

УДК 621.45.0.002.2(0.75.8)

Д. А. Михайлов, канд. техн. наук, доцент

Донецкая академия гражданской защиты МЧС ДНР, г. Донецк, ДНР

Тел.: +38 071 3821135, E-mail: [dmitry.michailov@mail.ru](mailto:dmitry.michailov@mail.ru)

## ОСНОВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ И УСЛОВИЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ И ФУНКЦИОНАЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННЫХ СВОЙСТВ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ ПО ЕГО СТРУКТУРЕ

*В работе приведены основные особенности и условия обеспечения эксплуатационных и функционально-ориентированных свойств газотурбинного двигателя (ГТД) по его структуре. Разработан общий подход в обеспечении заданных эксплуатационных свойств элементов структуры ГТД посредством формирования функционально-ориентированных свойств. Представлена структурная модель общего подхода обеспечения функционально-ориентированных свойств элементов структуры ГТД, которая базируется на установленных связях. Разработаны методика и условия формирования эксплуатационных и функционально-ориентированных свойств элементов структуры ГТД. Приведены основные закономерности технологического обеспечения функционально-ориентированных свойств элементов структуры ГТД.*

**Ключевые слова:** газотурбинный двигатель, структура, функционально-ориентированные свойства, общий подход, структурный синтез, связи, условия.

D. A. Mikhaylov

## MAIN FEATURES AND CONDITIONS FOR PROVIDING THE OPERATIONAL AND FUNCTIONAL-ORIENTED PROPERTIES OF A GAS TURBINE ENGINE ACCORDING TO ITS STRUCTURE

*The paper presents the main features and conditions for ensuring the operational and functionally-oriented properties of a gas turbine engine (GTE) according to its structure. A general approach has been developed to ensure the specified operational properties of the GTE structural elements through the formation of functionally oriented properties. A structural model of the general approach to providing functionally-oriented properties of the GTE structure elements is presented, which is based on established relationships. The technique and conditions for the formation of operational and functionally oriented properties of the elements of the GTE structure have been developed. The main regularities of the technological support of the functionally oriented properties of the elements of the GTE structure are given.*

**Keywords:** gas turbine engine, structure, function-oriented properties, general approach, structural synthesis, connections, conditions.

### 1. Введение

В настоящее время газотурбинные двигатели (ГТД) широко используются в авиационной технике в качестве источников движения для современных самолетов и вертолетов [1, 2, 3, 4]. Это обусловлено высокими техническими и эксплуатационными характеристиками этих систем. Вместе с тем, следует отметить, что процесс эксплуатации ГТД обусловлен целым рядом особенностей, важнейшим из которых является неравномерность износа и разрушений основных элементов структуры авиационного двигателя [5, 6].

Проведенный анализ состава элементов ГТД (рис. 1) показал [5, 6], что авиационный двигатель имеет сложную структуру, состоящую из множества элементов и подсистем, а именно содержащую следующие подсистемы: входное устройство, компрессор, камеру сгорания, турбину, свободную турбину, выпускной канал и ряд других узлов. При этом в основных подсистемах ГТД смонтированы группы лопаток: поворотные лопатки входного направляющего аппарата (ВНА), поворотные лопатки направля-

ющего аппарата (НА), лопатки НА статора, лопатки спрямляющего аппарата, лопатки ротора, лопатки турбины и свободно турбины.

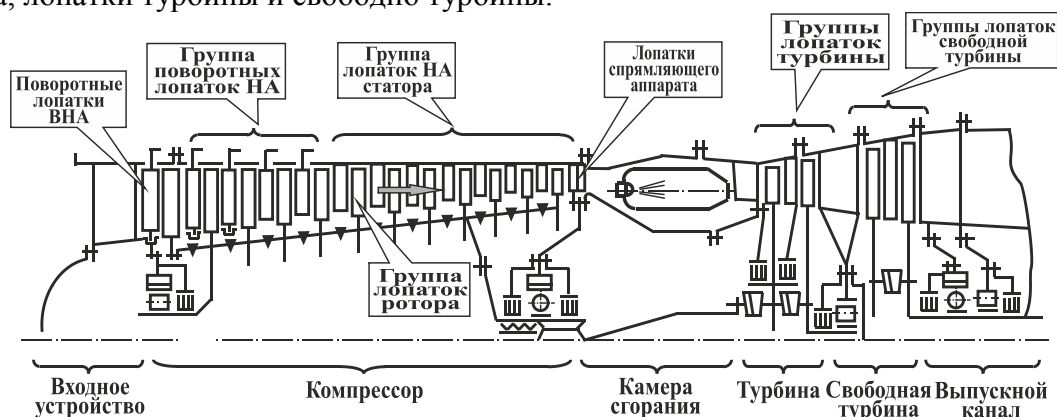


Рисунок 1. Компоновочная схема вертолетного турбовального ГТД серии ТВ3-117 с указанием групп лопаток турбокомпрессора.

Выполненные ранее исследования, представленные в работах [6, 7], показали, что при эксплуатации ГТД на основные элементы и подсистемы действуют неравномерные эксплуатационные функции. Эти неравномерности обусловлены конструктивными, кинематическими, эксплуатационными особенностями структуры ГТД и зависят от множества факторов, основные из которых это концентрация пыли в проточной части двигателя, скорость движения потока рабочей среды, температура, рабочее давление по тракту двигателя и другие параметры. Можно отметить, что эксплуатационные свойства ГТД зависят от действия абразивно-эрозионных, температурных, химических, физических, солевых и других воздействий. Неравномерные эксплуатационные воздействия на элементы и подсистемы ГТД приводит к неравномерным износам элементов структуры ГТД, которые характеризуются неравномерностями  $R$ -родов [8, 9]. Это обуславливает возникновение целого комплекса проблем, а именно не полного использования элементов структуры двигателя и снижение эксплуатационного потенциала элементов (подсистем) ГТД, преждевременного выхода из строя одних элементов или подсистем относительно других, снижение ресурса ГТД и тому подобного. Все это в целом значительно снижает технико-экономические показатели авиационных двигателей.

Для повышения эксплуатационных свойств ГТД, работающих в условиях действия неравномерных эксплуатационных функций, в работах [7, 8, 9] предложено применение функционально-ориентированных свойств (ФОС) элементов авиационных двигателей. Вместе с тем, можно отметить, что в процессе эксплуатации ГТД не только действуют неравномерности износов по элементам, но и по структуре, по группам и по подсистемам. Поэтому в этом случае процесс обеспечения ФОС необходимо выполнять комплексно по элементам и по подсистемам структуры. При этом этот вопрос должен решаться из условия обеспечения равных, кратных или функционально-зависимых эксплуатационных свойств (например, долговечность, ресурс, стойкость и тому подобного) всех элементов структуры ГТД одновременно. Это позволит выполнить повышение эксплуатационных свойств и технико-экономических показателей ГТД.

Однако, в этом случае, возникает целый комплекс вопросов. Как это сделать, как обеспечить формирование ФОС для всей сложной структуры элементов ГТД, чтобы обеспечить равные, кратные или функционально-зависимые эксплуатационные свойства (например, ресурс) всех элементов структуры, когда действует на их элементы не-

равномерные эксплуатационные воздействия  $R$ -родов? Как можно обеспечить за счет ФОС элементов и структуры - заданные эксплуатационные свойства ГТД? Какими технологиями можно реализовать одновременное решение вопросов обеспечения заданных эксплуатационных свойств элементов структуры ГТД и обеспечения ФОС структуры? Как установить связь между особенностью износа элементов структуры ГТД, особенностями формирования структуры ФОС и параметрами технологических воздействий по этапам циклов «эксплуатация – ФОС – технология»?

В этом случае, можно ответить следующим образом:

1. Необходимо разработать общий подход формирования ФОС базирующийся на комплексном обеспечении эксплуатационных и функционально-ориентированных свойств элементам структуры ГТД.

2. Для решения вопросов обеспечения предельных или заданных эксплуатационных свойств ГТД, необходимо установить параметры формирования эксплуатационных и ФОС элементов структуры ГТД.

3. Нужно установить закономерности формирования ФОС (посредством физико-механических свойства) по элементам структуры ГТД - в зависимости от эксплуатационных свойств (долговечность, ресурс, стойкость и тому подобное).

4. Следует установить закономерности между технологическими параметрами технологии и параметрами ФОС структуры элементов ГТД.

5. Требуется установить закономерности между параметрами разрушения или износа элементов структуры при эксплуатации ГТД и технологическими параметрами процесса обеспечения ФОС структуры ГТД.

Целью данной работы является создание общего подхода формирования ФОС элементов структуры ГТД из условия обеспечения заданных ее эксплуатационных свойств (равные, кратные, функционально-зависимые) на основе установленных закономерностей и связей между этапами циклов «эксплуатация – ФОС – технология» и элементами структуры авиационного двигателя.

## **2. Особенности общего подхода и структурного моделирования при формировании ФОС элементов структуры ГТД**

Можно отметить, что ранее, в работах [7, 8, 9] разработан общий подход в обеспечении ФОС отдельных элементов ГТД. Этот подход базируется на учете параметров жизненного цикла ГТД для отдельного элемента  $X$  по трем этапам «эксплуатация - обеспечение ФОС - технология». На рис. 2 представлена структура этапов (эксплуатация  $F$  – свойства  $C$  – технология  $T$ ) и связей при обеспечении ФОС отдельным элементом  $X$  ГТД. Здесь показано  $\lambda_i^j$  - связи между этапами циклов «эксплуатация - обеспечение ФОС - технология», а именно действия  $i$ -го этапа на  $j$ -й этап, которые позволяют формировать ФОС элемента  $X$  в зависимости от действия эксплуатационных функций  $F$  на базе определенных параметров технологического процесса  $T$ .

Разработанный подход позволяет реализовывать необходимые ФОС отдельному элементу структуры ГТД в зависимости от особенностей эксплуатации и параметров технологии. Однако, вследствие того, что ГТД имеет сложную структуру, которой одновременно необходимо обеспечивать ФОС (физико-механические свойства (ФМС)) и заданные эксплуатационные свойства (например, равные, кратные или функционально-ориентированные свойства (надежность, безотказность, долговечность ресурс и тому подобное)), в этом случае, здесь нужен другой комплексный подход. Этот комплексный подход должен ориентироваться на множестве элементов структуры ГТД, структуре каждого этапа жизненного цикла ГТД, внешних и внутренних связях. Поэтому для его

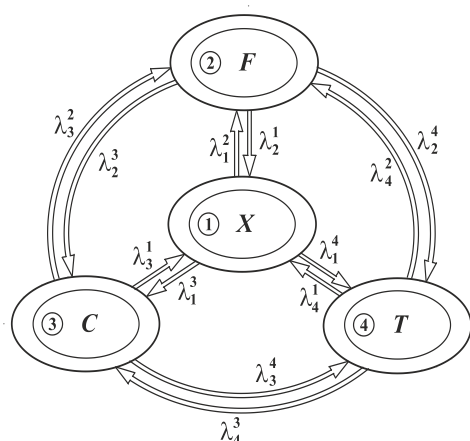


Рисунок 2. Структура этапов (эксплуатация  $F$  – свойства  $C$  – технология  $T$ ) и связей при обеспечении ФОС отдельным элементов  $X$  ГТД

создания сначала рассмотрим особенности структурного моделирования по этапам процессов.

Структуру ГТД можно представить следующим выражением [10]:

$$Str_1 = \{X, A\}, \tag{1}$$

$Str_1$  - структура элементов ГТД;

$X$  – подмножество элементов структуры;

$A$  – подмножество отношений на подмножестве  $X$  (множество связей).

В выражении (1) множества  $X$  и  $A$  можно представить с помощью следующих элементов:

$$X = \{x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n\}, \tag{2}$$

$$A = \{a_1, a_2, \dots, a_k, \dots, a_m\}; \tag{3}$$

где  $x_i$  и  $a_k$  -  $i$ -й и  $k$ -й элементы подмножеств  $X$  и  $A$ ;

$n$  и  $m$  – мощности или порядок подмножеств  $X$  и  $A$ .

Следует иметь в виду, что в соответствии с данными, представленными в работах [7, 8, 9], элементы и подсистемы ГТД структурируются по  $R$ -уровням.

В процессе эксплуатации ГТД происходят разрушения и износы элементов структуры, при этом это явление можно представить в виде следующей структуры:

$$Str_2 = \{F, B\}, \tag{4}$$

где  $Str_2$  - структура действующих эксплуатационных функций;

$F$  – подмножество элементарных эксплуатационных воздействий на элементы структуры ГТД, вызывающие неравномерные разрушения;

$B$  – подмножество отношений на подмножестве  $F$  (множество связей).

В выражении (4) множества  $X$  и  $A$  можно представить с помощью следующих подмножеств:

$$F = \{f_1, f_2, \dots, f_l, \dots, f_s\}, \tag{5}$$

$$B = \{b_1, b_2, \dots, b_p, \dots, b_t\}; \tag{6}$$

где  $f_l$  и  $b_p$  -  $l$ -й и  $p$ -й элементы подмножеств  $F$  и  $B$ ;

$s$  и  $t$  – мощности или порядок подмножеств  $F$  и  $B$ .

Можно отметить, что в соответствии с данными, представленными в работах [7, 8, 9], элементы структуры (4), связанные с действием эксплуатационных функций имеют разрушения (износы)  $R$ -родов.

Также следует отметить, что в процессе эксплуатации ГТД, вследствие действия неравномерных эксплуатационных воздействий на элементы структуры, происходят неравномерные ее разрушения. Для решения вопросов повышения эксплуатационных свойств элементов структуры ГТД за счет реализации равных, кратных или функционально-зависимых эксплуатационных свойств (надежность, безотказность, долговечность, ремонтпригодность, сохраняемость) необходимо формировать структуру ФОС по структуре ГТД. При этом ФОС элементов ГТД будут иметь следующую структуру:

$$Str_3 = \{C, D\}, \quad (7)$$

где  $Str_3$  - структура ФОС ГТД;

$C$  – подмножество ФОС элементов структуры ГТД;

$D$  – подмножество отношений на подмножестве  $C$  (множество связей).

В выражении (7) множества  $C$  и  $D$  можно представить с помощью следующих подмножеств:

$$C = \{c_1, c_2, \dots, c_g, \dots, c_q\}, \quad (8)$$

$$D = \{d_1, d_2, \dots, d_h, \dots, d_u\}; \quad (9)$$

где  $c_g$  и  $d_h$  -  $g$ -й и  $h$ -й элементы подмножеств  $C$  и  $D$ ;

$q$  и  $u$  – мощности или порядок подмножеств  $C$  и  $D$ .

Следует отметить, что в соответствии с данными, представленными в работах [7, 8, 9], ФОС структуры ГТД структурируются  $R$ -классами.

В случае, когда известно, как следует формировать по структуре ГТД ФОС, разрабатывается интегрированный многосвязный технологический процесс (ИМТП) обеспечения ФОС структуре ГТД. В этом случае, структуру ИМТП обеспечения ФОС можно представить следующим выражением:

$$Str_4 = \{T, E\}, \quad (10)$$

где  $Str_4$  - структура ИМТП обеспечения ФОС элементам структуры ГТД;

$T$  – подмножество элементов (операций) ИМТП обеспечения ФОС элементов структуры ГТД;

$E$  – подмножество отношений на подмножестве  $T$  (множество связей).

В выражении (10) подмножества  $T$  и  $E$  можно представить с помощью следующих элементов:

$$T = \{t_1, t_2, \dots, t_v, \dots, t_y\}, \quad (11)$$

$$E = \{e_1, e_2, \dots, e_w, \dots, e_z\}; \quad (12)$$

где  $t_v$  и  $e_w$  -  $v$ -й и  $e$ -й элементы подмножеств  $T$  и  $E$ ;

$y$  и  $z$  – мощности или порядок подмножеств  $T$  и  $E$ .

Следует отметить, что в соответствии с данными, представленными в работах [7, 8, 9], операции ИМТП обеспечения ФОС элементов структуры ГТД структурируются *R*-классами.

Выполненные исследования особенностей формирования ФОС элементов структуры ГТД позволили установить, что это сложный процесс и для его реализации необходим общий подход. Только на базе общих решений обеспечивается возможность особого формирования ФОС по структуре элементов ГТД с учетом значений начальных параметров, структуры элементов, параметров процессов по этапам «эксплуатация – свойства - технология», закономерностей обеспечения ФОС в зависимости от параметров эксплуатационных свойств. Поэтому далее, более подробно рассмотрим характеристики общего подхода формирования ФОС элементов структуры ГТД (рис. 3).

Разработанный общий подход формирования ФОС элементов структуры ГТД характеризуется, прежде всего, следующим (рис. 3):

- наличием сложной структуры элементов ГТД;
- наличием неравномерных разрушений элементов структуры.

Здесь, можно отметить, что все элементы ГТД структурируются следующим образом [7, 8]: элементы 1-го уровня, элементы 2-го уровня, ..., элементы *R*-го уровня. Это обусловлено особой структурой элементов ГТД, которая включает различные группы лопаток подсистем.

Также следует отметить, что в процессе эксплуатации ГТД происходят неравномерные (неодинаковые) разрушения каждого элемента и элементов структуры. Эти неравномерности разрушения элементов ГТД обусловлены следующими параметрами: конструктивными, кинематическими, технологическими, эксплуатационными и другими параметрами. Поэтому разрабатываемый общий подход обусловлен условиями применения.

Особенности формирования ФОС структуры ГТД определяются следующим:

- обеспечением ФОС по каждому элементу структуры;
- обеспечением ФОС по всей структуре элементов;
- применением единого комплексного подхода по этапам циклов «эксплуатация – обеспечение свойств - технология» (комплексный инжиниринг в обеспечении ФОС);
- обеспечением ФОС на базе группы особых принципов функционально-ориентированного подхода (ФОПО) [9].

Следует иметь в виду, что процесс формирования ФОС элементов структуры выполняется на базе обеспечения определенных параметров физико-механических свойств материала элементов структуры. Поэтому параметры ФОС формируются в зависимости от параметров эксплуатационных свойств (надежность, безотказность, долговечность, ремонтпригодность, сохраняемость). При этом ФОС могут быть реализованы в зависимости от следующих закономерностей эксплуатационных свойств структуры ГТД:

- обеспечение равных эксплуатационных свойства всех элементов

$$C_1 = C_2 = \dots = C_i = \dots = C_n; \quad (13)$$

- обеспечение кратных эксплуатационных свойства всех элементов

$$k_1 C_1 = k_2 C_2 = \dots = k_i C_i = \dots = k_n C_n; \quad (14)$$

- обеспечение функционально-зависимых свойства всех элементов

$$f_1(C_1) = f_2(C_2) = \dots = f_i(C_i) = \dots = f_n(C_n), \quad (15)$$

где  $C_i$  - параметр эксплуатационного показателя свойств (эксплуатационные свойства) *i*-го элемента структуры ГТД;

$k_i$  - коэффициент кратности эксплуатационных свойств для  $i$ -го элемента структуры ГТД;

$f_i(C_i)$  - функциональная зависимость эксплуатационных свойств для  $i$ -го элемента структуры ГТД;

$n$  – общее количество элементов структуры ГТД.

Можно отметить, что эксплуатационные свойства ГТД можно характеризовать следующими единичными эксплуатационными показателями: назначения, надежности, эстетики, эргономики. В свою очередь, надежность включает следующие показатели: безотказность, долговечность, ремонтпригодность, восстанавливаемость. Для ГТД важным показателем является назначенный ресурс, гарантированный ресурс и другие показатели.

Следует отметить, что с помощью определенных параметров ФОС элементов структуры, выполняемых на базе изменяемых параметров физико-механических свойств (ФМС) материалов, можно обеспечивать заданные эксплуатационные параметры структуры ГТД.

К основным особенностям общего подхода формирования ФОС элементов структуры ГТД можно отнести наличие связей между следующими составляющими (рис. 3):

1. Между структурой элементов ГТД каждого этапа цикла системы «эксплуатация – обеспечение ФОС - технология», которые являются внутренними связями.

2. Между этапами циклов системы «эксплуатация – обеспечение ФОС - технология», которые являются внешними связями.

3. Связи, обеспечивающие переходы от структуры элементов ГТД к этапам циклов системы, которые можно представлять в виде петель.

Внутренние связи общего подхода формирования ФОС элементов структуры подразделяются: структурные, эксплуатационные, по обеспечению ФМС при реализации ФОС и технологические. При этом между этапами циклов системы «эксплуатация – обеспечение ФОС - технология» действуют прямые и обратные связи.

Можно также отметить, что технологические особенности обеспечения ФОС структуры элементов ГТД определяются следующим (рис. 2):

1. Необходимостью обеспечения связности функционально-ориентированных операций.

2. Необходимостью обеспечения связности функционально-ориентированных процессов.

3. Проектированием интегрированной многосвязной технологии.

В этом случае, выполняется синтез технологического обеспечения и интегрированного многосвязного технологического процесса формирования ФОС структуры элементов ГТД.

Процесс формирования свойств ГТД обусловлен следующими совместными процессами (рис. 3):

1. Обеспечением заданных параметров эксплуатационных свойств элементов структуры (равные, кратные или функционально-зависимые свойства).

2. Обеспечением ФОС каждому элементу структуры посредством изменяющихся параметров ФМС материала элемента. В этом случае структура ФОС элементов будут иметь следующую структуру: ФОС 1-го класса, ФОС 2-го класса, ..., ФОС  $R$ -го класса.

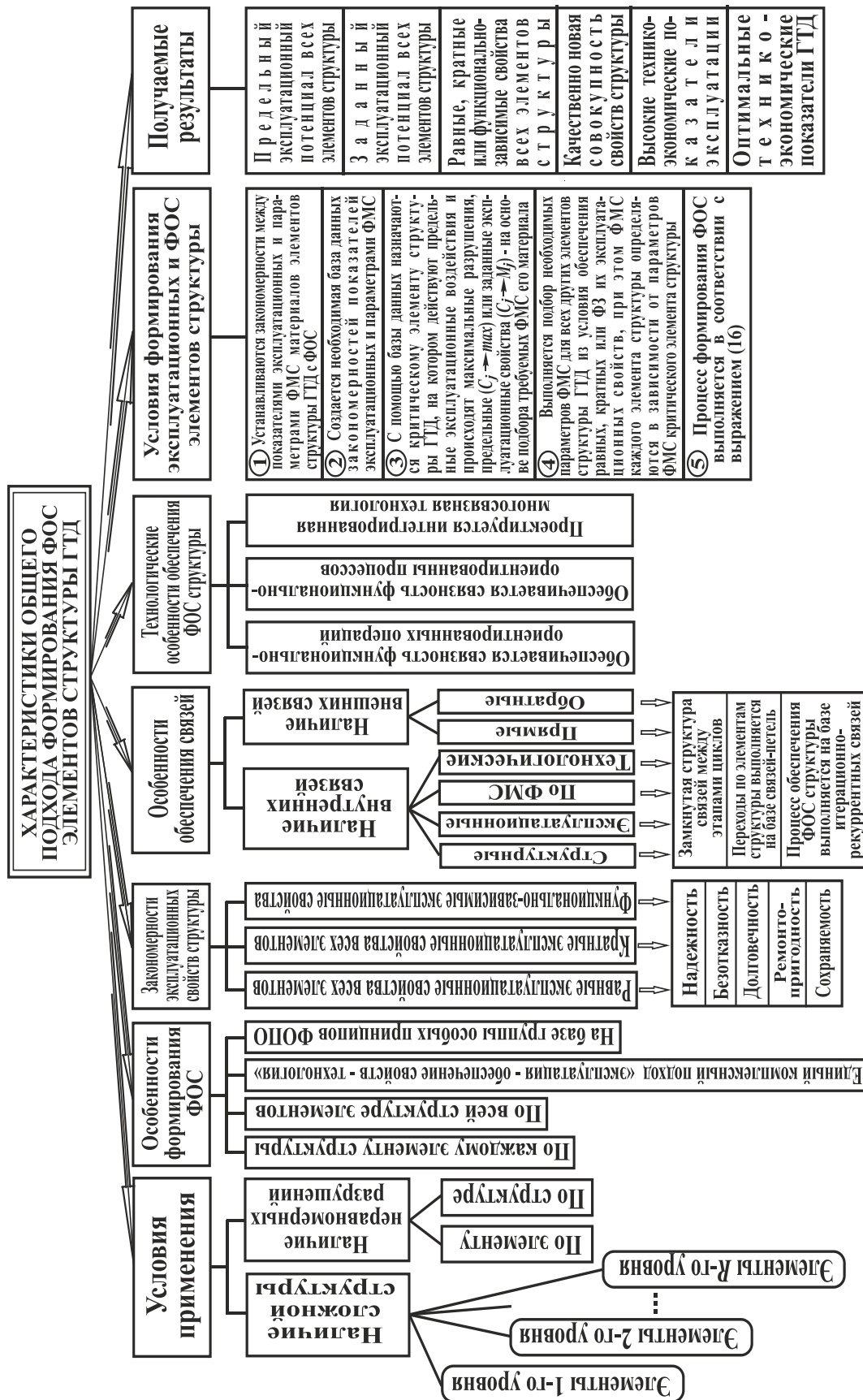


Рисунок 3. Характеристики общего подхода формирования ФОС элементов структуры ГТД



В процессе формирования эксплуатационных и ФОС структуры ГТД достигаются следующие результаты (рис. 3):

- обеспечивается предельный эксплуатационный потенциал всех элементов структуры;
- обеспечивается заданный эксплуатационный потенциал всех элементов структуры;
- выполняются равные, кратные или функционально-зависимые эксплуатационные свойства всех элементов структуры;
- создается качественно новая совокупность свойств структуры;
- выполняются высокие технико-экономические показатели эксплуатации ГТД;
- создаются оптимальные технико-экономические показатели ГТД.

### 3. Структурная модель общего подхода в обеспечении ФОС структуры элементов ГТД

Можно отметить, что общий подход формирования ФОС структуры элементов ГТД базируется на структурной модели комплексного обеспечения эксплуатационных и ФОС по элементам структуры, представленной на рис. 4. Здесь показаны следующие подсистемы: 1 - структура элементов ГТД  $Str_1 = \{X, A\}$ ; 2 - структура действующих эксплуатационных функций  $Str_2 = \{F, B\}$ ; 3 - структура элементов формирования ФОС  $Str_3 = \{C, D\}$ ; 4 - структура интегрированной многосвязной технологии по обеспечению ФОС.

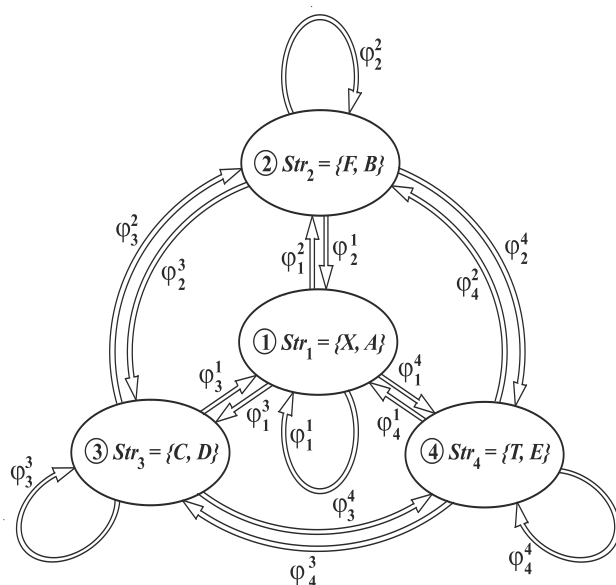


Рисунок 4. Структурная модель общего подхода комплексного обеспечения эксплуатационных и ФОС по элементам структуры ГТД на базе внешних и внутренних связей

Между подсистемами этой модели действуют внешние связи (прямые и обратные)  $\phi_i^j$ , где  $i$  – номер подсистемы (оператор) действующей (связывающей) на  $j$ -ю подсистему (операнд). Одна и та же подсистема может быть и оператором, когда воздействует на соседнюю подсистему, и операндом, когда на нее действует соседняя подсистема. Можно отметить, что позиция 1 показывает структуру элементов ГТД, а позиции 2, 3, 4 – показывают структуру процессов, а именно эксплуатации, обеспечения свойств, создания технологии. И это все реализуется едино - на базе приведенных связей.

Следует отметить, что каждая  $i$ -я подсистема имеет свою структуру элементов. При этом переход от элемента к элементу структуры в процессе обеспечения функционально-ориентированных и эксплуатационных свойств выполняется посредством внутренних связей-петель  $\phi_i^i$ :

- $\phi_1^1$  - структурные связи между элементами ГТД;

- $\varphi_2^2$  - эксплуатационные связи, позволяющие установить особенности эксплуатации структуры элементов ГТД;
- $\varphi_3^3$  - связи по формированию ФОС элементам структуры ГТД, посредством которых выполняются заданные ФМС;
- $\varphi_4^4$  - технологические связи, позволяющие на базе структуры ИМТП реализовать заданные параметры свойств (ФОС и эксплуатационные свойства) элементов структуры ГТД.

Также необходимо отметить, что представленные подсистемы 1, 2, 3 (рис. 4), внешние  $\varphi_i^j$  и внутренние  $\varphi_i^i$  связи разработанной модели формирования ФОС структуры элементов ГТД образуют единую систему комплексного обеспечения ФОС структуре элементов ГТД в зависимости от особенностей действия эксплуатационных функций на базе ИМТП [11].

Еще следует отметить, что с помощью разработанного общего подхода формирования ФОС структуры элементов ГТД и представленной модели (рис. 4) выполняется интегрированный инжиниринг в обеспечении ФОС структуре элементов ГТД. Интегрированный технологический инжиниринг устанавливает связи и определяет параметры между этапами системы (модели) ГТД (рис. 4), а именно: эксплуатация, формирование ФОС и реализация технологии [12, 13]. В разработанной модели, интегрированный инжиниринг включает следующие подсистемы и связи:

1. Структурно-эксплуатационно-свойственный инжиниринг, включающий следующие составляющие: структура (позиция 1), эксплуатация (позиция 2), обеспечение свойств (позиция 3) и внешние  $\varphi_i^j$  и внутренние  $\varphi_i^i$  связи между этими подсистемами.

2. Структурно-свойственно-технологический инжиниринг, включающий следующие составляющие: структура (позиция 1), обеспечение свойств (позиция 3), технология (позиция 4) и внешние  $\varphi_i^j$  и внутренние  $\varphi_i^i$  связи между этими подсистемами.

3. Структурно-технологическо-эксплуатационный инжиниринг, включающий следующие составляющие: структура (позиция 1), технология (позиция 4), эксплуатация (позиция 2) и внешние  $\varphi_i^j$  и внутренние  $\varphi_i^i$  связи между этими подсистемами.

С помощью разработанной структурной модели общего подхода выполняется формирование ФОС структуры элементов ГТД в зависимости от их заданных эксплуатационных свойств, определяемых на базе выражений (13), (14) или (15). Для выполнения этого разрабатывается ИМТП обеспечения ФОС структуры элементов ГТД.

Таким образом, с помощью предлагаемого общего подхода формирования ФОС структуры элементов ГТД обеспечивается по замкнутой системе следующее (рис. 4):

1. Этап 1. Определяются особенности эксплуатации структурных элементов ГТД и действия на них эксплуатационных воздействий.

2. Этап 2. Выполняется конструкторское формирование заданных параметров ФОС по структуре элементов, на базе обеспечения заданных параметров ФМС материала элементов, в зависимости от особенностей действия эксплуатационных воздействий.

3. Этап 3. Разрабатывается необходимая структура ИМТП и технологическое обеспечение, с помощью которой реализуются заданные параметры ФОС в зависимости структуры элементов ГТД.

4. Этап 1. На базе ФОС структуры элементов ГТД обеспечиваются заданные эксплуатационные свойства ГТД (равные, кратные или функционально-зависимые свойства).

Также можно заметить, что на базе разработанного общего подхода формирования ФОС структуры элементов ГТД обеспечивается целый комплекс положительных результатов, которые представлены на схеме рис. 3.

#### 4. Методика и условия формирования эксплуатационных и функционально-ориентированных свойств элементов структуры ГТД

Процесс формирования ФОС отдельных элементов ГТД представлен в ряде работ [7, 8, 9, 14]. Для ГТД имеющего сложную структуру элементов процесс формирования ФОС по структуре имеет свои определенные особенности, которые далее представлены в виде методики.

Методика формирования эксплуатационных и функционально-ориентированных свойств имеет следующую последовательность:

1. Устанавливается закономерности между показателями эксплуатационных свойств и параметрами физико-механических свойств материалов элементов структуры ГТД с ФОС в зависимости от особенностей эксплуатационных воздействий среды на элементы структуры. Эти закономерности могут определяться экспериментально или в соответствии с формулами, представленными в работах [15, 16].

2. Создается необходимая база данных закономерностей показателей эксплуатационных и физико-механических свойств (ФМС) материалов для элементов структуры ГТД, выполняемая в зависимости от особенностей эксплуатационных воздействий среды на элементы структуры.

3. С помощью базы данных назначаются критическому элементу структуры ГТД, на котором действуют предельные эксплуатационные воздействия и происходят максимальные разрушения, предельные ( $C_j \rightarrow \max$ ) или заданные эксплуатационные свойства ( $C_j \rightarrow M_n$ ) на основании подбора требуемых ФМС его материала, где  $j$  - номер критического элемента структуры ГТД:

$$C_j = f_1(P_j, \mu_j) \rightarrow (\max \vee M_n).$$

4. Выполняется подбор необходимых параметров ФМС для всех других элементов структуры ГТД, в соответствии с выражениями (13), (14) или (15) из условия обеспечения равных, кратных или функционально-зависимых эксплуатационных свойств. При этом ФМС каждого элемента структуры определяются в зависимости от параметров ФМС критического элемента структуры элементов ГТД.

5. Процесс формирования ФОС по структуре ГТД можно представить в соответствии с выражением (16) на основании ряда условий:

$$\left. \begin{aligned} & C_j = f_1(P_j, \mu_j) \rightarrow (\max \vee M_n); \mu_j = f_j(F_j, C_j^o, T_j); \\ & 1. [C_1 = C_2 = \dots = C_i = \dots = C_n]; \\ & 2. [k_1 C_1 = k_2 C_2 = \dots = k_i C_i = \dots = k_n C_n]; \\ & 3. [f_1(C_1) = f_2(C_2) = \dots = f_i(C_i) = \dots = f_n(C_n)]; \\ & C_i = f_1(P_i, \mu_i); \mu_i = f_i(F_i, C_i^o, T_i), \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

где  $C_j$  - показатели эксплуатационных свойств  $j$ -го критического элемента структуры ГТД;

$C_j = f_1(P_j, \mu_j)$  - функциональная зависимость показателей эксплуатационных свойств  $C_j$  от параметров  $P_j$  и  $\mu_j$   $j$ -го критического элемента структуры ГТД;

$P_j$  - совокупность ФМС  $j$ -го критического элемента структуры ГТД, обеспечивающий выполнение его эксплуатационных свойств;

$\mu_j$  - интенсивность разрушения  $j$ -го критического элемента структуры ГТД;

$P_i$  - совокупность ФМС  $i$ -го элемента структуры ГТД, обеспечивающих выполнение  $C_i$  показателей эксплуатационных свойств (например, общее количество допустимых циклов нагружения элемента структуры, толщина износостойкого покрытия и тому подобное);

$\mu_i$  - интенсивность разрушения  $i$ -го элемента структуры ГТД;

$M_n$  - заданный эксплуатационный показатель свойств  $j$ -го критического элемента структуры ГТД;

$F_j, C_j^o, T_j$  - параметры эксплуатационных воздействий, физико-механических и технологических свойств, соответственно, для  $j$ -го критического элемента структуры ГТД;

$C_i$  - показатели эксплуатационных свойств любого  $i$ -го элемента структуры ГТД;

$n$  - общее количество элементов структуры ГТД;

$C_i = f_1(P_i, \mu_i)$  - функциональная зависимость показателей эксплуатационных свойств

$C_i$  от параметров  $P_i$  и  $\mu_i$   $i$ -го элемента структуры ГТД;

$F_i, C_i^o, T_i$  - параметры эксплуатационных воздействий, физико-механических и технологических свойств, соответственно, для любого  $i$ -го элемента структуры ГТД.

Следует отметить, что в системе (16) представлены три варианта обеспечения эксплуатационных параметров. При конкретном формировании ФОС структуре ГТД следует выбирать один необходимый вариант распределения эксплуатационных свойств по элементам структуры.

При формировании ФОС структуры элементов ГТД, интенсивность разрушения  $i$ -го элемента определяется на основании следующей зависимости:

$$\mu_i = \frac{P_i}{P_j} \mu_j. \quad (17)$$

Например, при обеспечении равного ресурса лопаток компрессора ГТД на базе функционально-ориентированных покрытий (например, вакуумные нитрид титановые покрытия), выражение (16) можно представить следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} R_j &= \frac{h_j}{\mu_{oj}} \rightarrow (\max \vee M_n); \mu_{oj} = f_{oj}(F_j, C_j^o, T_j); \\ R_1 &= R_2 = \dots = R_i = \dots = R_n; \\ R_i &= \frac{h_i}{\mu_{oi}}; \mu_{oi} = f_{oi}(F_i, C_i^o, T_i), \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

$R_j$  - ресурс  $j$ -ой критической лопатки компрессора ГТД;

$h_j$  - толщина нитрид титанового покрытия  $j$ -ой критической лопатки компрессора, обеспечивающая выполнение  $R_j$  ресурса;

$\mu_{oj}$  - интенсивность износа покрытия  $j$ -ой критической лопатки компрессора;

$R_i$  - ресурс  $i$ -ой критической лопатки компрессора ГТД;

$h_i$  - толщина нитрид титанового покрытия  $i$ -ой лопатки компрессора, обеспечивающая выполнение  $R_i$  ресурса;

$\mu_{oi}$  - интенсивность износа покрытия  $i$ -ой лопатки компрессора;

$n$  – общее количество лопаток компрессора ГТД.

Для обеспечения процесса формирования ФОС лопаток на базе нитрид титановых покрытий необходимо определить начальные параметры в выражении (18) для  $j$ -ой критической лопатки компрессора:

$$\begin{aligned} h_j &= \mu_{oj} t_j; \\ \mu_{oj} &= \frac{\Delta h}{t}, \end{aligned}$$

где  $t_j$  - время износа покрытия  $j$ -ой критической лопатки компрессора ( $t_j = R_j$ ) в период полной ее эксплуатации;

$\Delta h$  - величина износа нитрид титанового покрытия в заданный период времени  $t$ .

Следует отметить, что ФМС элементов структуры ГТД следует определять с учетом оптимальности затрат на эксплуатацию и изготовление элементов:

$$Z_{\Sigma} = \left| \sum_{i=1}^n S_i + E_n \sum_{i=1}^n K_i \right| \rightarrow \min$$

где  $Z_{\Sigma}$  - приведенные затраты на изготовление и эксплуатацию ГТД;

$S_i$  - себестоимость эксплуатации  $i$ -го структурного элемента ГТД с ФОС;

$E_n$  - нормативный коэффициент экономической эффективности капиталовложений;

$K_i$  - капиталовложения, связанные с созданием  $i$ -го структурного элемента ГТД с ФОС.

### 5. Основные закономерности технологического обеспечения ФОС элементов структуры ГТД

При обеспечении ФОС элементов структуры ГТД, например, с помощью функционально-ориентированных покрытий (ФОП) [8, 14], связи технологических параметров для всех  $n$  элементов структуры, определяются с помощью следующих выражений:

$$\left. \begin{aligned} t_{o1} &= \frac{\mu_{o1} h_j}{\mu_{oj} \eta}; \\ t_{o2} &= \frac{\mu_{o2} h_j}{\mu_{oj} \eta}; \\ \dots\dots\dots \\ t_{oi} &= \frac{\mu_{oi} h_j}{\mu_{oj} \eta}; \\ \dots\dots\dots \\ t_{on} &= \frac{\mu_{on} h_j}{\mu_{oj} \eta}, \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

где  $t_{oi}$  - время напыления нитрид титанового покрытия на  $i$ -й структурный элемент (лопатку компрессора) с помощью вакуумной ионно-плазменной установки;  
 $\eta$  - интенсивность напыления нитрид титанового покрытия на вакуумной ионно-плазменной установке (например, для вакуумной ионно-плазменной установке ННВ 6.6-И1  $\eta = 1,39 \cdot 10^{-2}$  мкм/с).

С помощью выражений системы (19) определяется основное время напыления нитрид титанового покрытия на установке ННВ 6.6-И1 для всех элементов структуры ГТД.

## 6. Заключение

Таким образом, выполненные исследования направлены на создание общего подхода формирования ФОС элементов структуры ГТД, который направлен на обеспечение заданных эксплуатационных свойств на основе установленных закономерностей и связей между этапами циклов «эксплуатация – ФОС – технология» и элементами структуры авиационного двигателя. Это позволило выполнить следующее:

- разработать общий подход формирования ФОС базирующийся на комплексном инжиниринге в обеспечении ФОС элементов и структуры ГТД;
- установлены параметры формирования эксплуатационных и ФОС элементов структуры ГТД, которые позволяют обеспечивать предельные или заданные эксплуатационные свойства структуры элементов;
- установлены закономерности формирования ФОС (посредством физико-механических свойства) по элементам структуры ГТД - в зависимости от эксплуатационных свойств (долговечность, ресурс, стойкость и тому подобное);
- установлены закономерности между технологическими параметрами технологии и параметрами ФОС структуры элементов ГТД (выражение (19)).

## ЛИТЕРАТУРА:

1. Полетаев, В. А. Технология автоматизированного производства лопаток газотурбинных двигателей. / В. А. Полетаев. – М. : Машиностроение, 2006. – 256 с.
2. Богуслаев, В. А. Технология производства авиационных двигателей: ч. II. Основы проектирования технологических процессов изготовления деталей авиационных двигателей и технологическая подготовка производства. / В. А. Богуслаев [и др.]. – Запорожье: ОАО «Мотор Сич», 2007. – 557 с.

3. Демин, Ф. И. Технология изготовления основных деталей газотурбинных двигателей / Ф. И. Демин, Н. Д. Проничев, И. Л. Шитарев. – М.: Машиностроение, 2002. – 328 с.
4. Авиаинформ / Ежемесячный информационно-аналитический журнал. – М.: Академия наук Aviации и Воздухоплавания, 2021. – Вып. № 7 (208). – 106 с.
5. Григорьев, В. А. Вертолетные газотурбинные двигатели. / В. А. Григорьев, В. А. Зрелов, Ю. М. Игнаткин [и др.]. – М.: Машиностроение, 2007. – 491 с.
6. Михайлов, Д. А. Основные особенности эксплуатации лопаток компрессора ГТД и классификация их эксплуатационных функций / Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных трудов. – Донецк: ДонНТУ, 2015. – Вып. 4 (50). – С. 126-131.
7. Михайлов, А. Н. Технологические особенности повышения ресурса деталей газотурбинных двигателей на основе обеспечения функционально-ориентированных свойств / А. Н. Михайлов, Д. А. Михайлов // Инновации в машиностроении: сборник трудов XII Международной научно-практической конференции. – Новосибирск: НГТУ, 2021. – С. 76-83.
8. Михайлов, Д. А. Некоторые особенности формирования функционально-ориентированных свойств структуры газотурбинного двигателя и связей параметров технологических процессов / Д. А. Михайлов, А. Н. Михайлов, А. А. Колодяжный, Е. А. Шейко // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных трудов. – Донецк: ДонНТУ, 2021. – Вып. 3 (74). – С. 50-64.
9. Михайлов, А. Н. Основы синтеза функционально-ориентированных технологий машиностроения : монография / А. Н. Михайлов. – Донецк : ДонНТУ, 2009. – 346 с.
10. Биркгоф, Г. Теория структур. / Г. Биркгоф. – Москва: ИЛ, 1952. – 407 с.
11. Михайлов, Д. А. Особенности синтеза многосвязного технологического континуума обеспечения функционально-ориентированных свойств структуре газотурбинного двигателя / Д. А. Михайлов [и др.] // Машиностроение и техносфера XXI века. Сборник трудов XXVIII международной научно-технической конференции в г. Севастополе 13-19 сентября 2021 г. – Донецк : ДонНТУ, 2021. – С. 328-334.
12. Михайлов Д. А. Общие особенности технологического инжиниринга газотурбинного двигателя с функционально-ориентированными свойствами структуры / Д. А. Михайлов [и др.] // Научно-технические технологии в машиностроении. – Брянск: БГТУ, 2021. – № 10 (124). – С. 28-38. <https://doi.org/10.30987/2223-4608-2021-10-28-38>.
13. Михайлов, Д. А. Интегрированный технологический инжиниринг параметров в процессе синтеза функционально-ориентированных свойств структуры лопаток компрессора газотурбинного двигателя / Д. А. Михайлов // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных трудов. – Донецк: ДонНТУ, 2022. – Вып. 1 (76). – С. 53-65.
14. Патент № 2718877. Российская Федерация. С23С 14/04. Способ нанесения функционально-ориентированного износостойкого покрытия на лопатку газотурбинного двигателя / А. Н. Михайлов, Д. А. Михайлов, В. А. Михайлов [и др.]. Заявка № 2018107164 от 26.02.2018. – Бюл. № 11, 15.04.2020. – 7 с.
15. Филиппов, М. А. Износ и износостойкие материалы : учеб. пособие / М. А. Филиппов [и др.]. – Нижний Тагил: НТИ (филиал) УрФУб 2019. – 372 с.
16. Крагельский, И. В. Трение и износ. / И. В. Крагельский. – М.: Машиностроение, 1969. – 480 с.

Поступила в редколлегию 25.02.2022 г.