

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2022. №9 (135). С. 38-48.  
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2022. №9 (135). P. 38-48.

Научная статья  
УДК 621.45.0.002.2(075.8)  
doi: 10.30987/2223-4608-2022-9-38-48

## Методологические и технологические основы обеспечения функционально-ориентированных свойств структуры элементов газотурбинного двигателя

Александр Николаевич Михайлов<sup>1</sup>, д.т.н.,  
Дмитрий Александрович Михайлов<sup>2</sup>, к.т.н.,  
Наталья Сергеевна Пичко<sup>3</sup>, д.филос.н.,  
Елена Александровна Шейко<sup>4</sup>, к.т.н.

<sup>1</sup> Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, ДНР

<sup>2, 4</sup> Академия гражданской защиты МЧС ДНР, г. Донецк, ДНР

<sup>3</sup> УФ Ухтинского государственного технического университета, г. Усинск, Россия  
<sup>1, 2, 3, 4</sup> mntk21@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

**Аннотация.** Представлены методологические основы формирования функционально-ориентированных и эксплуатационных свойств структуры элементов газотурбинного двигателя, которые работают в условиях действия неравномерных эксплуатационных воздействий. Представлен состав элементов интегрированного многосвязного технологического процесса обеспечения функционально-ориентированных свойств элементов структуры газотурбинного двигателя. Приведены данные по повышению эксплуатационных свойств газотурбинного двигателя из условия обеспечения равных эксплуатационных свойств на основе формирования функционально-ориентированных свойств элементов и подсистем посредством специальных покрытий.

**Ключевые слова:** газотурбинный двигатель, структура элементов, неравномерный износ, методология, технология, функционально-ориентированные свойства, эксплуатационные свойства

**Для цитирования:** Михайлов А.Н., Михайлов Д.А., Пичко Н.С., Шейко Е.А. Методологические и технологические основы обеспечения функционально-ориентированных свойств структуры элементов газотурбинного двигателя // Научноёмкие технологии в машиностроении. – 2022. – №9 (135). – С. 38-48. doi: 10.30987/2223-4608-2022-9-38-48

Original article

## Methodological and technological bases for ensuring functionally-oriented properties of the structure of gas turbine engine elements

Aleksandr N. Mikhaylov<sup>1</sup>, Dr. Sc.Tech.,  
Dmitriy A. Mikhaylov<sup>2</sup>, Can. Sc. Tech.,  
Natalya S. Pichko<sup>3</sup>, Dr. Sc.Philos.,  
Elena. A. Sheiko<sup>4</sup>, Can. Sc. Tech.

<sup>1</sup> Donetsk National Technical University, Donetsk, DPR

<sup>2, 4</sup> Donetsk Academy of Civil Protection of the Ministry of Emergency Situations of the DPR

<sup>3</sup> Usinsk branch of Ukhta State Technical University, Usinsk, Russia

<sup>1, 2, 3, 4</sup> mntk21@mail.ru

**Annotation.** The paper presents the methodological foundations for the formation of functionally oriented and operational properties of the structure of GTE elements that operate under conditions of uneven operational impacts. To address these issues, a structural model has been developed to provide functionally-oriented properties to GTE elements, which is based on the system of parameters "structure-operation-properties-technology". Technological foundations for ensuring functionally oriented properties of the gas turbine engine structure are given, which allow forming the structure of an integrated multiply connected technological process based on functionally oriented operations and technological processes. The composition of the elements of an integrated multi-connected technological process for providing functionally-oriented properties of the elements of the GTE structure is presented. It also provides data on improving the performance properties of gas turbine engines from the condition of ensuring equal performance properties based on the formation of functionally oriented properties of elements and subsystems by means of special coatings.

**Keywords:** gas turbine engine; structure of elements; uneven wear; methodology; technology; function-oriented properties, operational properties

**For citation:** Mikhaylov A.N., Mikhaylov D.A., Pichko N.S., Sheiko E.A. Methodological and technological bases for ensuring functionally-oriented properties of the structure of gas turbine engine elements. / Science intensive technologies in Mechanical Engineering, 2022, no.9 (135), pp. 38-48. doi: 10.30987/2223-4608-2022-9-38-48

## Введение

Эксплуатация авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) сопровождается сложными процессами [1, 2], характеризующимися большими неравномерностями износа отдельных элементов и подсистем, возникающими из-за действия не одинаковых эксплуатационных воздействий. Выполненные исследования, представленные в работах [3, 4], позволили установить, что в процессе эксплуатации ГТД по структуре элементов действуют неравномерные износы  $R$ -родов, которые приводят к снижению эксплуатационного потенциала двигателя и его технико-экономических показателей.

Для повышения эксплуатационных показателей ГТД, в настоящее время, широко используется множество различных технологических методов упрочнения деталей, которые позволяют решать вопросы создания надежных авиационных двигателей. Отметим, что применяемые в последнее время отделочно-упрочняющие методы обработки изделий уже не позволяют вести дальнейшее повышение эксплуатационных свойств элементов структуры ГТД. Это обусловлено тем, что в основном уже исчерпаны резервы дальнейшего повышения эксплуатационных свойств ГТД.

При этом перспективным направлением повышения показателей эксплуатации ГТД является применение функционально-ориентированных свойств (ФОС) элементов структуры ГТД [5 – 8] и одновременного обеспечения равного, кратного или функционально-зависимых эксплуатационных свойств всех элементов и подсистем. Это позволяет решать вопросы повышения эксплуатационных показателей и технико-экономических показателей изготовления ГТД.

Целью данной работы является создание методологических и технологических основ формирования ФОС структуры элементов ГТД, работающих в условиях действия неравномерных эксплуатационных воздействий по элементам и подсистемам, на основе обеспечения равных, кратных или функционально-зависимых эксплуатационных свойств (ресурса) всех элементов и подсистем на основе установленных закономерностей (связей) параметров структуры, эксплуатации, обеспечения свойств и технологии.

### Методологические основы формирования функционально-ориентированных и эксплуатационных свойств структуры элементов ГТД

Отметим, что авиационный ГТД имеет сложную структуру элементов и подсистем,

которую можно характеризовать  $R$ -уровнями [9, 10]. При этом ГТД работают в сложных условиях эксплуатации, характеризующихся действием больших неравномерностей эксплуатационных воздействий на элементы и подсистемы двигателя, которые приводят к неравномерным разрушениям деталей и подсистем (групп лопаток). Это обусловлено особенностями структуры ГТД, компоновки и пространственного расположения элементов двигателя, кинематики элементов и подсистем, движением пылегазового потока по проточной части двигателя и других процессов.

Для повышения эксплуатационных свойств ГТД в ряде работ [6, 7, 9] предлагается обеспечивать элементам двигателя ФОС. Вместе с тем, ГТД имеет сложную структуру, состоящую из множества элементов и подсистем. Поэтому возникает вопрос, как обеспечить ФОС элементам и структуре одновременно заданные эксплуатационные свойства? А также – как обеспечить равные эксплуатационные свойства всех элементов структуры, чтобы все элементы структуры ГТД имели равные, кратные или функционально-зависимые эксплуатационные свойства?

Таким образом, для дальнейшего повышения эксплуатационных свойств ГТД необходимо одновременное выполнение следующего:

1. Обеспечение ФОС каждого элемента структуры.
2. Формирование ФОС структуре всех элементов ГТД.
3. Обеспечение равных, кратных или функционально-зависимых свойств всех элементов структуры ГТД.

Совместное решение этих вопросов позволит решать вопросы повышения эксплуатационных свойств ГТД, увеличения эксплуатационного потенциала всех элементов структуры двигателя, обеспечения его предельных эксплуатационных свойств, и в целом, повышения технико-экономических показателей.

Для решения этих вопросов в данной работе разработан общий методологический подход обеспечения ФОС структуры ГТД. Этот подход базируется на семи стадиях последовательного проектирования ГТД и обеспечения заданных ФОС его структуры.

На рис. 1 показаны основные стадии проектирования процессов в общей методологии обеспечения ФОС элементов структуры ГТД.

Отметим, что в данной методологии имеются прямые и обратные связи между стади-

ями проектирования для последовательных переходов в процессе проектирования и перескоков в их переходах. Это позволяет реализовывать итерационно-рекуррентные связи в процессе проектирования системы обеспечения ФОС «структура – эксплуатация – свойства – технология».

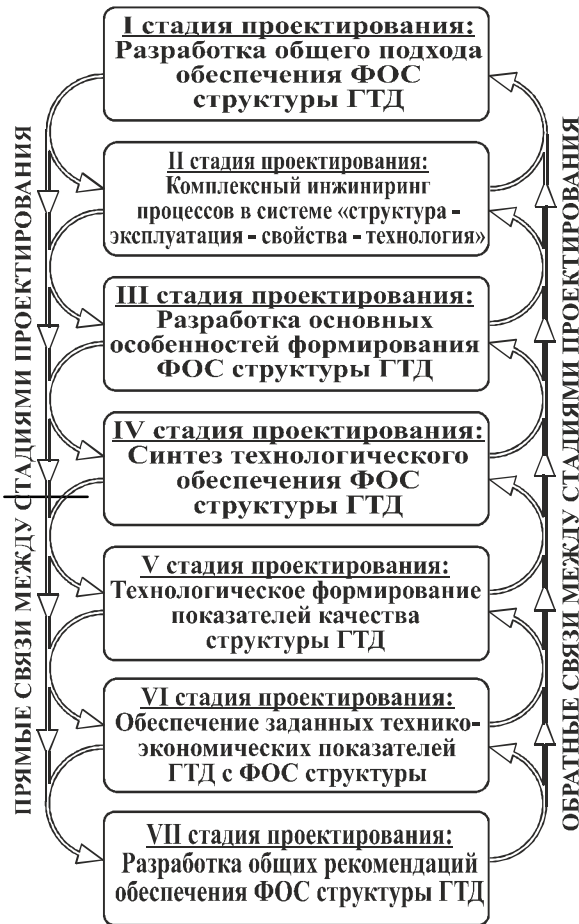


Рис. 1. Основные стадии проектирования процессов в общей методологии обеспечения ФОС элементов структуры ГТД

Рассмотрим более детально состав приведенных стадий проектирования.

На I стадии проектирования выполняется разработка общего подхода обеспечения ФОС структуры ГТД. Предлагаемый общий подход базируется на следующих моделях: на системной модели обеспечения ФОС структуры ГТД [9, 10]; на структурной модели комплексного обеспечения эксплуатационных и ФОС элементов структуры ГТД (рис. 2).

Системная модель обеспечения ФОС структуры ГТД основывается на системном подходе в одновременном обеспечении эксплуатационных свойств (например, надежность, безотказность, долговечность и т.п.) и ФОС (например, физико-механических свойств (ФМС)). Предлагаемая системная модель достаточно подробно описана в работах [9, 10].

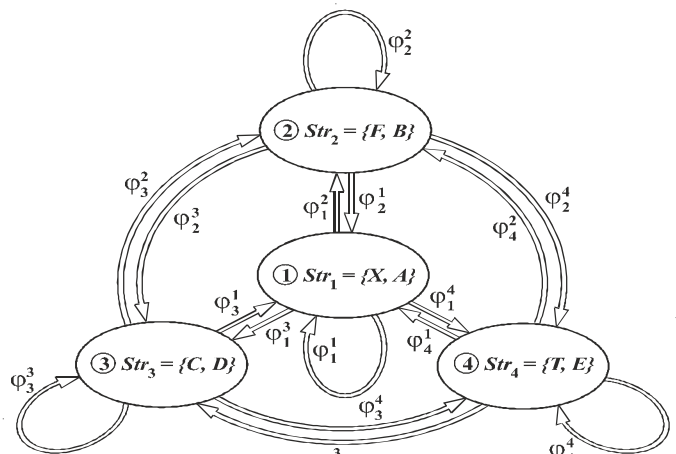


Рис. 2. Структурная модель общего подхода комплексного обеспечения эксплуатационных и ФОС элементов структуры ГТД

Структурная модель комплексного обеспечения эксплуатационных и ФОС элементов структуры ГТД разработана на базе системы со следующим составом этапов и структуры «структура – эксплуатация – свойства – технология» (см. рис. 2). Между элементами структурной модели действуют внутренние и внешние связи.

На базе этих моделей выполняется системное обеспечение эксплуатационных и ФОС структуры элементов ГТД по этапам его циклов «эксплуатация – свойства – технология».

На II стадии проектирования реализуется комплексный инжиниринг процессов проектирования в системе «структура – эксплуатация – свойства – технология» [11]. В этом случае, комплексный инжиниринг включает следующие виды инжиниринга [12]:

1. Структурно-эксплуатационно-свойственный инжиниринг, включающий подсистему с элементами 1-2-3 (см. рис. 2) и соответствующими прямыми и обратными связями  $\varphi_1^2 - \varphi_2^3 - \varphi_3^1$  и  $\varphi_1^3 - \varphi_2^2 - \varphi_1^2$ .

2. Структурно-эксплуатационно-свойственный инжиниринг, включающий подсистему с элементами 1-3-4 (см. рис. 2) и соответствующими прямыми и обратными связями  $\varphi_1^3 - \varphi_3^4 - \varphi_4^1$  и  $\varphi_1^4 - \varphi_3^3 - \varphi_3^1$ .

3. Структурно-эксплуатационно-свойственный инжиниринг, включающий подсистему с элементами 1-4-2 (см. рис. 2) и соответствующими прямыми и обратными связями  $\varphi_1^4 - \varphi_4^2 - \varphi_2^1$  и  $\varphi_1^2 - \varphi_4^4 - \varphi_4^1$ .

Комплексный инжиниринг процессов проектирования базируется на функционально-ориентированном подходе в обеспечении ФОС структуры ГТД [5]. А также этот процесс учитывает следующие особенности проектирования: наличие сложной структуры

элементов ГТД  $R$ -уровней; неравномерность действия на структуры элементов эксплуатационных функций  $R$ -родов; особенности формирования ФОС структуры ГТД  $R$ -классов; особенности реализации технологических процессов  $R$ -классов.

Следует отметить, что процесс реализации комплексного инжиниринга базируется на группе особых принципов ориентации технологических воздействий в зависимости от обеспечения ФОС и выполнения необходимой технологии [5].

Заметим, что на базе комплексного инжиниринга ГТД с ФОС структуры устанавливаются исходные данные, особенности связей и обеспечения технологических параметров его иерархической структуры на множестве ее элементов на базе единого критерия свойств, формируемых на трех этапах жизненного цикла обеспечения, а именно технология изготовления, обеспечение ФОС и особенности эксплуатации.

На III стадии проектирования выполняется разработка основных особенностей формирования ФОС структуры ГТД. При этом этот процесс выполняется с учетом того, что на каждый элемент и всю структуру элементов ГТД действуют неравномерные эксплуатационные функции  $R$ -родов [9, 10]. В этом случае, проводится распределение параметров ФОС по структуре элементов из условия обеспечения равных, кратных или функционально-зависимых эксплуатационных свойств структуры ГТД, например, ресурса [9 – 11].

Именно на этой стадии проектирования выполняется следующее:

– обеспечиваются заданные параметры эксплуатационных свойств структуры ГТД, а именно равные, кратные или функционально-ориентированные свойства всех элементов структуры [12];

– выполняется обеспечение ФОС структуры ГТД посредством реализации неравномерных и неодинаковых физико-механических свойств элементов структуры  $R$ -классов;

– производится комплексное обеспечение ФОС структуры на основе установленных связей параметров обеспечения физико-механических свойств, принципов и условий их распределения по элементам.

Далее на IV стадии проектирования выполняется синтез технологического обеспечения ФОС структуры ГТД: разрабатывается структура интегрированного многосвязного технологического процесса (ИМТП) обеспечения ФОС структуры ГТД; разрабатывается необходимое технологическое оборудование для реализации создаваемого ИМТП обеспечения ФОС структуры ГТД.

В этом случае, выполняется синтез множества технологических процессов обеспечения ФОС каждому элементу структуры ГТД  $R$ -классов, устанавливаются связи между параметрами этих технологических процессов и создается ИМТП. Далее проектируется необходимое технологическое оборудование.

Затем на V стадии проектирования осуществляется технологическое формирование показателей качества структуры ГТД: на базе установленных связей определяются технологические параметры операций для каждого элемента структуры ГТД из условия обеспечения равных, кратных или функционально-зависимых свойств всех элементов, при этом разрабатываются методы формирования изменяющихся физико-механических свойств (ФОС) элементов структуры ГТД в зависимости от действия эксплуатационных функций; устанавливаются технологические связи по структуре технологического процесса, а именно: между отдельными операциями технологического процесса для каждого элемента структуры ГТД и между отдельными технологическими процессами ИМТП.

Обеспечение заданных технико-экономических показателей ГТД с ФОС структуры выполняется на VI стадии проектирования (см. рис. 1). Поэтому на этой стадии проектирования реализуется обеспечение ФОС элементов структуры из условия оптимальности затрат на эксплуатацию и изготовление всех элементов ГТД:

$$Z_{\Sigma} = \left| \sum_{i=1}^n S_i + E_i \sum_{i=1}^n K_i \right| \rightarrow \min, \quad (1)$$

где  $Z_{\Sigma}$  – приведенные затраты на изготовление и эксплуатацию всех элементов структуры ГТД с ФОС;  $S_i$  – себестоимость эксплуатации  $i$ -го структурного элемента ГТД с ФОС;  $E_i$  – нормативный коэффициент экономической эффективности капиталовложений;  $K_i$  – капиталовложения, связанные с созданием  $i$ -го структурного элемента ГТД с ФОС;  $i$  – номер любого структурного элемента на множестве элементов ГТД;  $n$  – общее количество элементов (деталей) структуры ГТД.

Можно отметить, что процесс обеспечения ФОС структуре ГТД может выполняться на базе методов направленного поиска оптимальных вариантов структуры ГТД. При этом выполненные исследования показывают, что общее количество элементов структуры ГТД с ФОС может достигать 40...50 % от общего количества всех элементов ГТД [13].

На последней VII стадии проектирования выполняется разработка общих рекомендаций

обеспечения ФОС структуры элементов ГТД с учетом особенностей их эксплуатации и технологического обеспечения:

– по особенностям износа и разрушения элементов структуры ГТД при эксплуатации  $R$ -родов, устанавливаются закономерности и связи между этими параметрами по структуре  $R$ -уровней;

– по формированию ФОС структуры элементов ГТД  $R$ -классов, выполняемых из условия обеспечения их заданных эксплуатационных и физико-механических свойств, представляются закономерности и связи в обеспечении ФОС элементов структуры;

– по особенностям создания технологического обеспечения, параметрам создания ИМТП и оборудования для реализации ФОС структуры элементов ГТД  $R$ -классов, связям параметров процессов обеспечения ФОС.

Таким образом, общая методология обеспечения ФОС элементов структуры ГТД является многостадийным процессом с итерационно-рекуррентными связями, которая позволяет выполнять, уточнять и корректировать процесс создания ГТД с ФОС, а также равными, кратными или функционально-зависимыми свойствами структуры.

### Структурная модель и особенности обеспечения ФОС элементов ГТД

Газотурбинный двигатель состоит из множества элементов (деталей), которые структурированы в виде иерархической структуры. Это множество можно представить структурой элементов и отношениями между ними.

На рис. 2 представлена структурная модель общего подхода комплексного обеспечения эксплуатационных и ФОС элементов структуры ГТД. Здесь показаны следующие подсистемы:

1.  $Str_1 = \{X, A\}$  – структура элементов ГТД, где  $X$  – множество элементов ГТД;  $A$  – множество отношений (связей) на множестве  $X$ .

2.  $Str_2 = \{F, B\}$  – структура эксплуатационных функций, действующих на структурные элементы ГТД при эксплуатации, где  $F$  – множество элементов эксплуатационных функций, вызывающих износы и разрушения элементов ГТД;  $B$  – множество отношений (связей) на множестве  $F$ .

3.  $Str_3 = \{C, D\}$  – структура ФОС (физико-механических свойств) элементов ГТД при эксплуатации, где  $C$  – множество ФОС элементов ГТД;  $D$  – множество отношений (связей) на множестве  $C$ .

4.  $Str_4 = \{T, E\}$  – структура технологических процессов, необходимых для обеспечения ФОС структуры ГТД, где  $T$  – множество технологических процессов обеспечения ФОС структуры ГТД;  $E$  – множество отношений (связей) на множестве  $T$ .

Между подсистемами (см. рис. 2) структурной модели общего подхода комплексного обеспечения эксплуатационных и функционально-ориентированных свойств элементов структуры ГТД действуют связи, а именно прямые  $\phi_i^j$  и обратные  $\phi_j^i$ , а также представлены петли  $\phi_i^i$ , которые обозначают внутреннее развитие данной подсистемы ( $i$  – номер (оператор) подсистемы модели, когда заданная подсистема действует на соседнюю подсистему и наоборот;  $j$  – номер (операнд) подсистемы модели, когда заданная подсистема действует на соседнюю подсистему и наоборот).

На базе разработанной структурной модели последовательно выполняются следующие процессы:

1. Проводится анализ особенностей износа и разрушения элементов структуры ГТД с неравномерностями  $R$ -родов.

2. Выполняется формирование ФОС (физико-механических свойств) элементов структуры ГТД с особенностями выполнения  $R$ -классов.

3. Производится создание интегрированно-го многосвязной технологии обеспечения ФОС, состоящей из множества технологий изготовления отдельных элементов структуры  $R$ -классов.

4. С помощью внешних связей  $\phi_i^j$  и  $\phi_j^i$  устанавливаются необходимые закономерности обеспечения эксплуатационных свойств элементов структуры, а именно равные, кратные или функционально-зависимые свойства (например, ресурс, назначенный ресурс или гарантированный ресурс и т.п.).

5. На базе внутренних связей  $\phi_i^i$  (петель) выполняется переходы от одного элемента структуры ГТД к другому при обеспечении необходимых ФОС (изменяющихся физико-механических свойств) элементов структуры. При этом внутренние связи (петли) имеются на всех четырех подсистемах структурной модели общего подхода комплексного обеспечения эксплуатационных и функционально-ориентированных свойств элементов структуры ГТД.

Можно отметить, что процессы обеспечения ФОС элементов структуры ГТД объединены в замкнутую структуру, используется итерационно-рекуррентный принцип проектирования, выполняется обеспечение эксплуатационных и физико-механических свойств на базе группы принципов функционально-ориентиро-

ванного подхода в обеспечении ФОС [5].

### Закономерности обеспечения ФОС и эксплуатационных свойств структуры ГТД

Выполненные исследования [12] позволили

установить следующие закономерности или условия распределения ФОС в зависимости от обеспечения равного, кратного или функционально-зависимого ресурса элементов структуры ГТД:

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

где  $C_j$  – показатели эксплуатационных свойств  $j$ -го критического элемента (наиболее изнашиваемого 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, обеспечивающих выполнение заданных эксплуатационных свойств;  $\mu_j$  – интенсивность разрушения  $j$ -го критического элемента структуры ГТД;  $P_i$  – совокупность ФМС  $i$ -го элемента структуры ГТД, обеспечивающих выполнение заданных  $C_i$  показателей эксплуатационных свойств (например, общее количество допустимых циклов нагружения элемента структуры, толщина износостойкого покрытия и т.п.);  $\mu_i$  – интенсивность разрушения  $i$ -го элемента структуры ГТД;  $M_i$  – 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;  $C_i$  – показатель 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 (2) представлены три варианта обеспечения эксплуатационных параметров. При конкретном формировании ФОС структуры ГТД следует выбирать один необходимый вариант распределения эксплуатационных свойств по элементам структуры.

Например, при формировании ФОС струк-

туры элементов ГТД, интенсивность разрушения  $i$ -го элемента определяется на основании следующей зависимости:

$$\mu_i = \frac{P_i}{P_j} \mu_j. \quad (3)$$

При обеспечении равного ресурса лопаток компрессора ГТД на базе функционально-ориентированных покрытий (например, вакуумные нитрид титановые покрытия), выражение (1) можно представить следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} R_j &= \frac{h_j}{\mu_{oj}} \rightarrow (\max \vee M_i); \mu_{oj} = f_{oj}(F_j, C_j^o, T_j); \\ R_1 &= R_2 = \dots = R_i = \dots = R_n; \\ R_i &= \frac{h_i}{\mu_{oi}}; \mu_{oi} = f_{oi}(F_i, C_i^o, T_i), \end{aligned} \right\} (4)$$

$R_j$  – ресурс  $j$ -й критической лопатки компрессора ГТД;  $h_j$  – толщина нитрид титанового покрытия  $j$ -й критической лопатки компрессора, обеспечивающая выполнение  $R_j$  ресурса;  $\mu_{oj}$  – интенсивность износа покрытия  $j$ -ой критической лопатки компрессора;  $R_i$  – ресурс  $i$ -й критической лопатки компрессора ГТД;  $h_i$  – толщина нитрид титанового покрытия  $i$ -й лопатки компрессора, обеспечивающая выполнение  $R_i$  ресурса;  $\mu_{oi}$  – интенсивность износа покрытия  $i$ -й 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 (4) для  $j$ -й 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  $j$ -й критической лопатки компрессора ( $t_j=R_j$ ) в полный период ее эксплуатации;  $h$  – величина износа нитрид титанового покрытия в заданный период времени  $t$ .

### Технологические основы обеспечения ФОС структуры элементов ГТД

Для формирования ФОС элементов структуры ГТД необходимо создание ИМТП. При этом связи между технологическими параметрами этого процесса определяются из условия обеспечения равных, кратных или функционально-зависимых эксплуатационных свойств структурных элементов ГТД [10, 13]. Интегрированный многосвязный технологический процесс обеспечения ФОС структуры

ГТД формируется для множества элементов его структуры и создается на базе следующих иерархических составляющих технологического процесса: функционально-ориентированных операций (ФОО) обеспечения ФОС элементов структуры; функционально-ориентированных технологических процессов (ФОТП) обеспечения ФОС множеству элементов ГТД; ИМТП обеспечения ФОС структуры ГТД.

На рис. 3 представлена схема синтеза интегрированного многосвязного технологического процесса обеспечения ФОС структуры ГТД: элементы структуры,  $k$ -я ФОО для  $i$ -го элемента структуры,  $i$ -й ФОТП обеспечения ФОС элемента, ИМТП обеспечения ФОС структуры.

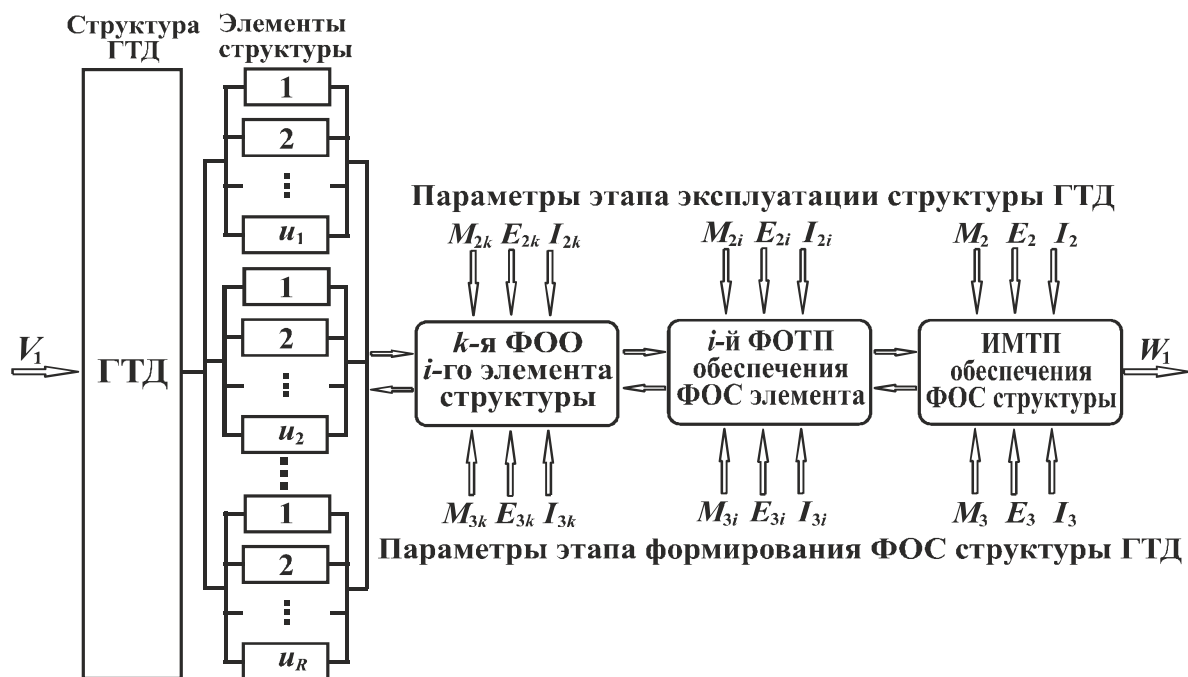


Рис. 3. Схема синтеза интегрированного многосвязного технологического процесса (ИМТП) обеспечения ФОС структуры ГТД

Структура ГТД может быть представлена в виде групп  $R$ -уровней:  $V_1$  – входные параметры ИМТП;  $W_1$  – выходные параметры ИМТП;  $M_{2k}, E_{2k}, I_{2k}$  – входные начальные параметры ФОО, получаемые с этапа эксплуатации структуры ГТД (см. рис. 2), моделируемые потоками материи, энергии и информации, соответственно;  $M_{2i}, E_{2i}, I_{2i}$  – входные начальные параметры ФОТП, получаемые с этапа эксплуатации структуры ГТД (см. рис. 2),

моделируемые потоками материи, энергии и информации, соответственно;  $M_2, E_2, I_2$  – входные начальные параметры ИМТП, получаемые с этапа эксплуатации структуры ГТД (см. рис. 2), моделируемые потоками материи, энергии и информации, соответственно;  $M_{3k}, E_{3k}, I_{3k}$  – входные начальные параметры ФОО, получаемые с этапа формирования ФОС структуры ГТД (см. рис. 2), моделируемые потоками материи, энергии и информации, соответ-

ственно;  $M_{3i}, E_{3i}, I_{3i}$  – входные начальные параметры ФОТП, получаемые с этапа формирования ФОС структуры ГТД (см. рис. 2), моделируемые потоками материи, энергии и информации, соответственно;  $M_3, E_3, I_3$  – входные начальные параметры ИМТП, получаемые с этапа формирования ФОС структуры ГТД (см. рис. 2), моделируемые потоками материи, энергии и информации, соответственно.

Следует также отметить, что схема синтеза ИМТП предусматривает замкнутые процессы синтеза множества ФОО для  $i$ -го ФОТП и множества ФОТП для ИМТП обеспечения ФОС структуры ГТД, которые показаны прямыми и обратными горизонтальными стрелками на рис. 3. В представленной схеме синтеза ИМТП обеспечения ФОС структуры ГТД вертикальные стрелки потоков материи,

энергии и информации моделируют связи с этапами эксплуатации (см. рис. 3, поз. 2) и формирования ФОС (см. рис. 3, поз. 3).

Таким образом, с помощью представленной схемы синтеза (см. рис. 3) выполняется последовательное формирование ИМТМ обеспечения ФОС структуры ГТД. При этом с помощью приведенных связей, разработанных принципов и условий решаются вопросы обеспечения равных, кратных или функционально-зависимых свойств всех структурных элементов ГТД, выполняемых с обеспечением ФОС.

Следует отметить, что при формировании ФОС по каждому  $i$ -му ФОТП для  $i$ -го элемента структуры ГТД возможны следующие варианты обеспечения ФОС: с полным обеспечением ФОС всех операций; с частичным обеспечением ФОС всех операций; без обеспечения ФОС всех операций (рис. 4).

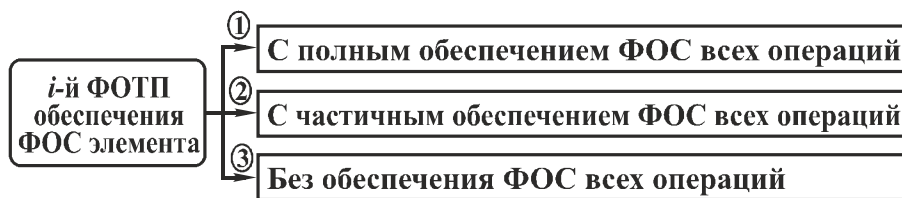


Рис. 4. Варианты функционально-ориентированного технологического процесса (ФОТП) обеспечения ФОС  $i$ -го элемента структуры ГТД

Выбор заданного варианта структуры обеспечения ФОС определяется начальными данными, получаемыми с этапа ее эксплуатации (см. рис. 2), и может определяться 40...50 % элементов от общего числа деталей в ГТД. На рис. 5 представлены иерархическая структура ИМТП обеспечения ФОС структуры

ГТД и уровни связей параметров между множеством технологических процессов (ТП) (1-й ФОТП, 2-й ФОТП, ...,  $i$ -й ФОТП, ...,  $n$ -й ФОТП) и множеством операций (1-я ФОО, 2-я ФОО, ...,  $k$ -я ФОО, ...,  $K$ -я ФОО). На базе этой иерархической структуры формируется ИМТП обеспечения ФОС структуры элементов ГТД.

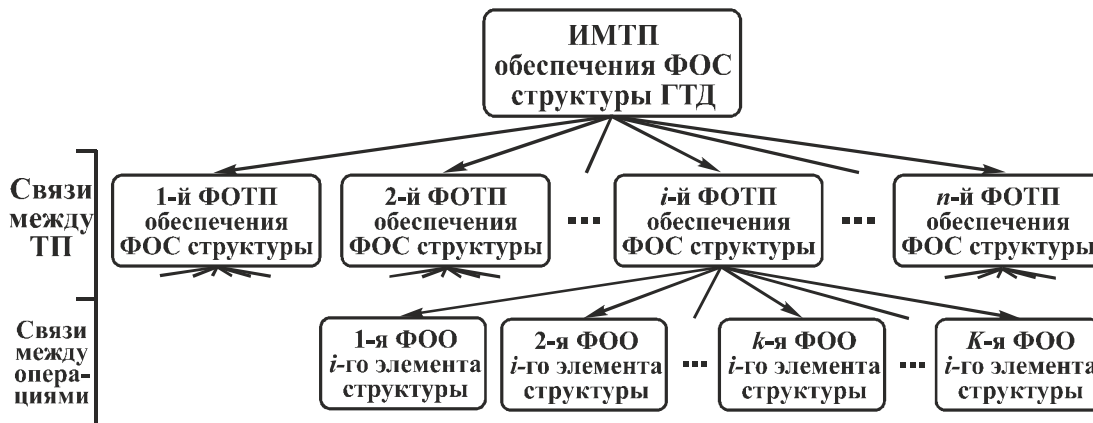


Рис. 5. Структура интегрированного многосвязного технологического процесса (ИМТП) обеспечения ФОС структуры ГТД и уровни связей параметров



### Обеспечение функционально-ориентированных и эксплуатационных свойств структуры ГТД на базе специальных покрытий лопаток турбокомпрессора

Для решения вопросов повышения эксплуатационных свойств (ресурса) и обеспечения равного ресурса элементов структуры ГТД на базе формирования ФОС были проведены исследования с применением функционально-ориентированных покрытий (ФОП), выполненных на основе вакуумных ионно-плазменных покрытий: для лопаток компрессора – многослойное ФОП на основе нитрид-титана; для лопаток турбины – многослойное ФОП на основе нитрид-цирконий-титана.

При этом процесс формирования многослойных ФОП выполнен в соответствии с особенностями напыления покрытий, представленных в работе [7]. Предлагаемый способ напыления ФОП позволяет решать вопросы обеспечения ФОС лопаткам посредством многослойных покрытий равной толщины каждого слоя и его пространственного контура границ (ПКГ), выполнять общее покрытие переменной толщины в зависимости от действия неравномерных эксплуатационных функций на элементы пера лопатки.

На рис. 6 показана схема обеспечения равного ресурса лопаток компрессора и турбины на базе многослойного ФОП с ПКГ каждого слоя.

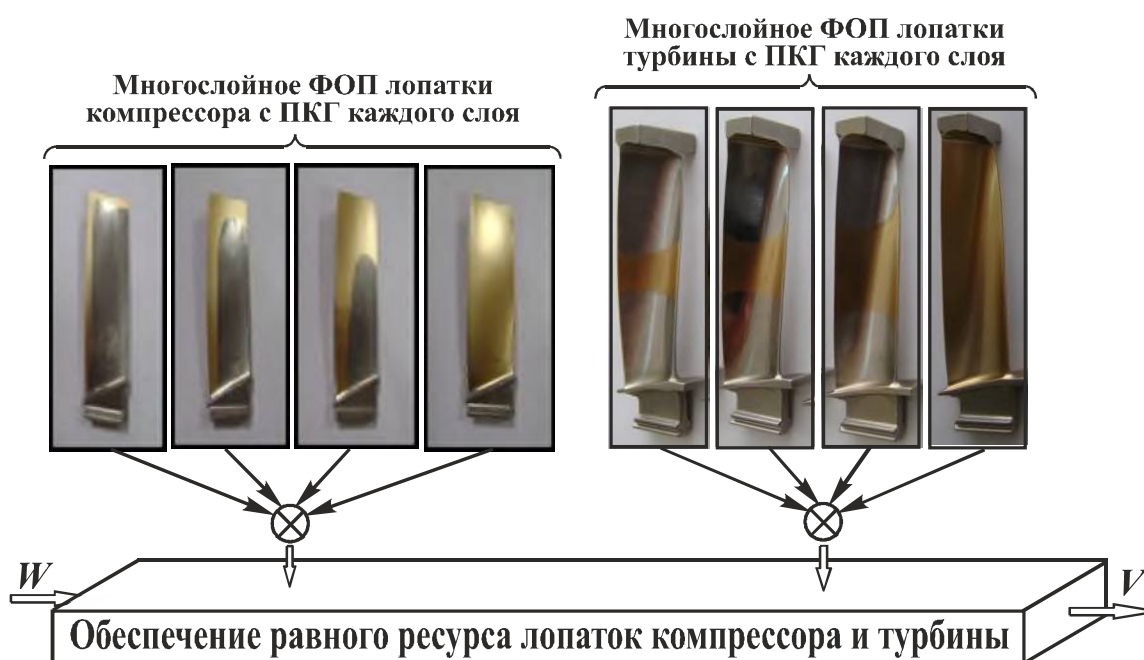


Рис. 6. Схема обеспечения равного ресурса лопаток компрессора и турбины на базе многослойного ФОП с ПКГ каждого слоя

Зная интенсивность износа ФОП лопатки компрессора и турбины, их ПКГ износа каждого слоя, особенности напыления многослойного ФОП [7] обеспечивается равный ресурс лопаток компрессора и турбины, а также в целом реализуется значительное повышение ресурса всех лопаток турбокомпрессора.

### Заключение

Выполненные исследования позволили представить методологические и технологические основы формирования ФОС структуры элементов ГТД, работающих в условиях

действия неравномерных эксплуатационных свойств (ресурса) всех элементов и подсистем посредством установленных закономерностей (связей) параметров структуры, эксплуатации, обеспечения свойств и технологии.

В работе разработаны методологические основы формирования ФОС структуры элементов ГТД, которые базируются на обеспечении равных, кратных или функционально-зависимых эксплуатационных свойств элементов и подсистем структуры. Представлена структурная модель обеспечения ФОС элементов ГТД в системе «структура – эксплуатация – свойства –

технология», которая позволяет решать вопросы повышения эксплуатационных свойств ГТД и формирования ФОС в зависимости от действия неравномерных эксплуатационных воздействий  $K$ -родов. В работе установлены закономерности обеспечения ФОС и эксплуатационных свойств структуры ГТД. А также представлены технологические основы обеспечения ФОС структуры элементов ГТД и приведены конкретные варианты обеспечения ФОС и эксплуатационных свойств структуры ГТД на базе ФОП лопаток турбокомпрессора.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Демин, Ф.И., Проничев, Н.Д., Шитарев, И.Л. Технология изготовления основных деталей газотурбинных двигателей. – М.: Машиностроение, 2002. – 328 с.
2. **Авиаинформ** / Ежемесячный информационно-аналитический журнал. – М.: Международная ассоциация «Союз авиационного двигателестроения», 2021. – №6 (207). – 88 с.
3. **Вертолетные** газотурбинные двигатели / В.А. Григорьев, В.А. Зрелов, Ю.М. Игнаткин и др. – М.: Машиностроение, 2007. – 491 с.
4. Михайлов, Д.А. Основные особенности эксплуатации лопаток компрессора ГТД и классификация их эксплуатационных функций // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – 2015. – №4 (50). – С. 126-131.
5. Михайлов, А.Н. Основы синтеза функционально-ориентированных технологий машиностроения: монография. – Донецк: ДонНТУ, 2009. – 346 с.
6. Михайлов, А.Н., Михайлов, Д.А. Технологические особенности повышения ресурса деталей газотурбинных двигателей на основе обеспечения функционально-ориентированных свойств // Инновации в машиностроении: сборник трудов XII Международной научно-практической конференции. – Новосибирск: НГТУ, 2021. – С. 76-83.
7. Пат. № 2718877 РФ. 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.
8. Пат. України на винахід № 94961. Кл. В23Р 15/00. Лопатка газотурбінного двигуна. // Михайлов О.М., Недашковський О.П., Михайлова О.О., Михайлов Д.О. Дата подання заявки 23.03.2010; Бюл. №12 від 25.06.2011. – 5 с.
9. Некоторые особенности формирования функци-

онально-ориентированных свойств структуры газотурбинного двигателя и связей параметров технологических процессов / Д.А. Михайлов, А.Н. Михайлов и др. // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – 2021. – №3 (74). – С. 50-64.

10. Особенности обеспечения функционально-ориентированных свойств структуре газотурбинного двигателя на базе комплексной многосвязной технологии / Д.А. Михайлов и др. // Передовые технологические разработки: перспективы внедрения в производство и эффективность: Сб. тр. МНТК. – Армавир: КГТУ, АМТИ, 2021. – С. 13-18.

11. Общие особенности технологического инжиниринга газотурбинного двигателя с функционально-ориентированными свойствами структуры / Д.А. Михайлов, А.Н. Михайлов // Научноёмкие технологии в машиностроении. – 2021. – №10 (124). – С. 28-38.

12. Михайлов, Д.А. Основные особенности и условия обеспечения эксплуатационных и функционально-ориентированных свойств газотурбинного двигателя по его структуре // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – 2022. – №2 (77). – С. 35-39.

13. Михайлов, Д.А. Общая методология синтеза комплексного многосвязного технологического процесса обеспечения функционально-ориентированных свойств газотурбинного двигателя структуре // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – 2021. – №1 (72). – С. 40-57.

## REFERENCES

1. Demin, F.I., Pronichev, N.D., Shitarev, I.L. Manufacturing technology of main parts of gas turbine engines. – M.: Mechanical Engineering, 2002. – 328 p.
2. Aviainform / Monthly information and analytical magazine. M.: International Association «Union of Aviation Engine Building», 2021. Issue. No. 6 (207). 88 p.
3. Helicopter Gas Turbine Engines. / V.A. Grigoriev, V. A. Zrelov, Yu.M. Ignatkin et al / Moscow: Mashinostroenie, 2007, 491 p.
4. Mikhailov, D.A. Basic peculiarities in GTE compressor blades operation and their operation functioning classification / Efficient Technologies and Mechanical Engineering Systems, 2015, no.4(50), pp. 126-131.
5. Mikhailov, A.N. Fundamentals of Functionally directed Mechanical Engineering Technology Synthesis. Monography. Donetsk: DonNTU, 2009. 346 p.
6. Mikhailov, A.N., Mikhailov, D.A. Technological features of increasing the resource of gas turbine engine parts based on the provision of function-oriented properties. Innovatsii v mashinostroenii. Innovations in machine structure. Proceedings of the XII International Scientific and Practical Conference. Novosibirsk: NSTU, 2021, pp. 76-83.
7. Patent No. 2718877. Russian Federation. C23C 14/04. Mikhailov A. N., Mikhailov D. A., Mikhailov A.N.

V. A. Method for applying a functionally oriented wear-resistant coating to a gas turbine engine blade [et al.]. Application No. 2018107164 dated February 26, 2018. - Bull. No. 11, 04/15/2020. - 7 p.

8. Patent of Ukraine for wines No. 94961. Class. B23P 15/00. Blade of a gas turbine engine. // Mikhaylov O. M., Nedashkovsky O. P., Mikhaylova O. O., Mikhaylov D. O. Application date 23.03.2010; Bull. No. 12 dated 06/25/2011. - 5 p.

9. Some features of the formation of function-oriented properties of the gas turbine engine structure and technological process parameters associations / D.A. Mikhailov, A. N. Mikhailov et al. Advanced technologies and machine building systems, 2021, №3 (74), pp. 50-64.

10. Specificity for providing function-oriented properties of a gas turbine engine structure based on a complex multi-connected technology / D.A. Mikhailov et al. Advanced technological developments: prospects for introduction into production and efficiency. Proceedings of the ISTC.

Armavir: KSTU, AMTI, 2021, pp. 13-18.

11. General features of technological engineering of a gas turbine engine with function-oriented structure properties / D.A. Mikhailov, A.N. Mikhailov / Science intensive technologies in machine-building, 2021, no.10 (124), pp. 28-38.

12. Mikhailov, D.A. Leading particulars and key factors for providing operational and function-oriented properties of a gas turbine engine according to its structure // Progressive technologies and systems of mechanical engineering, 2022, no. 2 (77), pp. 35-49.

13. Mikhaylov, D. A. General methodology for the synthesis of a complex multi-connected technological process for providing functionally oriented properties of a gas turbine engine to the structure // Progressive technologies and systems of mechanical engineering: International collection of articles. scientific works. Donetsk: DonNTU, 2021. Issue. 1 (72). P. 40-57.

**Вклад авторов:** все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Contribution of the authors:** the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 27.06.2022; одобрена после рецензирования 30.06.2022; принята к публикации 05.07.2022.

The article was submitted 27.06.2022; approved after reviewing 30.06.2022; accepted for publication 05.07.2022.

---

Учредитель и издатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Брянский государственный технический университет»

Адрес редакции и издателя: 241035, Брянская область, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7  
ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»

Телефон редакции журнала: 8-903-592-87-39, 8-903-868-85-68.

E-mail: naukatm@yandex.ru, editntm@yandex.ru

Вёрстка С.В. Морозов. Редактор Д.А. Петраченко. Технический редактор С.В. Морозов.

Сдано в набор 17.09.2022. Выход в свет 30.09.2022.

Формат 60 × 84 1/8. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 5,58.

Тираж 500 экз. Свободная цена.

Отпечатано в лаборатории оперативной полиграфии

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Брянский государственный технический университет»

241035, Брянская область, г. Брянск, ул. Институтская, 16