

УДК 621.9

¹А. В. Костенко, канд. техн. наук, доц., ²А. Н. Михайлов, д-р техн. наук, проф.

¹Камчатский государственный технический университет, Россия

²Донецкий национальный технический университет, ДНР

Тел./Факс: +7 (984) 1637436; E-mail: andr13kost@list.ru

ВЫБОР КРИТЕРИЕВ ПРЕДЕЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ ДЕТАЛЕЙ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТРЕБУЕМОГО РЕСУРСА СУДОВОГО ДИЗЕЛЯ

В статье рассмотрена проблема обеспечения требуемого ресурса судовых дизелей и их элементов. Показана зависимость ресурса от критериев предельного состояния деталей. Критерий предельного состояния может быть выбран из технического, функционального, экономического и утилизационного. Выбор критерия предельного состояния определяется особенностями действующей на элемент дизеля эксплуатационной функции. Приведены классификации деталей судовых дизелей и процессов, вызывающих изменение технического состояния. Обоснованное установление критерия предельного состояния дает возможность решения задачи обеспечения заданного ресурса.

Ключевые слова: ресурс заданный, критерий предельного состояния, условия эксплуатации, структура, судовой дизель, деталь, функциональный элемент.

A. V. Kostenko, A. N. Mikhaylov

SELECTION OF LIMIT STATE CRITERIA OF PARTS TO ENSURE THE REQUIRED RESOURCE OF SHIP DIESEL

The article considers the problem of providing the required resource for marine diesels and their elements. The dependence of the resource on the criteria for the limiting state of parts is shown. Limit state criterion can be selected from the technical, functional, economic and disposal. The choice of the limit state criterion is determined by the features of the operational function acting on the diesel element. Classifications of parts of marine diesel engines and processes causing a change in technical condition are given. Justified establishment of the limit state criterion makes it possible to solve the problem of providing an assigned resource.

Keywords: assigned resource, limit state criterion, operating conditions, structure, marine diesel, part, functional element.

1. Введение

Обеспечение требуемого уровня надежности и долговечности изделий, в том числе и сложных, является одной из основных задач, стоящих перед машиностроением. Это в полной мере относится и к судовым дизелям. Наметившиеся тенденции в машиностроении и в эксплуатации судовых агрегатов определяют перспективность создания агрегатов с единым заданным ресурсом. Сложность производства таких агрегатов заключается в том, что они состоят из большого количества составляющих различной степени сложности, что указывает на необходимость обеспечения равного ресурса всех элементов. Однако, для сложных технических систем, к которым относятся судовые дизели, целесообразнее ставить задачу создания не одинаковых, а кратных ресурсов составных элементов дизеля [1].

Решение этой задачи возможно при использовании функционально-ориентированного подхода (ФОП) [2] при проектировании технологических процессов (ТП) изготовления деталей судовых дизелей.

2. Анализ публикаций

Одной из первых работ, в которой указывается проблема обеспечения равной надежности деталей агрегата, является работа [3]. В работах [4-6] на основе анализа со-

временного состояния машиностроения указывается актуальность решения задачи обеспечения требуемой надежности агрегатов: более гибкое и многономенклатурное производство; сокращение жизненного цикла изделия; стратегия ремонта оборудования по отработанному ресурсу. В работах [7-9] также рассмотрены различные аспекты этой проблематики. В частности, в работе [7] решена проблема организационно-технологического обеспечения оптимальной долговечности машин, в диссертации [8] обеспечено соответствие ресурса компрессорного и турбинного колес турбокомпрессора, в работе [9] предложено решение проблемы управления надежностью газотурбинных двигателей для самолетов в рамках обеспечения безопасности полетов. Кроме того, в работах [10,11] указывается на необходимость увязки проектируемой долговечности изделий машиностроения с экономически обоснованным ресурсом.

3. Основное содержание и результаты работы

Обеспечение равной надежности для всех элементов дизеля является сложной задачей в связи с тем, что детали отличаются по функциональному назначению и по условиям эксплуатации, что предопределяет использование различных материалов, а также различных технологических процессов изготовления, в том числе и различных методов отделочно-упрочняющей обработки.

Технический ресурс, являясь запасом возможной наработки изделия, определяется рядом свойств [7]:

$$R = f(G, F, X, K, S, E), \quad (1)$$

где G, F, X, K – геометрические, физические, химические и конструктивные свойства составных частей изделия машиностроения; S – качество сборки; E – эксплуатационные факторы.

Ресурс неразрывно связан с предельным состоянием, которое должно однозначно характеризоваться критерием предельного состояния (КПС), зависящего от условий эксплуатации – действия эксплуатационных функций (ЭФ). Проблема создания изделий с заданным ресурсом является комплексной и должна быть рассмотрена в рамках жизненного цикла изделия (рис. 1).



Рисунок 1. Жизненный цикл изделия

Научно обоснованное определение КПС позволяет назначить необходимый ресурс не только детали, но и агрегата в целом, что позволит решить основную задачу – наиболее полное использование заложенных в деталь эксплуатационных свойств, т.е. выработку ресурса, но с учетом обеспечения минимальных эксплуатационных затрат.

Отметим, что проблема выбора КПС напрямую влияет на структуру ТП, на выбор средств и методов технологического обеспечения.

КПС K может быть выбран из четырех возможных (рис. 2, выражение (2)):

- технического КПС (K_t), определяющего возможность работы изделия без поломок;
- функционального КПС (K_f), гарантирующего выполнение изделием целевой функции с требуемым уровнем качества;
- экономического КПС (K_e), определяющего экономическую целесообразность эксплуатации изделия;
- утилизационного (K_u), учитывающий возможности утилизации изделия.

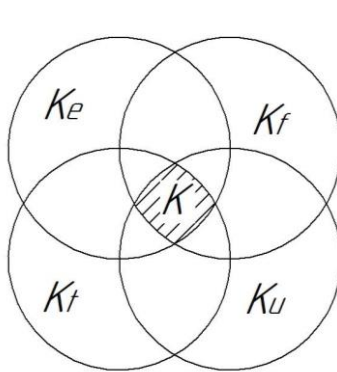


Рисунок 2. Диаграмма образования множества, характеризующего критерий K

Представленную на рис. 2 диаграмму можно выразить математически:

$$K = K_t \cap K_f \cap K_e \cap K_u . \tag{2}$$

Ресурс судового дизеля и ресурсы его элементов должны быть увязаны зависимостью

$$R_D = m_i R_{D_i} = m_{i+1} R_{D_{i+1}} = \dots + m_z R_{D_z}, \tag{3}$$

где m_i – коэффициент кратности ресурса i -го элемента судового дизеля (узла, детали, функционального элемента детали; R_D – ресурс судового дизеля.

С учетом (2) и (3) функция преобразования φ_0 ПКС элементов дизеля в соответствующие им ресурсы с учетом кратности ресурсу всего дизеля записывается следующим образом

$$\varphi_0 : \left\{ \begin{matrix} K_i \\ K_{i+1} \\ \dots \\ K_z \end{matrix} \right\} \rightarrow \left\{ \begin{matrix} m_i R_D \\ m_{i+1} R_D \\ \dots \\ m_z R_D \end{matrix} \right\} . \tag{4}$$

Выражение (4) предопределяет структуру технологического процесса на базе ФОР, реализующего такие технологические преобразования заготовки в изделия совокупными технологическими воздействиями материального, энергетического и информационного типов, которые позволяют производить агрегаты с заданным ресурсом.

Безусловно, наличие большого количества элементов судового дизеля, различий в их условиях эксплуатации создает большие трудности при проектировании ТП на базе ФОР. К тому же, количество элементов возрастает многократно при делении деталей дизеля на функциональные элементы по уровням глубины технологии. Для каждого из этих элементов необходимо провести анализ действия ЭФ, выбрать КПС, увязать про-

изводство всех элементов на базе общего подхода – создания агрегата с единым или кратным ресурсом его элементов. Все это приводит к возникновению задач большой размерности. Использование методов декомпозиции и композиции элементов позволяет формализовать и упростить описанные процессы.

Поскольку судовой ДВС представляет собой техническую систему, состоящую из элементов, взаимодействующих между собой непосредственно или опосредованно, его (ДВС) можно представить в виде дерева признаков построения объектов на основе функциональных отношений, как это показано на рис. 3 [12].

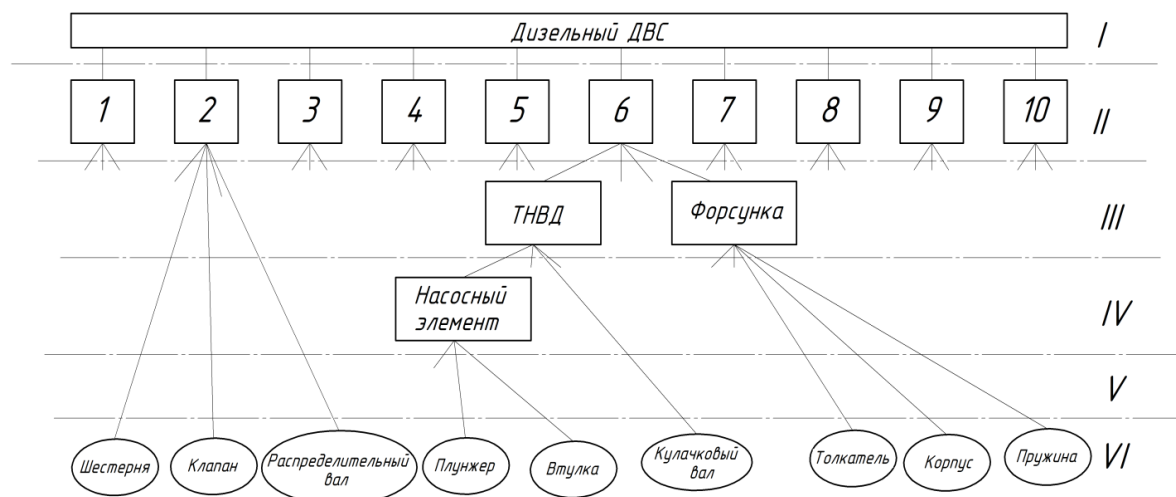


Рисунок 3. Иерархическая структура ТС дизельного ДВС:

1 – остов; 2 – механизм газораспределения; 3 – кривошипно-шатунный механизм; 4 – система охлаждения; 5 – система смазки; 6 – топливная система; 7 – система воздухообеспечения; 8 – система управления; 9 – система газоотвода; 10 – система регулирования и контроля, уровни иерархии: I – техническая система; II – подсистемы и механизмы; III – узлы; IV, V – сборочные единицы; VI – детали.

Принципиально структурную модель судового дизеля Str^{CD} можно представить в виде следующего выражения

$$Str^{CD} = \bigcup_{i=1}^n Str_i, \tag{5}$$

где Str_i – это принципиально структурные модели элементов ДВС, которые могут быть представлены на разных уровнях иерархии: подсистемы и механизмы; узлы, сборочные единицы, детали. С учетом особенностей ФОРТ под Str_i также могут быть представлены структурные модели деталей, состоящих из функциональных элементов на разных уровнях глубины технологии (деталь, часть, составляющая, зона, макрозона, микрозона, нанозона.)

ДВС и каждый его элемент функционирует в определенных условиях. Поэтому его состояние в каждый момент времени эксплуатации можно представить в виде вектора состояний, возможные значения которого находятся в некотором множестве состояний G из всех возможных состояний, входящих в множество D (рис. 4): $G \in D$.

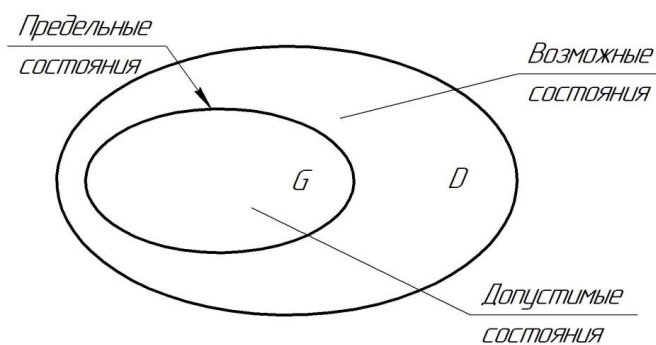


Рисунок 4. Состояния детали при эксплуатации

Согласно [13] типичными критериями предельных состояний объектов могут быть:

- отказ одной или нескольких составных частей, восстановление или замена которых на месте эксплуатации не предусмотрены эксплуатационной документацией;
- механический износ ответственных деталей (узлов) или снижение физических, химических, электрических свойств материалов до предельно допустимого уровня;
- снижение наработки на отказ (повышение интенсивности отказов) объектов ниже (выше) допустимого уровня;
- превышение установленного уровня текущих (суммарных) затрат на техническое обслуживание и ремонты или другие признаки, определяющие экономическую нецелесообразность дальнейшей эксплуатации.

Критериями предельных состояний дизелей могут быть допустимые износы деталей, потеря мощности, увеличение расходов топлива и масла, допустимые деформации, уровень колебаний и пр.

Отдельно следует отметить одну из важнейших характеристик деталей – прочность. Очевидно, что в начале эксплуатации каждый элемент судового дизеля обладает некоторой исходной прочностью, которая была заложена на этапе конструирования и реализована при изготовлении. При эксплуатации из-за действия эксплуатационных функций происходят процессы, снижающие прочность, что выражается в появлении усталостных разрушений, трещин, прогаров, статических разрушений, заеданий, коррозий, наклепов, износов и др.

В данном случае в качестве КПС может выступать некоторая остаточная прочность, достижение которой и является исчерпанием ресурса (рис. 5).

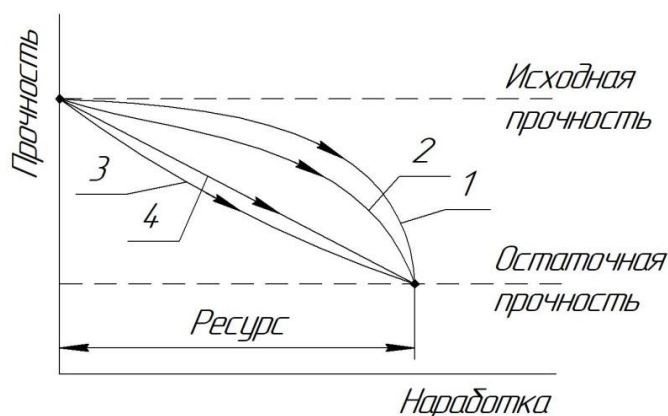


Рисунок 5. Изменение прочности в зависимости от наработки

На рис. 5 показаны траектории достижения четырьмя деталями, входящими в один узел, предельного состояния, т.е. исчерпание ресурса. При этом показан вариант, к которому следует стремиться при реализации параметров качества деталей в процессе изготовления для обеспечения единого ресурса. Необходимо таким образом обеспечить технологические воздействия на заготовки, чтобы обеспечить их одинаковый ресурс, т.е. единый ресурс узла, с учетом различной интенсивности потери прочности при эксплуатации каждой из деталей, входящих в узел. Отметим, что такой подход возможен и для отдельной детали, функциональные элементы которой подвергаются воздействию различных эксплуатационных функций. В этом случае рис. 5 характеризует единый ресурс всей детали с учетом одинаковых ресурсов каждого функционального элемента.

С одной стороны, судовой дизель представляет собой структурную модель, с другой стороны, двигатель в целом и его детали работают в определенных условиях эксплуатации, представляющих собой комплекс различных эксплуатационных функций, воздействующих на элементы двигателя и, соответственно, изменяющие их техническое состояние. Совокупность эксплуатационных функций можно также представить в виде структурной модели, аналогично выражению (5):

$$EF = \bigcup_{i=1}^n EF_i, \tag{6}$$

где EF_i – это структурные модели эксплуатационных функций, которые могут быть представлены в виде воздействий на элементы дизеля на разных уровнях иерархии. С учетом особенностей ФОТ под EF_i также могут быть представлены воздействия, действующие на функциональные элементы деталей на разных уровнях глубины технологии.

Очевидно, что выбор КПС предопределяется особенностями действующей на элемент дизеля эксплуатационной функции, что позволяет представить это в виде следующего отображения

$$\left\{ \begin{matrix} EF_i \\ EF_{i+1} \\ \dots \\ EF_z \end{matrix} \right\} \rightarrow \left\{ \begin{matrix} K_i \\ K_{i+1} \\ \dots \\ K_z \end{matrix} \right\}. \tag{7}$$

С учетом вышеизложенного можно перейти к синтезу принципиально-структурных модели, определяющей взаимосвязь элемента дизеля и соответствующей ему эксплуатационной функции, а, значит, и КПС. Для этого необходимо выполнить операции декомпозиции объемно-пространственной структурной модели судового ДВС и структурной модели эксплуатационных функций на элементарные структуры Str_{ik}^{CD} и эксплуатационных функций EF_{ik} , а затем объединения соответствующих элементарных структур Str_{ik}^{CD} и эксплуатационных функций EF_{ik} в упорядоченные пары и далее объединения этих упорядоченных пар в общую принципиально-структурную модель.

На рис. 6 показано процедуру синтеза принципиально-структурной модели в схематическом виде. Разделение (декомпозиция) множеств Str_i^{CD} и EF_i должно производиться до тех пор, пока они не будут расчленены на простые элементы, которые можно представить множествами:

$$\left\{ \begin{matrix} Str_i^{CD} = Str_{ik}^{CD}, Str_{ik}^{CD}, \dots, Str_{ik}^{CD}; \\ EF_i = EF_{ik}, EF_{ik}, \dots, EF_{ik}. \end{matrix} \right. \tag{8}$$

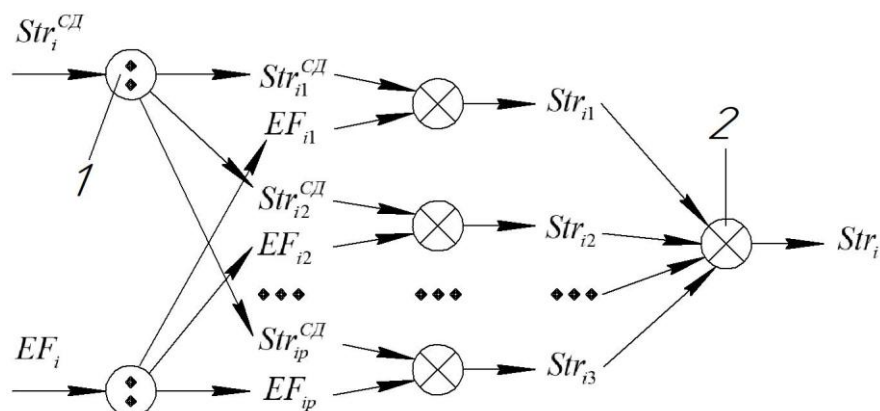


Рисунок 6. Процедура синтеза принципиально-структурной модели:
 1 – знак (оператор) декомпозиции; 2 – знак (оператор) композиции.

Далее, выполняется объединение элементов множеств (8) в упорядоченные пары (кортежи). После чего реализуется объединение кортежей в принципиально-структурную модель, которая может быть представлена множеством кортежей

$$Str_i = \{Str_{i1}, Str_{i2}, \dots, Str_{ip}\}. \tag{9}$$

При синтезе принципиально-структурных моделей выполняется двойная композиция элементов кортежей и кортежей в общую модель. При этом управляемыми переменными являются структурные параметры Str_i^{CD} и EF_i .

Описанная процедура синтеза принципиально-структурной модели применима в условиях проектирования функционально-ориентированного технологического процесса, согласно особенностям которого, деталь представляется набором функциональных элементов (ФЭ) на различных уровнях глубины технологии. Каждый ФЭ, при этом, характеризуется характеристиками класса более высокого уровня технологии, характеристиками качества самого элемента и эксплуатационными функциями:

$$G = F(S, V, EF),$$

где S – множество классифицируемых объектов; V – свойства классифицируемых объектов, характеризующие их с точки зрения качества; EF – эксплуатационные функции; F – функционал, выражающий характеристики классифицируемых объектов.

В связи с этим, в систему классификации деталей, с помощью которой будет осуществляться группирование деталей в соответствии с требуемыми критериями, необходимо ввести характеристику, учитывающую особенности условий эксплуатации. Поскольку для большинства деталей, определяющим является процесс изнашивания, то особенности износа и могут быть классификационным критерием, характеризующим долговечность деталей. Это позволяет разделить детали судовых дизелей на пять групп:

1 группа. Детали, для которых определяющим является коррозионно-механический или молекулярно механический износ – втулки цилиндров, поршни, поршневые кольца и др.

2 группа. Детали, для которых определяющим является износ вследствие пластической деформации – шлицевые детали, шестерни, шпоночные пазы и др.

3 группа. Детали, для которых определяющим является усталостная прочность – шатуны, коленчатый вал, втулки цилиндров и др.

4 группа. Детали, для которых определяющим является абразивный износ. Отметим, что для судовых дизелей абразивный износ происходит из-за попадания грязи,

из-за твердых частиц в масле или из-за прорыва газов, в которых могут быть отколовшийся нагар или сажа.

5 группа. Детали, для которых определяющим является эрозионный износ.

Отметим, что в судовых дизелях есть детали, для которых свойственно наличие разных видов эксплуатационных функций, что позволяет относить их к различным группам. Это, прежде всего, коленчатый вал, втулка цилиндров, поршень, зубчатые колеса и ряд других. Такие детали относятся к тяжелонагруженным, и именно к ним необходимо применять функционально-ориентированный подход при проектировании технологических процессов изготовления или ремонта. Поэтому при анализе таких деталей с точки зрения условий эксплуатации необходимо выполнять деление их на ФЭ на разных уровнях глубины технологии. При этом деление необходимо вести до тех пор, пока для конкретного ФЭ будет определена соответствующая эксплуатационная функция, которая, в свою очередь, будет однозначно определять КПС.

При этом, продвижение «вглубь» детали будет требовать более точного определения процессов, обуславливающих износ и поломку деталей. Приведем классификацию таких процессов, влекущих изменение состояния и свойств ФЭ деталей по [3]:

- действие повторно-переменных напряжений при больших циклах перемен нагрузок, работающих в нормальных условиях;
- действие повторно-переменных напряжений при больших циклах перемен нагрузок, работающих в условиях коррозионных сред;
- действие высоких температур (прижоги), химических и физических процессов;
- контактная усталость с образованием микротрещин, оспин, шелушения и других дефектов;
- механический (главным образом абразивный) износ, механическое выламывание частиц, пластическое деформирование;
- молекулярно-механические процессы;
- коррозионные процессы, сопровождаемые механическими процессами.

Процессы критического износа и зарождение процессов разрушения ФЭ деталей начинаются в особых зонах и участках изделия, а также микро- и макрозонах. Это предопределяет особенности их работы, к которым можно отнести:

- неравномерность распространения деформаций растяжения, сжатия, сдвига (среза), кручения, изгиба, а также объемных и сложных комбинированных деформаций;
- неравномерность и местное действие контактных деформаций;
- краевые эффекты, кромочные контакты и деформации смятия;
- местные концентраторы напряжений;
- повторно-переменные деформации;
- ударные нагрузки;
- неравномерное изнашивание в пространстве и во времени.

Используя приведенные классификации процессов, влекущих изменение технического состояния, можно определить соответствующие критерии предельного состояния, назначить их величины, исходя из обеспечения требуемого ресурса детали и сборочной единицы.

4. Заключение

Решение задачи создания судовых дизелей с деталями, у которых требуется обеспечить заданный ресурс, возможно с обоснованным установлением критерия предельного состояния. Последний, в свою очередь, определяется условиями эксплуатации и должен быть определен для функционального элемента детали на таком уровне тех-

нологии, которая позволит однозначно определить действующую эксплуатационную функцию. При этом выбор критерия осуществляется из четырех возможных: технического, функционального, экономического и утилизационного.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Михайлов, А. Н. Особенности обеспечения функционально-ориентированных технологий изготовления деталей судовых дизелей / А. Н. Михайлов, А. В. Костенко // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2017. – №4. – С. 31-36.
2. Михайлов, А. Н. Основы синтеза функционально-ориентированных технологий / А. Н. Михайлов. – Донецк: ДонНТУ, 2009. – 346 с.
3. Елизаветин, М. А. Технологические способы повышения долговечности машин / М. А. Елизаветин, Э. А. Сатель – М.: Машиностроение, 1969. – 400 с.
4. Базров, Б. М. Модульная технология в машиностроении / Б. М. Базров. – М.: Машиностроение, 2001. – 368 с.
5. Силич, А. А. Системы автоматизированного проектирования технологических процессов: учебное пособие / А. А. Силич. – Тюмень: ТюмГНГУ, 2012. – 92 с.
6. Костенко, А. В. Объектно-ориентированное проектирование в машиностроении / А. В. Костенко // Инновационные перспективы Донбасса: материалы 5-й междунар. науч.-практ. конф. (22-25 мая 2019 г.): Т. 3. – Донецк: ДонНТУ, 2019. – С. 54-58.
7. Говоров, И. В. Организационно-технологическое обеспечение оптимальной долговечности машин: – дис. ... доктора технических наук: 05.02.08, 05.02.22 / И. В. Говоров. – Брянск, 2009. – 326 с.
8. Пичко А.П. Синтез технологического обеспечения комплексного повышения ресурса лопаток турбокомпрессора газотурбинных установок нефтегазовой промышленности: автореф. дис. ... канд. техн. наук / А. П. Пичко. – Донецк: 2019. – 20 с.
9. Сарычев, С. В. Методологические основы оценки технических рисков системы управления безопасностью полетов при проектировании, производстве и серийной эксплуатации ГТД: дис. ... доктора техн. наук / С. В. Сарычев. – Рыбинск: 2017. – 485 с.
10. Петрушин, С. И. Организация жизненного цикла изделий машиностроения: монография / С. И. Петрушин, Р. Х. Губайдулина. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. – 200 с.
11. Дорохов, А. Ф. Качество и надежность судовых дизелей / А. Ф. Дорохов // Вестник АГТУ. Сер.: Морская техника и технологии. – 2015. – №2. – С. 48-53.
12. Михайлов, А. Н. К вопросу о применении функционально-ориентированного подхода в судовом машиностроении [Электронный ресурс] / А. Н. Михайлов, А. В. Костенко // Перспективные направления развития отделочно-упрочняющей технологии и виброволновых технологий: сборник трудов международной научно-технической конференции, посвященной 90-летию заслуженного деятеля науки и техники РФ, д.т.н., почетного профессора ДГТУ А.П. Бабищева (Ростов-на-Дону, 27-28 февраля 2018г.); Донской гос. техн. ун-т. –Электрон. Тестовые дан. – Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2018. – Режим доступа: <http://www.ntb.donstu.ru/content/201871-ЭБС ДГТУ>. – Загл. с экрана. С. 180-182.
13. ГОСТ 27.003-2016. Надежность в технике. Состав и общие правила задания требований по надежности. – Взамен ГОСТ 27.003-90; введ. 01-09-2017. - М.: Стандартинформ, 2018. – 19 с.

Поступила в редколлегию 02.02.2020 г.