровождаются вибрацией дейдвудного устройства. Повышенный зазор при неплотной посадке дейдвудного подшипника вызывает возбуждение колебаний гребного вала. При увеличении зазора в дейдвудном подшипнике нарушается работа масляного клина, увеличивается коэффициент трения, что сопровождается повреждением опор скольжения и выходом из строя всего подшипника. Вибрация может приводить к появлению трещин в наборе корпуса судна и фундаментах опорных подшипников, разрушению подшипников дейдвуда и гребного вала. При систематическом измерении вибрации полученный частотный анализ позволяет определить характер неисправности и причины ее возникновения, что существенно повышает надежность дейдвудного устройства и предупреждает развитие дефекта. Измерение вибрации судовых механизмов и оборудования подробно описано в Правилах Российского морского регистра судоходства и активно применяется для контроля технического состояния в эксплуатации. Полученные результаты измерений сопоставляются с регламентируемыми в Правилах уровнями (категориями). Система контроля состояния судового валопровода, одобренная классификационными обществами, также рекомендует производить измерения вибрации дейдвудных подшипников в процессе эксплуатации для модифицированного (без выемки вала) освидетельствования дейдвудного устройства, что существенно оптимизирует расходы. К сожалению, в существующих Правилах и требованиях отсутствуют конкретные нормы вибрации дейдвудных устройств, учитывающие их конструктивные особенности, что не позволяет оценить состояние механизма. На основании многократных измерений вибрации дейдвудных устройств исследуемых судов проектов 2608 и 1907 и сопоставления полученных результатов с существующими стандартами осуществлен сбор данных для дальнейшей оценки их уровней и категорий состояния.

Ключевые слова: дейдвудное устройство, вибрация, пропульсивный комплекс, освидетельствование.

Введение

Нами были исследованы суда проектов 2608, 1907, имеющие двухвальные пропульсивные комплексы (ПК), конструктивно являющиеся подвесными [1]. Наблюдение за судами (табл. 1, рис. 1), осуществляется с 2014 г. по настоящее время и включает периодические измерения вибрации дейдвудных устройств (ДУ).

Таблица 1

Основные характеристики исследуемых судов

Параметр	**Характеристика**	
Тип судна	Буксир	
Проект	Damen stan tug 2608	Damen stan tug 1907
Год постройки	2011–2012 гг.	
Флаг	Россия	
Длина, м	26,16	19,34
Ширина, м	8,54	7,34
Осадка, м	4,05	3,10
Водоизмещение, т	380	193
Тяговое усилие, т	46,9	28,8
Максимальная скорость, уз	12,5	11,7
Модель ГД/суммарная мощность ГД, кВт	2 × Caterpillar 3512C TAC / 2460	2 × Caterpillar C32 TTA ACERTA / 1492
Модель редуктора/передаточное число	2 × Reintjes WAF 675L / 7.476:1	2 × Reintjes WAF 562L / 5.947:1
Винт/диаметр, мм	2 × ВФШ, выполнены в направляющей насадке / 2350	2 × ВФШ, выполнены в направляющей насадке / 1800
Модель дизель-генератора/мощность, кВт	2 × Caterpillar C4.4 T / 60	2 × Caterpillar C4.4 NA / 47
Тип дейдвудного устройства	Подвесное с замкнутой системой смазки (масло)	

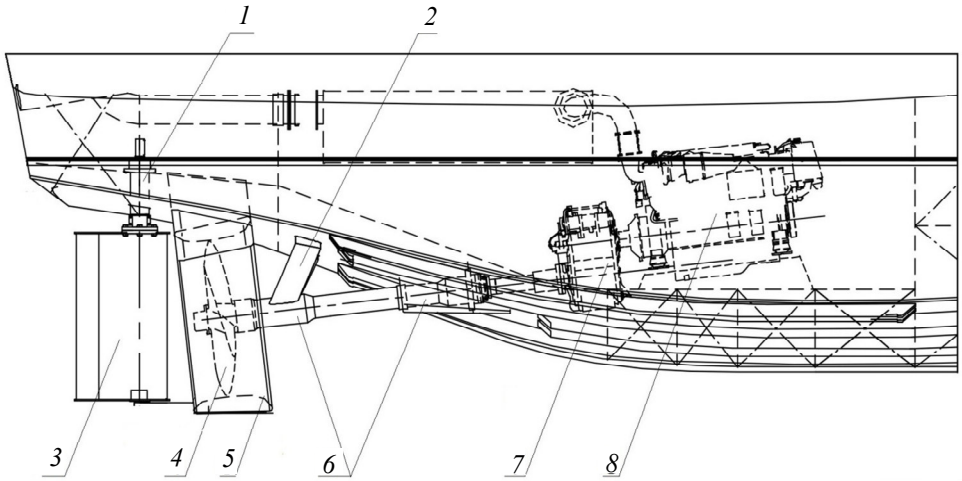

Рис. 1. Пропульсивный комплекс с подвесным дейдвудным устройством проектов 2608 и 1907 Damen stan tug: *1* – баллер; *2* – кронштейн валопровода; *3* – перо руля; *4* – винт; *5* – насадка; *6* – дейдвудная труба с подшипниками; *7* – редуктор; *8* – главный двигатель

Одновременно осуществляется сбор данных о режимах работы и эксплуатационных параметрах судов; результатах всех выполненных работ по техническому обслуживанию ПК; результатах освидетельствования судов, включая акты дефектации и ремонта; лабораторных анализах используемых масел, топлива и охлаждающих жидкостей. В период последнего планового докования на двух судах проекта 1907 была произведена разборка и демонтаж систем смазки и уплотнений дейдвудов, полумуфт гребных валов и винтов. Сделаны замеры дейдвудных подшипников и уплотнений (табл. 2 и 3).

Таблица 2

Результаты измерений дейдвудных подшипников при доковании

Модель дейдвудного подшипника	Проект судна	Расположение дейдвудного подшипника	Диаметральный зазор дейдвудного подшипника, мм			
			Измеряемый при доковании		Установочный	Допустимый
			Мин.	Макс.		
CY160LS	Damen stan tug 1907 (1)	ЛБ* (нос)	1,16	1,22	0,90–1,05	2,70
		ПБ (нос)	1,12	1,17		
		ЛБ (корма)	1,10	1,22		
		ПБ (корма)	1,10	1,20		
	Damen stan tug 1907 (2)	ЛБ (нос)	1,11	1,17		
		ПБ (нос)	1,08	1,17		
		ЛБ (корма)	1,07	1,22		
		ПБ (корма)	1,09	1,17		

* ЛБ – левый борт; ПБ – правый борт.

Таблица 3

Результаты измерений дейдвудных уплотнений при доковании

Модель дейдвудного уплотнения	Проект судна	Расположение дейдвудного уплотнения	Диаметральный зазор дейдвудного уплотнения, мм	
			Измеряемый при доковании	Допустимый
Simplex compact MK2M	Damen stan tug 1907 (1)	ЛБ (нос)	0,05	0,5
		ПБ (нос)	0,02	
		ЛБ (корма)	0,07	
		ПБ (корма)	0,04	
	Damen stan tug 1907 (2)	ЛБ (нос)	0,02	
		ПБ (нос)	0,04	
		ЛБ (корма)	0,05	
		ПБ (корма)	0,07	

Дейдвудное устройство (в разобранном виде) предъявлено администрации судна и инспекторам Российского морского регистра судоходства (РМРС).

Измерение и оценка уровней вибрации ДУ исследуемых судов в различных диапазонах частот в соответствии с существующими требованиями

Контроль вибрации производится лабораторией, признанной РМРС, в соответствии с положением Правил и техническими требованиями к выполнению измерений вибрации на морских судах [2]. Измерения вибрационных характеристик проводились опытным персоналом, прошедшим инструктаж по технике безопасности и имеющим документы, удостоверяющие квалификацию оператора, с помощью анализатора шума и вибрации SVAN 912A (Польша) и двухканального прибора для сбора данных и измерения вибрации PRUFTECHNIK VIBXPERT II (Германия). Данные приборы имеют действующие свидетельства, метрологическую аттестацию и допущены к применению. Контроль вибрации ДУ осуществлялся на свободной воде при волнении моря не более 3 баллов и прямолинейном движении судна на установившемся режиме, равном 90 % оборотов главного двигателя (ГД) (1 600 Гц). Измерения проводились в различных направлениях в зависимости от конструктивных особенностей дейдвудного устройства (*x* – горизонтальное продольное направление «нос-корма»; *y* – горизонтальное поперечное направление «борт-борт»; *z* – вертикальное направление). Схемы контрольных точек приведены на рис. 2 и 3.

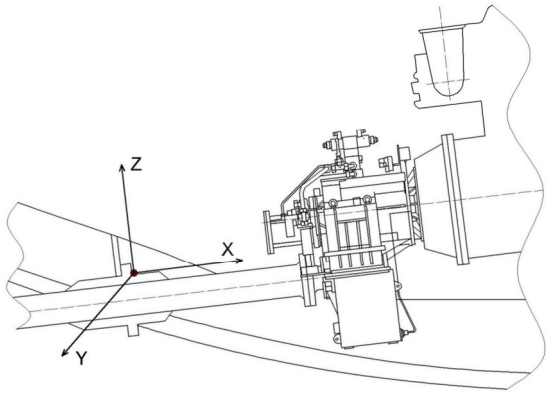

Рис. 2. Схема контрольных точек виброизмерений судового дейдвуда

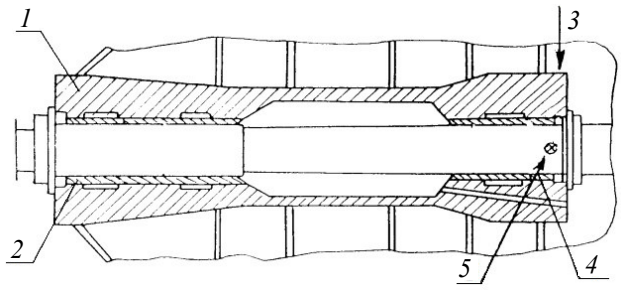

Рис. 3. Схема точек замера вибрации на дейдвудном устройстве:
1 – дейдвудная труба; *2* – кормовая втулка; *3* – точки и направления измерения вертикальной вибрации; *4* – носовая втулка; *5* – точка измерения горизонтальной вибрации

Анализ полученных результатов вибрационных измерений проводился с использованием персональных электронно-вычислительных машин и лицензионного программного обеспечения, что упрощает длительное хранение и обработку данных. Для обработки вибрационных сигналов на персональном компьютере использовалось быстрое преобразование Фурье с целью получения спектральных характеристик вибрационных сигналов в заданном частотном диапазоне (при фиксированном разрешении по частоте) и заданной достоверности (число усреднений). Обработка измерений вибрации ДУ производилась в соответствии с существующими требованиями.

1. Согласно Приложению 13 Правил РМРС [3] о положении по освидетельствованию дейдвудных устройств с масляной системой смазки произведено измерение виброскорости в различных направлениях в диапазоне частот (0,5÷10)*n*, где *n* – частота вращения гребного вала, Гц (рис. 4).

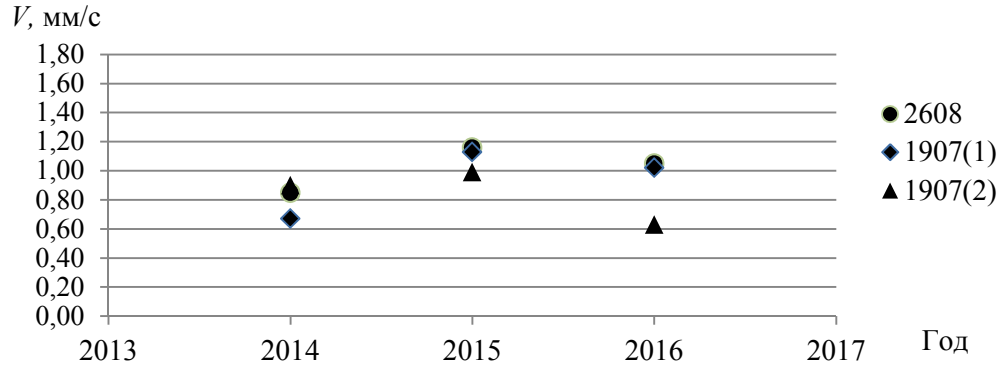

Рис. 4. График результатов измерений вибрации дейдвудных устройств исследуемых судов, 1/3 октавы, интервал (0,5÷10)*n*

Для судов проекта 2608 (*n* = 3,57 Гц) расчет среднеквадратического значения (СКЗ) виброскорости осуществлялся в диапазоне частот 1,6–40 Гц; для судов проекта 1907 (*n* = 4,48 Гц) в диапазоне частот 2–50 Гц с шириной частотной полосы 0,73 Гц. Норма допустимых значений не должна превышать 1,8 мм/с.

2. С использованием ГОСТ контроля состояния машин на невращающихся частях [4], в котором изложены общие руководящие принципы измерений, и оценки механической вибрации статорных элементов машин, рассчитывались СКЗ частот в фиксированном диапазоне 10–1000 Гц, который полностью охватывает частотный спектр колебаний дейдвудного устройства (рис. 5).

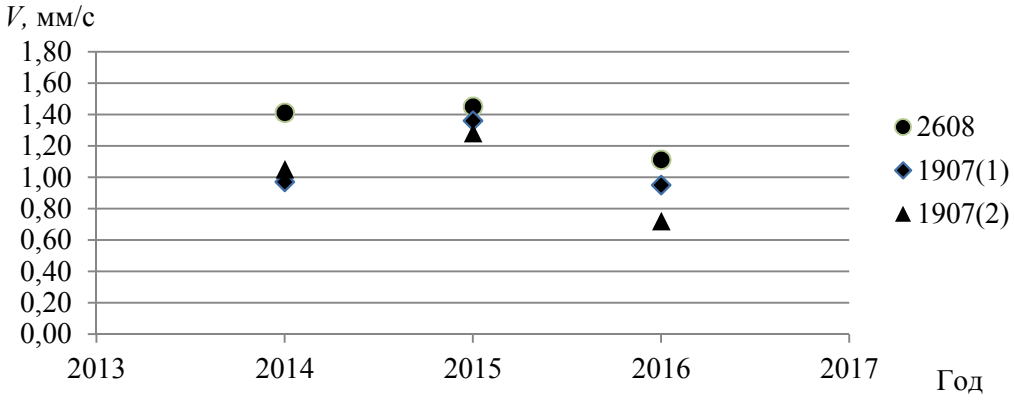

Рис. 5. График результатов измерений вибрации дейдвудных устройств исследуемых судов, СКЗ 10–1000 Гц

На основании ГОСТ [4] дейдвудное устройство относится к 3-му классу машин, т. е. к мощным первичным двигателям и другим мощным машинам с вращающимися массами, установленным на массивных фундаментах, относительно жестких в направлении измерения вибрации. Данный стандарт регламентирует четыре основных состояния машин по вибрационным параметрам:

– A: в эту зону попадают, как правило, новые машины, только что введенные в эксплуатацию (до 1,8 мм/с);

– B: машины, попадающие в эту зону, обычно считают пригодными для дальнейшей эксплуатации без ограничения сроков (1,8–4,5 мм/с);

– C: машины, попадающие в эту зону, обычно рассматривают как непригодные для длительной непрерывной эксплуатации. Обычно данные машины могут функционировать ограниченный период времени, пока не появится подходящая возможность для проведения ремонтных работ (4,5–11,2 мм/с);

– D: уровни вибрации в данной зоне рассматривают как достаточно серьезные, ведущие к повреждению машины (от 11,2 мм/с).

3. Согласно требованиям Правил РМРС к выполнению измерений вибрации на морских судах [2] расчет результатов вибрации ДУ проводился в среднегеометрической частоте третьоктавной полосы, равной частоте вращения гребного вала (*n*) (рис. 6).

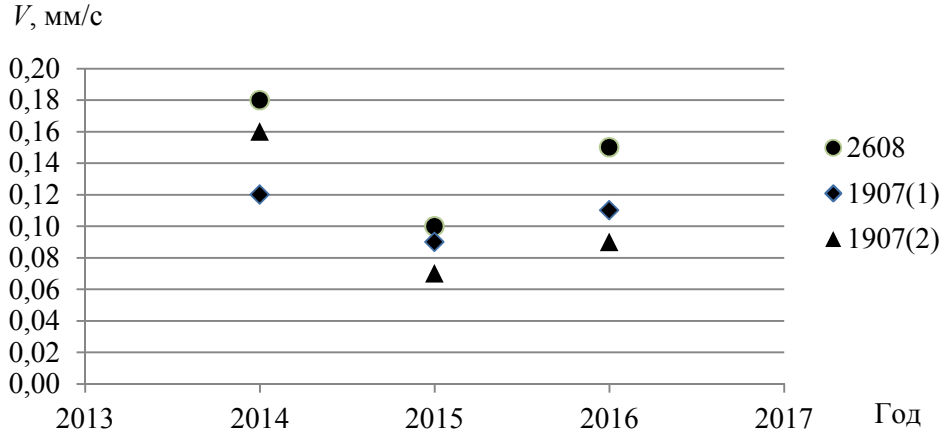

Рис. 6. График результатов измерений вибрации дейдвудных устройств исследуемых судов, 1/3 октавы от *n*

Этот интервал лежит в пределах 3,5–4,4 Гц для судна проекта 2608 и 4,4–5,6 Гц для судов проекта 1907. Нормы, предназначенные для оценки допустимости фактических уровней вибрации механизмов и оборудования судов при постройке (после ремонта) и судов в эксплуатации по результатам измерений параметров их вибрации, описаны в Правилах классификации и постройки морских судов [5], но, к сожалению, они не распространяются на дейдвудные устройства. Если сравнивать полученный результат при расчете среднегеометрической частоты в третьоктавной полосе с любыми регламентируемыми в Правилах [5] нормами, то для дейдвудных устройств исследуемых судов это значение кратно меньше.

4. По правилам классификационного общества DNVGL [6] при освидетельствовании гребных валов рекомендуется проводить расчет СКЗ виброскорости в диапазоне частот от 2 до 100 Гц (рис. 7).

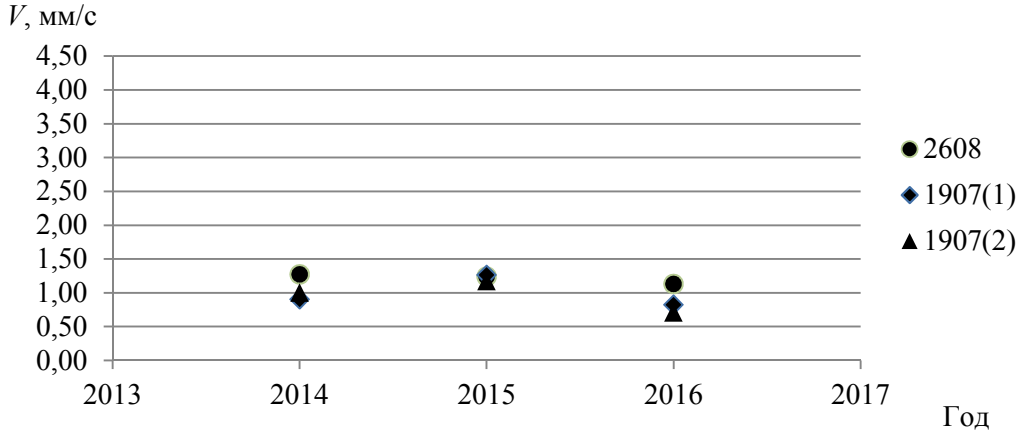

Рис. 7. График результатов измерений вибрации дейдвудных устройств исследуемых судов, СКЗ 2–100 Гц

Нормы собственной вибрации гребного вала в районе дейдвудного подшипника не должны превышать 4,5 мм/с.

Заключение

В настоящее время, согласно Правилам классификационных освидетельствований [7] и Приложениям [3], при условии внедрения и поддержания на судне документированной системы контроля состояния валопровода (КСВ) разрешается производить модифицированное (без выемки дейдвудного вала) освидетельствование ДУ, что существенно снижает расходы судовладельца при освидетельствовании. На основании существующих требований произведенный виброконтроль дейдвудных подшипников исследуемых судов, который является дополнительным требованием системы КСВ, характеризует состояние ДУ как «хорошее». Согласно акту дефектации дейдвудных подшипников и уплотнений диаметральные зазоры и выработки сравнимы с установочными (см. табл. 2 и 3), что подтверждает отсутствие целесообразности полной разборки (с выемкой дейдвудного вала) ДУ. Частотный анализ сигнала вибрации помогает определить характер неисправности и причины ее возникновения, что позволяет предотвращать аварийные случаи и повысить надежность дейдвудного устройства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *ГОСТ ИСО 24154-80*. Валопроводы судовые. Термины и определения. М.: Изд-во стандартов, 2003. 5 с.
2. *НД № 2-020101-040*. Правила технического наблюдения за постройкой судов и изготовлением материалов и изделий для судов. СПб.: Рос. мор. регистр судох-ва, 2016. 190 с.
3. *НД № 2-03010101-009*. Приложения к руководству по техническому наблюдению за судами в эксплуатации. СПб.: Рос. мор. регистр судох-ва, 2016. 292 с.
4. *ГОСТ Р ИСО 10816-1-97*. Контроль состояния машин по результатам измерений вибрации на невращающихся частях. М.: ФГУП «Стандартинформ», 2009. 13 с.
5. *НД № 2-020101-095*. Правила классификации и постройки морских судов. СПб.: Рос. мор. регистр судох-ва, 2017. 137 с.
6. *Rules* for classification: Ships. Pt. 4 Ch. 4. URL: DNVGL-RU-SHIP-Pt2Ch4.pdf.
7. *НД 2-020101-012*. Правила классификационных освидетельствований судов в эксплуатации. СПб.: Рос. мор. регистр судох-ва, 2017. 460 с.

Статья поступила в редакцию 15.12.2017

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Родыгин Владимир Васильевич – Россия, 353918, Новороссийск; Государственный морской университет им. адмирала Ф. Ф. Ушакова; аспирант кафедры судовых тепловых двигателей; rodyginw@inbox.ru.

Николаев Николай Иванович – Россия, 353918, Новороссийск; Государственный морской университет им. адмирала Ф. Ф. Ушакова; д-р техн. наук, профессор; профессор кафедры судовых тепловых двигателей; rodyginw@inbox.ru.

Гриценко Михаил Викторович – Россия, 353900, Новороссийск; ООО «КБ Инжиниринг»; канд. техн. наук; ведущий специалист; gmluft@kbinov.ru.

V. V. Rodygin, N. I. Nikolaev, M. V. Gricenko

EVALUATION OF VIBRATION LEVELS OF THE STERN GEAR WITH OIL LUBRICATION

Abstract. Periodic changes in the torque of the shaft line caused by the engine and uneven hydrodynamic resistance of the propeller are accompanied by vibration of the stern gear. The increased clearance because of loose fit of the stern bearing provokes vibrations of the shaft. With increasing clearance in the stern bearing, lubrication is interrupted, the constant of friction increases, which is accompanied by damage of sliding supports and failure of the bearing. Vibration can result in cracks in

the ship's hull and foundation of the support bearings, damage of the stern bearing and the propeller shaft. With systematic measurement of vibration, the frequency analysis obtained allows to determine the nature of the fault and the causes of its occurrence, which greatly improves the reliability of the stern gear and prevents the developing defect. Measuring vibration of ship mechanisms and equipment is described in the Rules of the Russian Maritime Register of Shipping and used actively to monitor the technical condition of ships. The obtained results of vibration measurements are compared to the levels (categories) of the Rules. The ship shaft inspection system, approved by the classification societies, also recommends measuring vibrations of the stern bearings in operation for a modified (without shaft withdrawal) examination of the stern gear, which significantly reduces the costs. Unfortunately, the Rules and requirements do not contain standards for stern gear vibrations, taking into account their design features, which makes impossible to assess the condition of the mechanism. According to the measuring stern gear vibrations onboard the vessels projects 2608 and 1907 and to the comparison of results to the existed standards, there have been collected data for further evaluation of the levels and categories of the stern gear condition.

Key words: stern gear, vibration, propulsion system, examination.

REFERENCES

1. GOST ISO 24154-80. *Valoprovody sudovye. Terminy i opredeleniia* [GOST ISO 24154-80. Ship shaft line. Terms and definitions]. Moscow, Izd-vo standartov, 2003. 5 p.

2. ND № 2-020101-040. *Pravila tekhnicheskogo nabliudeniia za postroikoi sudov i izgotovleniem materialov i izdelii dlia sudov.* [RD No.2-020101-040. Monitoring and Maintenance Rules of ship construction and manufacturing supplies for ships]. Saint-Petersburg, Rossiiskii morskoi registr sudokhodstva, 2016. 190 p.

3. ND № 2-03010101-009. *Prilozheniia k rukovodstvu po tekhnicheskomu nabliudeniiu za sudami v ekspluatatsii* [RD No.2-03010101-009. Appendices to the manual on monitoring and maintenance of the ships in operation]. Saint-Petersburg, Rossiiskii morskoi registr sudokhodstva, 2016. 292 p.

4. GOST R ISO 10816-1-97. *Kontrol' sostoianiia mashin po rezul'tatam izmerenii vibratsii na nevrashchaiushchikhsia chastiakh* [GOST R ISO 10816-1-97. Control over condition of mechanisms, according to the results of measuring vibration on stationary parts]. Moscow, FGUP «Standartinform», 2009. 13 p.

5. ND № 2-020101-095. *Pravila klassifikatsii i postroiki morskikh sudov* [RD No.2-020101-095. Rules for classification and construction of sea-going ships]. Saint-Petersburg, Rossiiskii morskoi registr sudokhodstva, 2017. 137 p.

6. *Rules for classification: Ships. Pt. 4 Ch. 4.* Available at: DNVGL-RU-SHIP-Pt2Ch4.pdf.

7. ND 2-020101-012. *Pravila klassifikatsionnykh osvidetel'stvovanii sudov v ekspluatatsii* [RD No. 2-020101-012. Rules for classification surveys of ships under operation]. Saint-Petersburg, Rossiiskii morskoi registr sudokhodstva, 2017. 460 p.

The article submitted to the editors 15.12.2017

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Rodygin Vladimir Vasilievich – Russia, 353918, Novorossiysk; Admiral Ushakov Maritime State University; Postgraduate Student of the Department of Ship Engines; rodyginw@inbox.ru.

Nikolaev Nikolay Ivanovich – Russia, 353918, Novorossiysk; Admiral Ushakov Maritime State University; Doctor of Technical Sciences, Professor; Professor of the Department of Ship Engines; rodyginw@inbox.ru.

Gricenko Michail Victorovich – Russia, 353900, Novorossiysk; KbEngineering; Candidate of Technical Sciences; Leading Specialist; gmluft@kbinov.ru.