

УДК 621.8

А. Н. Михайлов, д-р техн. наук, проф., **А. В. Костенко**, канд. техн. наук, доцент,
А. В. Лукичев, канд. техн. наук, доцент, **Е. А. Степанова**, доцент
Донецкий национальный технический университет
Камчатский государственный технический университет,
Тел. +38 (062) 3050104; e-mail: tm@fimm.donntu.org

К ВОПРОСУ ОБ ОСОБЕННОСТЯХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРОИЗВОДСТВА ДЕТАЛЕЙ СУДОВЫХ ДИЗЕЛЕЙ

Проанализированы условия работы подвижных деталей судовых дизельных двигателей. Приведены неисправности и причины неисправностей подвижных деталей. Выделены наиболее нагруженные детали. Показана схема процесса преобразования эксплуатационных свойств деталей. Показаны процессы изменения эксплуатационных свойств деталей и соответствующие им способы упрочнения. Приведена и описана общая схема деления деталей по уровням глубины технологии.

Ключевые слова: дизель судовой, функционально-ориентированная технология, деталь, неисправность, функциональный элемент, структура иерархическая.

A. Mikhailov, A. Kostenko, A. Lukichov, E. Stepanova

TO THE QUESTION OF DESIGN FUNCTIONALLY-ORIENTED TECHNOLOGIES FEATURES OF PRODUCTION MARINE DIESEL ENGINE PARTS

In the article the working conditions of the moving parts of marine diesel engines are analyzed. The fault and fault causes the moving parts are given. The most loaded parts are selected. The diagram of transformation process of operational properties parts is shown. The process of changing the detail operational properties and their corresponding methods of hardening. The general scheme of detail division according to the levels of depth technology is shown and described.

Keywords: diesel ship, functionally-oriented technology, detail, defect, functional element, hierarchical structure.

Введение

Функционально-ориентированные технологии (ФОТ) позволяют повысить качество деталей судовых дизелей, привести их срок службы в соответствие с принципом единовременной полной выработки срока эксплуатации (ЕПВСЭ) всех деталей (или кратности периоду срока службы). Изучение служебного назначения деталей и определяемых этим назначением условий эксплуатации (эксплуатационных функций) является одной из главных задач при проектировании процессов изготовления деталей на базе ФОТ [1].

Дизельный двигатель внутреннего сгорания (ДВС) представляет собой сложную систему, состоящую из большого числа узлов, механизмов и деталей. При работе на каждую деталь, из которых состоят узлы и механизмы, на каждую поверхность этой детали действует пространственно распределенная и динамически изменяющаяся нагрузка – определяемая эксплуатационными функциями. Наибольшим удельным нагрузкам дизельных ДВС и наиболее сложным условиям эксплуатации подвержены детали кривошипно-шатунного механизма, поршневой группы, механизма газораспределения, газотурбокомпрессора. Одновременно эти детали являются и самыми ответственными деталями дизельных ДВС. Решить задачу реализации принципа ЕПВСЭ только конструкторскими методами решить практически невозможно. Необходимо исполь-

зывать идеологию единства конструкторской технологической подготовки, обеспечивая заданные свойства деталей за счет ФОТ

Целью статьи является анализ особенностей эксплуатации судовых дизелей, выявление наиболее подверженных отказам и наиболее нагруженных деталей судовых дизелей, к которым применимы методы ФОТ и классификация их эксплуатационных функций.

Обзор публикаций

В работе [2] выполнен анализ нагруженности неподвижных деталей судового дизеля и определены наиболее нагруженные, в работе [3] рассмотрен случай аварийного происшествия и проанализированы причины повреждения дизеля, указано, что отказы поршней приводят к наиболее тяжелым авариям судовых дизелей. В работе [4] показаны особенности действующих напряжений узла трения «поршневое кольцо-канавка поршня», а в [5] проведен анализ состояния деталей цилиндропоршневой группы судовых дизелей, выявлены основные причины отказов этих деталей, определено, что поршневые компрессионные кольца являются наиболее изнашиваемыми и ответственными деталями. Проблеме оценки теплонапряженности деталей судового двигателя посвящена работа [6]. Причины отказов коленчатых валов судовых среднеоборотных дизелей изучены в [7], где установлено, что основными причинами являются износ и задир шеек. В [8] на примере отказа двигателя показаны причины отказа коленчатого вала из-за усталостного выкрашивания и фреттинг-коррозии подшипников скольжения. Работа [9] посвящена восстановлению выпускных клапанов судовых дизелей, в частности приведены эксплуатационные факторы, действующие на клапаны и причины поломок клапанов. В работах [10,11] проанализированы неисправности узлов и деталей судовых дизелей, указаны причины этих неисправностей, приведены примеры наиболее часто встречающихся неисправностей.

Таким образом, в этих работах рассмотрены аспекты теории надежности судовых агрегатов, которые определяют основные показатели их надежности и направления повышения этих показателей. Очевидно, что наиболее эффективным направлением повышения надежности являются технологические методы их изготовления, особенно опирающиеся на всесторонний анализ эксплуатационных функций, т.е. ФОТ.

Основное содержание

К наиболее нагруженным деталям кривошипно-шатунного механизма и поршневой группы относятся поршень, поршневые компрессионные кольца, коленчатый вал и шатун; наиболее нагруженной деталью ГРМ – выпускной клапан; самой нагруженной частью системы газоотвода является турбокомпрессор. Эти же детали подвержены самым частым отказам, что повышает затраты на техническую эксплуатацию, а значит и повышает стоимость жизненного цикла. Ниже будут приведены условия работы переносимых элементов, неисправности и причины неисправностей.

Поршень подвергается воздействию больших механических и термических нагрузок. Механические нагрузки возникают под действием силы давления газов и силы инерции. Сила давления газов вызывает деформацию днища и стенки поршня, а сила инерции стремится разорвать шпильки крепления головки или днища (в составных поршнях). Термические нагрузки обусловлены непосредственным соприкосновением головки поршня с горячими газами. У двухтактных дизелей с контурной схемой газообмена неравномерный нагрев поршня приводит к значительной асимметрии температурного поля относительно его оси и возникновению дополнительных термических напряжений.

В табл. 1 приведены возможные неисправности поршней и их причины.

Таблица 1. Неисправности поршней и их причины

Возможные неисправности	Причины неисправностей
Коррозия поверхностей трения	Соприкосновение с агрессивными средами или с их парами
Выгорание и сдувание металла с доньшка	Чрезмерные перегрузки дизеля; плохое распыливание топлива; недостаточное охлаждение доньшка поршня; нарушение структуры металла
Отставание азотированного покрытия на тронке поршня	Низкое качество покрытия, механическое повреждение
Чрезмерная выработка и выкрашивание металла канавок под поршневые кольца	Закоксовывание поршневых колец; недостаточное охлаждение поршня; нарушение системы смазывания; поломка поршневых колец; перегрузка дизеля
Коррозия внутренней полости головки при водяном охлаждении	Неправильная подготовка охлаждающей воды, использование воды высокой или пониженной жесткостью
Трещины на доньшке стальной головки поршня	Температурные воздействия, низкое качество металла
Интенсивное изнашивание тела поршня	Нарушение центровки поршня; недостаточное количество смазочного материала; низкое качество масла и топлива; закупорка трубок-каналов подвода масла; попадание воды; нарушение распыления и направления подачи топлива
Трещины в головке поршня по буртам около отверстий под установку рымов (наблюдается часто у поршней из алюминиевых сплавов)	Чрезмерные напряжения при сверлении, нарезании резьбы и завертывании рымов в неочищенное от загрязнений отверстие; температурные воздействия
Появление трещин на доньшке головки со стороны охлаждения	Напряжение при деформировании от чрезмерного нагрева; подвод охлаждающей жидкости, на горячую поверхность; упор ребра турбулизатора в доньшко, чрезмерные силы при сборке вследствие обжата

Компрессионные кольца прижимаются к зеркалу под действием силы собственной упругости и силы давления газов, проникающих между поршнем и цилиндром в надкольцевое и закольцевое пространства. Это приводит к тому, что верхнее кольцо прижимается наиболее сильно, кроме того, оно же работает в области самых высоких температур. Таким образом, наблюдается неравномерный износ колец в зависимости от места расположения.

Коленчатый вал передает крутящий момент и воспринимает нагрузки, создаваемые силами давления газов и инерции поступательно движущихся и вращающихся масс. Эти силы определяют наличие в валах циклически действующих сжимающих и растягивающих нагрузок и переменных скручивающих и изгибающих моментов. Составляющие силы, производной от суммы сил давления газов и инерции, тангенциальная и радиальная и их реакции на рамовых подшипниках изгибают шатунную шейку, щеки кривошипа и рамовые шейки. Крутящий момент, передаваемый от соседних цилиндров, скручивает левую рамовую и мотылевую шейки цилиндра. Правая рамовая

шейка скручивается суммой подходящего момента и момента, создаваемого касательной силой цилиндра. На коленчатый вал действуют неуравновешенные силы инерции поступательно движущихся и вращающихся масс и их моменты. Особое место в нагружении вала и его поломках вызывают крутильные и осевые колебания вала, создаваемые переменным крутящим моментом. Наиболее опасную величину напряжения кручения приобретают при резонансе вынужденных и собственных колебаний вала. Опасными местами, где чаще всего действуют концентраторы напряжения, являются галтели перехода шеек к щекам, испытывающие попеременные напряжения сжатия и расширения. В табл. 2 приведены возможные неисправности коленчатых валов и их причины.

Таблица 2. Неисправности коленчатых валов и их причины

Возможные неисправности	Причины неисправностей
Трещины, риски и забоины на шейках и галтелях, на щеках	Литейные дефекты, заковы, закаты, низкая точность обработки, механические повреждения, температурные воздействия, перераспределение напряжений при перегрузках
Коррозия шеек	Нарушение условий хранения; наличие агрессивных сред или их паров; обводнение или окисление смазочного материала
Выпучивание металла около отверстия подвода смазочного материала к шейке	Заклинивание вкладыша при вращении коленчатого вала или соприкосновение пальца с торцом постели; в результате действия силы от валоповоротного устройства; смятие шейки вала
Чрезмерный износ шеек	Применение несоответствующих смазочных материалов — с большим содержанием механических примесей, абразивов и воды вследствие аэрации масла; коррозия шеек; неправильная укладка коленчатого вала; несоответствие антифрикционного металла
Ослабление шпоночного паза	Установка шестерни на шпонке с зазором или превышение размера паза по сравнению с размером шпонки; чрезмерная перегрузка, дефект металла вала или шпонки
Откалывание металла около шпоночного паза	Дефект металла; отсутствие в шпоночном пазу галтели; наличие подрезов на галтели
Ступенчатый износ шатунной шейки, несущей два шатуна	Неравномерное распределение нагрузки по цилиндрам; неоднородность металла; попадание механических примесей

Нагрузка шатунов определяются действием сил давления газов и сил инерции поступательно-движущихся и вращающихся масс. Нижняя часть верхней головки шатуна и верхняя часть нижней головки подвергаются сжатию, а стержень сжатию и продольному изгибу. Кроме того, в 4-х тактном двигателе при изменении знака суммарной силы за счет изменения направления силы инерции поступательно движущихся масс (вверх) верхняя часть верхней головки шатуна подвергается сжатию, разрыву и изгибу, стержень шатуна – разрыву, нижняя часть головки – сжатию и изгибу. Самой распро-

страненной неисправностью шатунов являются трещины на теле и головке шатуна из-за механических повреждений или вследствие температурных воздействий.

Клапаны подвергаются действию механических и тепловых нагрузок. Механические нагрузки определяются действием сил давления газов в цилиндре, сил воздействия привода газораспределения, сил инерции масс привода и клапана, силы упругости пружины. При отрыве ролика толкателя от кулачка появляются динамические удары в приводе клапана и клапана о седло. Тепловые нагрузки на клапаны определяются условиями их работы в зоне высоких температур газов. Очевидно, что наибольшие температуры имеют выпускные клапаны. В табл. 3 приведены возможные неисправности выпускного клапана и их причины.

Таблица 3. Неисправности выпускного клапана и их причины

Возможные неисправности	Причины неисправностей
Трещины и риски на фаске клапана	Низкое качество наплавки фаски; скрытый дефект в материале; температурные напряжения; механические ударные воздействия
Коробление или местное нарушение герметичности тарелки	Образование на фаске свищей, т. е. частичное отставание наростшего слоя продуктов сгорания (плакировка), что вызывает пропуск газов и неравномерность температуры тарелки; коррозионные разрушения, механические повреждения; местное выгорание
Выработка, наклеп на фаске и седле	Естественное изнашивание; ударные нагрузки
Увеличение зазора между клапаном и направляющей втулкой	Низкое качество уплотнения; естественное изнашивание
Ослабление седла в крышке или вставке	Установка седла без соответствующего натяга или низкое качество завальцовки; грубая обработка поверхности под посадку седла, трещины и другие дефекты в седле
Повреждение или коррозия седла, выполненного за одно целое с крышкой	Дефекты материала крышки; использование высокосернистого топлива; механические повреждения

Газотурбокомпрессоры предназначены для повышения мощности судовых дизелей, при этом для нагнетания воздуха используются отработавшие газы. Это влечет за собой достаточно большие термические и механические нагрузки на детали турбокомпрессоров. При изготовлении деталей турбокомпрессоров могут использовать более десятка марок сталей, чугуна и сплавов [12]. К самым сложно нагруженным деталям относятся ротор с турбинами и подшипниками. Пары трения «вал ротора турбины – подшипник» и «средний корпус – подшипник» являются к самыми слабыми звеньями. Дополнительно следует отметить, что ротор является одним из самых ответственных узлов, а ресурс всего турбокомпрессора зависит от срока службы лопаток ротора. Аналогичная ситуация с лопатками газотурбинных двигателей (ГТД). В таблице 4 приведены возможные неисправности турбокомпрессоров и их причины.

Общим для рассмотренных выше деталей является то, что на них действуют различные эксплуатационные функции, что приводит к снижению эксплуатационных свойств изделий или к поломке. Таким образом, речь идет о процессах, во время проте-

Таблица 4. Неисправности турбокомпрессоров и их причины

Возможные неисправности	Причины неисправностей
Трещины в корпусе газовой турбины или компрессора	Низкое качество сварки, отливки; дисбаланс ротора; вибрация
Нарушение прилегания соплового аппарата к корпусу турбины	Коробление поверхностей
Ослабление посадки подшипников в корпусе	Превышение допусков размеров гнезд и подшипников, а также параметра шероховатости поверхностей
Биение ротора	Неравномерное изнашивание подшипников; повреждение лопаток; дисбаланс ротора
Изнашивание опорных подшипников	Неуравновешенность ротора; ослабление посадки подшипников; естественное изнашивание
Риски и забоины на поверхностях шеек вала	Механические повреждения; недостаточная очистка смазочного материала
Разрушение лопаток	Коррозия; механические повреждения

кания которых происходит изменение эксплуатационных свойств деталей. Знание вида и характера протекания этих процессов [13] позволяет назначать соответствующие способы упрочнения (табл.5).

Таблица 5. Процессы, во время протекания которых происходит изменение эксплуатационных свойств деталей и средства упрочнения

Группа	Процессы	Средства упрочнения
I	Изменение состояния и свойств материала деталей под действием повторно-переменных напряжений при больших циклах перемен нагрузок, работающих в нормальных условиях	Применение качественных материалов, повышение твердости и прочности рабочих поверхностей деталей и создание остаточных напряжений сжатия в поверхностных слоях деталей
II	Изменение состояния и свойств материала деталей под действием повторно-переменных напряжений при больших циклах перемен нагрузок, работающих в условиях коррозионных сред	Применение качественных коррозионностойких материалов; нанесение на рабочие поверхности, предварительно упрочненные наклепом, антикоррозионных покрытий
III	Контактная усталость рабочих поверхностей деталей с образованием микротрещин, оспин, шелушения и других дефектов	Повышение механических свойств рабочих поверхностей деталей машин и создание равномерной структуры и напряженности в них; применение смазок со специальными присадками
IV	Механический (главным образом абразивный) износ, механическое выламывание частиц, пластическое деформирование	Увеличение твердости рабочих поверхностей деталей и повышение содержания в составе стали карбидообразующих элементов
V	Молекулярно-механические про-	Повышение твердости поверхности

	цессы, вызывающие схватывание металлов при трении, вырывание частиц металла с поверхности одной детали и наволакивание их на другую, что ведет к появлению на рабочих поверхностях рисок и задиров (заедание)	трущихся нар и создание таких температурных условий работы, при которых не происходит снижения твердости поверхности. Не допускать в работу трущиеся пары без смазки
VI	Коррозионные процессы, сопровождаемые механическими процессами (коррозионно-механический износ)	Нанесение на рабочие поверхности деталей слоя металлов большой твердости и слабо подвергающегося окислению. Повышение чистоты поверхности; устранение неравномерности остаточных напряжений, особенно в тонком поверхностном слое

Одним из характерных отличий функционально-ориентированных технологий является необходимость разбивки деталей на отдельные функциональные элементы, причем выполнять это можно на нескольких иерархических уровнях: всей детали, участков, составляющих, зон, макрозон, микрозон, нанозон [14]. Это позволяет назначить для каждого участка (функционального элемента) детали соответствующее технологическое воздействие исходя из той эксплуатационной функции, которая действует на этом участке. Если учесть, что зарождение процессов разрушения и износа в подавляющем большинстве случаев начинаются на отдельных участках деталей, то выделение этого участка на соответствующем иерархическом уровне позволяет прецизионно назначать определенные технологические воздействия. На рис. 1 показана схема, иллюстрирующая, что после начала эксплуатации под действием эксплуатационных функций происходит изменение эксплуатационных свойств детали или преобразование вектора X , который представляет собой набор параметров X_i , в вектор Y , представляющий соответственно набор конечных параметров детали Y_i .

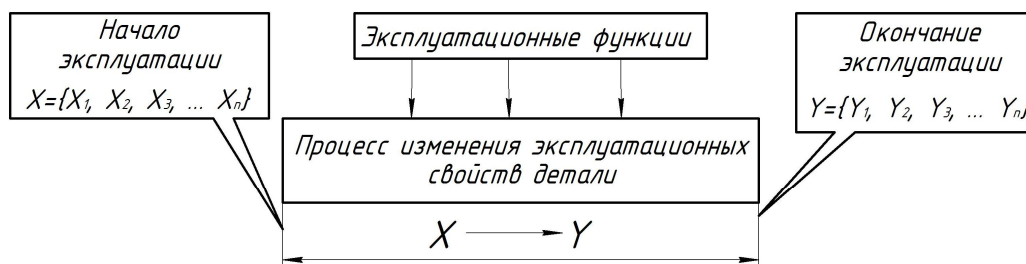


Рисунок 1. Схема процесса преобразования эксплуатационных свойств деталей судовых дизелей: X_i – начальные (заданные) свойства детали; Y_i – конечные свойства детали.

Дополнительно следует заметить, что функционально-ориентированные технологии позволяют решить актуальную задачу обеспечения оптимальной долговечности деталей машин, что является одним из важнейших направлений повышения конкурентоспособности продукции отечественного машиностроения [15].

На рис. 2 показана иерархическая структура деления детали по уровням глубины технологии.

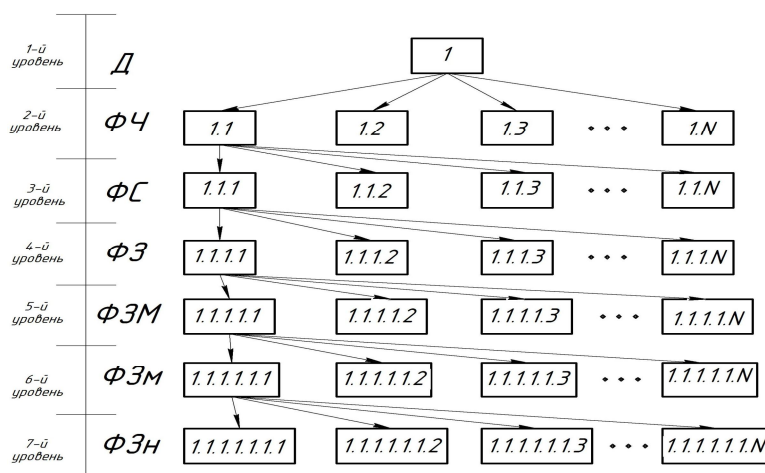


Рисунок 2. Иерархическая структурная схема деления детали по уровням глубины технологии

Как видно на рис. 2, 1-й иерархический уровень соответствует уровню всей детали (Д), т.е. на этом уровне рассматривается деталь в целом, в частности анализируется целевая функция, служебное назначение, место установки и др.

2-й уровень – это уровень функциональных частей (ФЧ), на которые делится деталь. Причем деление может происходить достаточно произвольно, но обязательно обоснованно, например, в зависимости от действующих эксплуатационных функций или по функциональному назначению частей детали.

3-й уровень – функциональные составляющие (ФС), при этом различают семь видов составляющих: поверхностные точки, объемные точки, поверхностные линии, объемные линии, поверхности, поверхностные слои, объемы. Размеры составляющих зависят от эксплуатационных параметров детали.

4-й уровень – функциональные зоны (ФЗ), образующиеся в результате деления составляющих третьего уровня. Зоны соответственно также могут быть семи видов по аналогии с составляющими, т.е. также являются точками, линиями, поверхностями и объемами.

5-й уровень – функциональные макрозоны (ФЗМ), образуются в результате деления функциональных зон, могут быть также семи видов.

6-й и 7-й уровни – функциональные микрозоны (ФЗМ) и нанозоны (ФЗН) соответственно. Образуются в результате дальнейшего деления макрозон и микрозон.

Предлагаемая на рис. 2 идентификация составляющих элементов представляет собой семиразрядный номер, каждый разряд которого соответствует иерархическому уровню, что позволяет однозначно определять каждый элемент. Отметим, что согласно [1] размеры макрозон составляют 10...1000 мкм, микрозон – 0,1...10 мкм, нанозон – 1...100 нм. Глубина деления деталей выбирается технологом при разработке функционально-ориентированного технологического процесса в зависимости от требуемых эксплуатационных свойств деталей, имеющегося оборудования и др. факторов.

Заключение

Проектирование и реализация ФОТ позволяет реализовывать заранее установленный заданно высокий уровень качества деталей и предполагает тщательное изучение условий эксплуатации. На основе этого каждая ответственная деталь делится на функциональные элементы. На следующем этапе в соответствии с осуществленным делением назначается совокупность соответствующих технологических воздействий, направленных на создание требуемой совокупности эксплуатационных свойств деталей

любых механизмов. Рассмотрены эти принципы на примере деталей и узлов дизельных судовых ДВС.

ЛИТЕРАТУРА

1. Михайлов, А. Н. Основы синтеза функционально-ориентированных технологий машиностроения: монография / А. Н. Михайлов. – Донецк: ДонНТУ, 2009. – 346 с.
2. Костенко, А. В. Синтез структуры функционально-ориентированного процесса изготовления цилиндрических втулок на основе анализа работы судовых дизелей / А. В. Костенко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. – 2017. – Т. 9. – № 1. – С. 176-186.
3. Глазюк, Д. К. Аварийное происшествие с главным судовым дизелем 6ЧНСП 18/22-600 в эксплуатации / Д. К. Глазюк, А. Н. Соболенко // Научные труды Дальрыбвтуза. – 2011. – Т.23. – С. 109-112.
4. Безюков, А. К. Исследования напряжения поршневого кольца и канавки поршня судового дизеля при максимальном давлении сгорания / А. К. Безюков, Н. Б. Ганин, М. Б. Мяконьков // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова.– 2011. – №4. – С. 48-51.
5. Казаков, С. С. Лазерное упрочнение поршневых колец дизелей как способ повышения износостойкости / С. С. Казаков, В. В. Гоева // Карельский научный журнал. – 2015. – №2(11). – С. 120-123.
6. Лепский, А. Г. Анализ возможности формирования интегрального показателя для оценки теплонапряженности деталей судового двигателя / А. Г. Лепский, А. А. Дамаскин // Вестник МГТУ. – 2008. – Т.11 – №3. – С. 451-457.
7. Леонтьев, Л. Б. Причины отказов коленчатых валов судовых среднеоборотных дизелей и пути повышения их надежности / Л. Б. Леонтьев, А. Г. Токликишвили // Вестник инженерной школы ДВФУ. – 2012. – №3(12). – С. 40-47.
8. Гинда, О. П. Анализ отказа судового среднеоборотного двигателя / О. П. Гинда, Д. С. Тормашев, А. П. Шрамко // Вестник государственного морского университета им. Адмирала Ф.Ф. Ушакова. – 2014. – №3(8). – С. 27-31.
9. Ворохобин, С. В. Восстановление клапанов судовых дизелей / С. В. Ворохобин // Вестник МГУ им. адм. Г.И. Невельского. – 2016. – №74. – С. 24-28.
10. Крылов, Е. И. Ремонт дизелей морских судов: справочник / Е. И. Крылов. – М.: Транспорт, 1987. – 302 с.
11. Возницкий, И. В. Повреждения и поломки дизелей. Примеры и анализ причин / И. В. Возницкий. – 2-е изд., перераб. – СПб.: Моркнига, 2006. – 116 с.
12. Технология ремонта турбокомпрессоров типа ТКР-11 созданием наноструктурированных покрытий на рабочих поверхностях деталей / Ф. Х. Бурумкулов, С. А. Величко, В. В. Власкин и др. // Достижения науки техники АПК. – 2007. – №6. – С. 13-15.
13. Елизаветин, М. А. Технологические способы повышения долговечности машин / М. А. Елизаветин, Э. А. Сателъ – М.: Машиностроение, 1969. – 400 с.
14. Михайлов, А. Н. Особенности синтеза технологического процесса поршня судового дизеля на основе функционально-ориентированного подхода / А. Н. Михайлов, А.В. Костенко // Механики XXI века. – 2016. – №15. – С. 31-36.
15. Суслов, А. Г. Организационно-технологическое обеспечение оптимальной долговечности изделий машиностроения на всех этапах их жизненного цикла / А. Г. Суслов, И. В. Говоров // Справочник. Инженерный журнал. – 2010. – №6. – С. 3-5.

Поступила в редколлегию 08.03.2017 г.