

УДК 621.45.0.002.2

<sup>1</sup>А. П. Пичко, аспирант, <sup>2</sup>Д. А. Михайлов, канд. техн. наук, доц.,  
<sup>2</sup>Е. А. Шейко, канд. техн. наук, доц., <sup>1</sup>А. Н. Михайлов, д-р техн. наук, профессор  
<sup>1</sup>ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет», г. Донецк, ДНР  
<sup>2</sup>ГОУВПО «Донецкая академия гражданской защиты», г. Донецк, ДНР  
Тел.: +38 (071) 3060879; E-mail: [tm@fimm.donntu.org](mailto:tm@fimm.donntu.org)

## СТРУКТУРНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ОТДЕЛОЧНО-УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ ЛОПАТОК ТУРБОКОМПРЕССОРА ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК НЕФТЕГАЗОВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

*В представленной работе выполнен анализ особенностей структуры и эксплуатации газотурбинных установок, работающих в нефтегазовой промышленности. Разработана структурная схема реализации одинакового ресурса лопаток компрессора и лопаток турбины. Представлены математические зависимости моделирующие принципы реализации одинакового ресурса лопаток компрессора и турбины. А также приведена структурная схема синтеза технологических процессов для производства лопаток компрессора и турбины с функционально-ориентированными покрытиями на базе системного подхода.*

*Ключевые слова:* газотурбинная установка, структура, ресурс, технология, функционально-ориентированное покрытие, общий подход, технология.

A. P. Pichko, D. A. Mikhaylov, E. A. Sheyko, A. N. Mikhaylov

## THE STRUCTURAL TECHNOLOGY OF FINISHING-STRENGTHENING MACHINING OF THE BLADES OF THE TURBO COMPRESSOR GAS TURBINES OIL AND GAS INDUSTRY

*In the present work the analysis of the features of the structure and operation of gas turbine units operating in the oil and gas industry. The structural scheme of realization of identical resource of compressor blades and turbine blades is developed. The mathematical modeling based on the principles of realization of the same resource of the blades of the compressor and turbine. The structural scheme of synthesis of technological processes for the production of compressor and turbine blades with functionally oriented coatings based on the system approach is also presented.*

*Keywords:* gas turbine plant, structure, resource, technology, function-oriented coating, general approach, technology.

### 1. Введение

В нефтегазовой промышленности широко используются газотурбинные установки (ГТУ) для выполнения различных технологических задач [1, 2]. В настоящее время они применяются в производстве электроэнергии совместно с газовой и паровой турбинами и совместном производстве тепла и электроэнергии, а также для обеспечения работы различного технологического оборудования компрессорных и насосных станций. В ряде случаев, для обеспечения работы технологического оборудования насосных и компрессорных станций применяют авиационные, в том числе турбовальные газотурбинные двигатели. При этом для рационального использования добываемых ресурсов, для ГТУ могут использоваться попутные нефтяные газы. Это позволяет одновременно обеспечивать решение вопросов обеспечения энергетических проблем технологического оборудования и утилизации вредных выбросов газов.

Выполненный анализ особенностей эксплуатации ГТУ, например, обеспечивающих электроэнергией Хасырейское, Черпауское, Нядейское и Осовейское месторождения Вала Гамбурцева Тимано-Печерской нефтегазоносной провинции, позволил установить, что эти установки эксплуатируются в сложных условиях. При этом на этих

установках группы лопаток компрессора и турбин турбокомпрессоров работают в принципиально различных условиях.

В 2017 году Объединенная двигателестроительная компания (ОДК) и китайская государственная компания Harbin Turbine Company (HTC) [3, 4] заключили соглашение о стратегическом партнерстве по поставкам, производству и разработке промышленных газотурбинных агрегатов малой и средней мощности.

Основными заказчиками газотурбинной техники промышленного назначения ОДК в России являются ПАО «Газпром», ПАО «НК «Роснефть», ПАО «Лукойл», ОАО «Сургутнефтегаз» и другие [3, 4].

Газоперекачивающее оборудование ОДК, в первую очередь, газотурбинные установки типа ПС-90ГП, широко применяют на ключевых газопроводах ПАО «Газпром», «Сила Сибири», Северо-Европейский газопровод, «Ухта-Торжок» [4].

Можно отметить, что в целом ГТУ состоит из множества функциональных элементов, выполняющих заданные технические функции. При этом его основными элементами являются лопатки компрессора и турбин, которые образуют турбокомпрессор ГТУ. Отметим, что в турбокомпрессоре, а именно, в зоне компрессора и зоне турбин действуют неодинаковые эксплуатационные функции. К этим функциям можно отнести следующие: абразивно-эрозионные, коррозионные, температурные, химические и другие. Действующие неодинаковые воздействия в подсистемах турбокомпрессора приводят к возникновению специфических особенностей разрушения лопаток. Например, в компрессоре преобладает эрозионный износ лопаток, а турбинные лопатки испытывают больше химико-термические и эрозионные разрушения.

Кроме того, наряду с неравномерностями действия эксплуатационных воздействий и разрушений по подсистемам ГТУ, происходит неравномерное воздействие и разрушение элементов каждой лопатки. Неравномерность действия эксплуатационных функций по элементам лопатки обусловлено пространственной формой пера лопатки, его пространственным расположением, кинематикой движения лопатки, особенностями движения газовоздушного потока по тракту ГТУ, температурными воздействиями и наличием в потоке различных веществ, абразива, солей, кислот и тому подобного.

Целью данной работы является повышение ресурса ГТУ нефтегазовой промышленности за счет обеспечения лопаток турбокомпрессора функционально-ориентированных свойств на основе разработки структурно-технологического обеспечения отделочно-упрочняющей обработки лопаток компрессора и турбины путем применения функционально-ориентированных покрытий и обеспечения равенства ресурсов лопаток компрессора и лопаток турбины.

В соответствии с поставленной целью в работе решаются следующие вопросы: выполнить анализ особенностей структуры и эксплуатации ГТУ; предложить общие положения и принципы комплексного обеспечения функционально-ориентированных свойств лопаток компрессора и лопаток турбины; разработать структурную схему синтеза технологических процессов лопаток компрессора и турбины с функционально-ориентированными покрытиями (ФОП) на базе системного подхода.

Эти задачи решаются в данной работе.

## **2. Особенности структуры и эксплуатации газотурбинной установки**

ГТУ представляют собой сложную систему, состоящую из множества элементов и подсистем, объединенных в общую систему для решения заданных технологических задач. На рис. 1 представлен общий вид ГТУ со свободной турбиной. В целом, ГТУ состоит из множества различных подсистем, которые показаны на рис. 2 с помощью

принципиально-структурной схемы. На рис. 2 показаны следующие составляющие: 1 - входной направляющий аппарат, 2 - компрессор, 3 - камера сгорания, 4 - турбина компрессора, 5 - корпус турбины, 6 - свободная (рабочая) турбина, 7 - устройство выхлопа, 8 выходной вал. А также на рис. 2 буквами показано следующее:  $V_1$  - входной поток воздуха в ГТУ,  $V_2$  - подача топлива в камеру сгорания,  $W$  - выхлоп из ГТУ,  $L$  - длина ГТУ.

Можно отметить, что компрессор в ГТУ объединен с турбиной. Это объединение представляет собой турбокомпрессор.

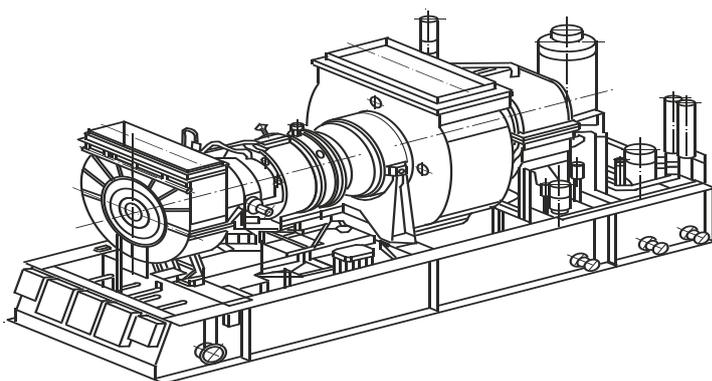


Рисунок 1. Общий вид газотурбинной установки

достигает  $\mu = 30$  (30:1) и более. Это обеспечивает повышение теплового коэффициента полезного действия более 40 %.

Для ГТУ используются два типа компрессоров - центробежный и осевой. Центробежные компрессоры широко используются в газотурбинных двигателях, особенно в небольших габаритных размеров. В современных ГТУ центробежные компрессоры создают степень сжатия  $\mu_{ц} \leq 10$  (10:1). Центробежные компрессоры имеют жесткую конструкцию, они дешевле и проще в изготовлении, имеют более простую балансировку и не требуют наличия сложной системы регулирования воздуха.

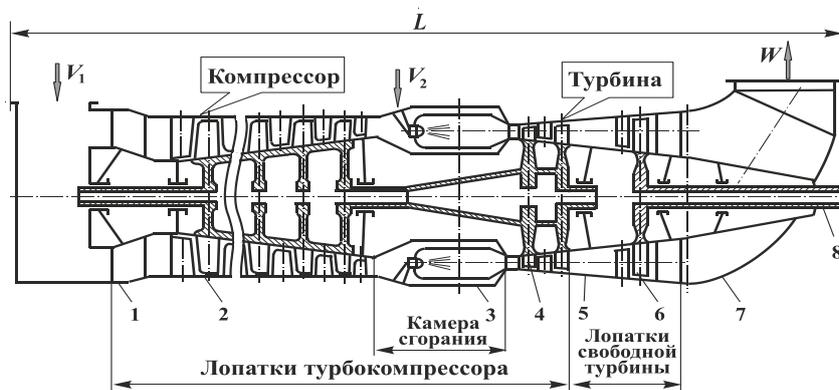


Рисунок 2. Принципиально-структурная схема ГТУ со свободной турбиной

Вместе с тем, для достижения большой степени сжатия воздуха в центробежном компрессоре требуется в ряде случаев, многоступенчатая его конструкция.

### 3. Общие положения и принципы комплексного обеспечения функционально-ориентированных свойств лопаток компрессора и турбины.

Для повышения ресурса лопаток турбокомпрессора, а именно компрессора, турбины компрессора и рабочей (свободной) турбин необходимо обеспечить одинаковый ресурс этих подсистем. В этом случае, следует в целом повышать ресурс всех лопаток турбокомпрессора, а также увеличивать ресурс лопаток турбин до значений ресурса

лопаток компрессора. Это повышает и выравнивает ресурсы различных групп лопаток турбокомпрессора и свободной турбины, а также повышает эксплуатационный потенциал всей ГТУ.

На рис. 3 представлена структурная схема реализации одинакового ресурса лопаток компрессора и турбины с учетом системного подхода [5]. Для того чтобы выпол-

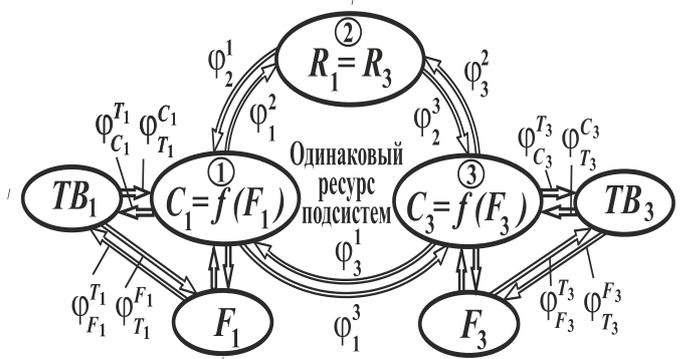


Рисунок 3. Структурная схема реализации одинакового ресурса лопаток компрессора и турбины

нить одинаковый ресурс групп лопаток \$R\_1 = R\_3\$ компрессора \$R\_1\$ и турбин \$R\_3\$ необходимо чтобы свойства этих лопаток определялись следующим выражением:

$$\left. \begin{aligned} C_1 &= f(F_1); \\ C_3 &= f(F_3), \end{aligned} \right\}$$

где \$C\_1\$ и \$C\_3\$ – свойства групп лопаток компрессора и турбин, соответственно;

\$F\_1\$ и \$F\_3\$ – эксплуатационные функции, действующие соответственно на группы лопаток компрессора и турбин;

\$f\$ – функциональная зависимость свойств лопаток от их ресурса.

Для того чтобы реализовать одинаковый ресурс групп лопаток компрессора и турбин необходимо выполнять соответствующие технологические воздействия для групп лопаток компрессора \$TB\_1\$ и турбин \$TB\_3\$. Эти технологические воздействия должны формироваться на базе основных принцип функционально-ориентированных технологий [6, ..., 9], которые могут быть следующие:

- функционально-ориентированные отделочно-упрочняющие методы,
- функционально-ориентированные специальные покрытия,
- функционально-ориентированные комбинированные методы обработки.

На рис. 3 стрелки показывают связи (отношения) \$\varphi\_i^j\$ между объектами общего схемы реализации одинакового ресурса лопаток компрессора и турбин. Можно отметить, что одинаковый ресурс групп лопаток компрессора и турбин должен выполняться на основе принципа структурного соответствия свойств лопаток, эксплуатационных функций, действующих на эти лопатки, и технологических воздействий, необходимых для обеспечения заданных свойств групп лопаток. Этот принцип математически можно представить следующей системой отображений [6]:

$$\left. \begin{aligned} \varphi_A &: Str\{F, A\} \rightarrow Str\{TB, B\}; \\ \varphi_B &: Str\{TB, B\} \rightarrow Str\{C, D\}; \\ \varphi_C &: Str\{C, D\} \rightarrow Str\{F, A\}, \end{aligned} \right\}$$

где \$\varphi\_A\$ - отображение (преобразование) структуры множества эксплуатационной функции \$F = \{F\_1, F\_3\}\$ и множества отношений \$A = \{a\_1, a\_3\}\$ для групп лопаток в структуру множества технологических воздействий \$TB = \{TB\_1, TB\_3\}\$ и множества отношений \$B = \{b\_1, b\_3\}\$; \$\varphi\_B\$ - отображение (преобразование) структуры множества технологических воздействий \$TB = \{TB\_1, TB\_3\}\$ и множества отношений \$B = \{b\_1, b\_3\}\$ в структуру множества свойств \$C = \{C\_1, C\_3\}\$ и множества отношений \$D = \{d\_1, d\_3\}\$ лопатки;

$\varphi_c$  - отображение (преобразование) структуры множества свойств  $C = \{C_1, C_3\}$  и множества отношений  $D = \{d_1, d_3\}$  в структуру множества эксплуатационной функции  $F = \{F_1, F_3\}$  и множества отношений  $A = \{a_1, a_3\}$  лопатки.

Можно отметить, что приведенная выше система отображений имеет замкнутую форму, решение которых может быть выполнено на основании итерационных методов последовательного приближения с использованием множества рекуррентных циклов.

В представленной работе выполнен анализ особенностей эксплуатации различных групп лопаток турбокомпрессора, а именно компрессора, турбин и свободных турбин. При этом установлено, что эти группы лопаток эксплуатируются в различных условиях, которые обуславливают неодинаковый их ресурс работы.

А также в работе проведен анализ структурных вариантов ГТУ и представлены принципиально-структурные варианты этих систем. Отмечено, что на всех принципиально-структурных вариантах ГТУ наблюдаются различные условия эксплуатации различных вариантов групп лопаток.

В работе разработан подход в повышении работоспособности лопаток турбокомпрессора, работающих в различных условиях эксплуатации. Этот подход базируется на обеспечении функционально-ориентированных свойств групп лопаток различных подсистем. Он обеспечивает выравнивание ресурсов лопаток компрессора и лопаток турбин.

### **3. Структурная схема синтеза технологических процессов для обработки лопаток компрессора и турбины с ФОП на базе системного подхода**

На рис. 4 показана структурная схема синтеза технологических процессов лопаток компрессора и турбины с ФОП на базе общего принципа обеспечения. С помощью этой схемы поясняется процесс структурного синтеза технологических процессов отделочно-упрочняющей обработки лопаток компрессора и лопаток турбины с функционально-ориентированными свойствами.

В соответствии со схемой рис. 4 процесс создания структуры технологических процессов с ФОП выполняется в два потока:

- первый поток направлен на синтез структуры технологического процесса отделочно-упрочняющей обработки с ФОП для лопаток компрессора;
- второй поток направлен на синтез структуры технологического процесса отделочно-упрочняющей обработки с ФОП для лопаток турбины.

При этом процесс синтеза структуры технологических процессов выполняется на основе следующих принципов:

- на основе принципов функционально-ориентированных технологий [6];
- на основе особенностей эксплуатации лопаток, а именно абразивного эрозивно-коррозионного их износа и обеспечения одинакового ресурса групп лопаток компрессора и турбины, например, при напылении функционально-ориентированных покрытий – обеспечение единовременного полного разрушения защитного ФОП лопаток компрессора и турбины [8, 9];
- на основе принципа обеспечения предельного или заданного одинаковых или кратных ресурсов групп лопаток компрессора и турбины в турбокомпрессоре [8];
- на основе связи ФОП лопаток компрессора и лопаток турбины.

Можно отметить, что структурная схема технологических процессов, представленная на рис. 4, имеет обратные связи, с помощью которых учитываются и корректируются параметры процессов [10, 11].

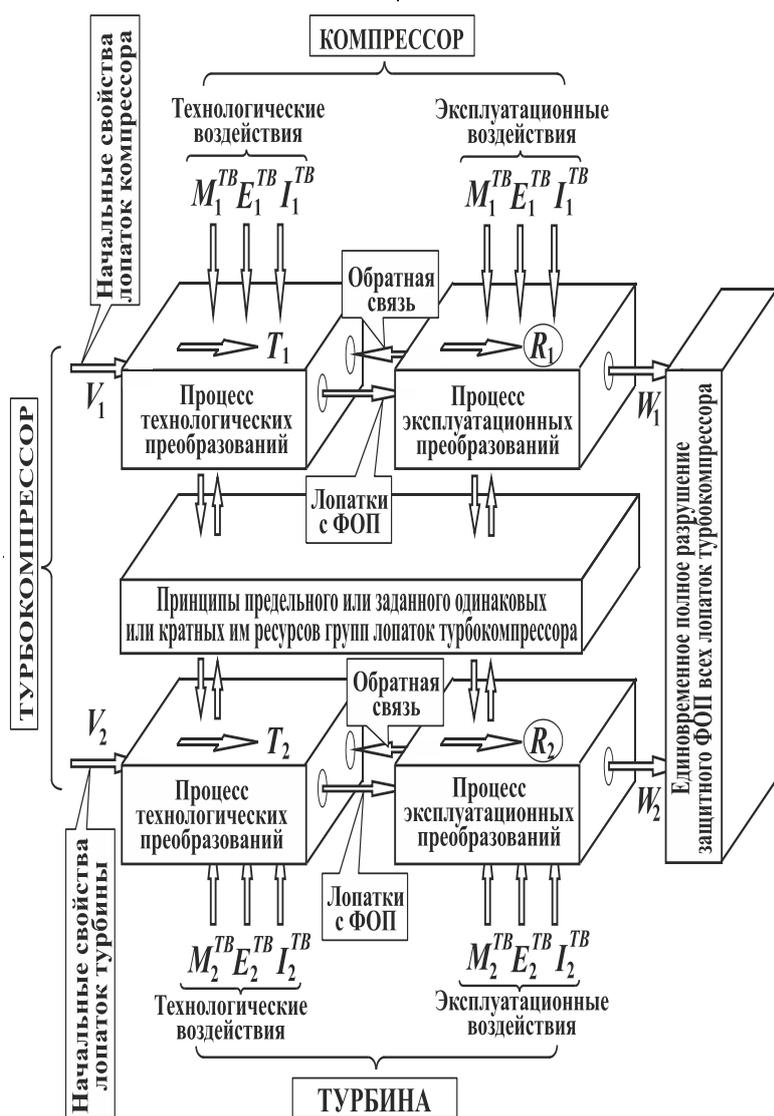


Рисунок 4. Структурная схема синтеза технологических процессов для обработки лопаток компрессора и лопаток турбины с ФОП на базе системного подхода

типов;  $M_2^{ЭВ}, E_2^{ЭВ}, I_2^{ЭВ}$  - эксплуатационные воздействия для лопаток турбины, соответственно материального, энергетического и информационного типов;  $T_2$  - длительность технологических воздействий (алгоритм технологического процесса реализации ФОП лопаток турбины);  $R_2$  - ресурс лопаток турбины.

Конкретные варианты технологических процессов реализации ФОП лопаток компрессора и лопаток турбины будут представлены в последующих работах.

#### 4. Заключение

Таким образом, в представленной работе выполнен анализ особенностей повышения ресурса ГТУ нефтегазовой промышленности за счет обеспечения лопаткам турбокомпрессора функционально-ориентированных свойств. Эта проблема выполнена на

Здесь стрелками показано следующее:  $V_1$  - входной поток (начальные свойства лопаток компрессора);  $W_1$  - выходной поток (конечные свойства лопаток компрессора с ФОП);  $M_1^{TB}, E_1^{TB}, I_1^{TB}$  - технологические воздействия для лопаток компрессора, соответственно материального, энергетического и информационного типов;  $M_1^{ЭВ}, E_1^{ЭВ}, I_1^{ЭВ}$  - эксплуатационные воздействия для лопаток компрессора, соответственно материального, энергетического и информационного типов;  $T_1$  - длительность технологических воздействий (алгоритм технологического процесса реализации ФОП лопаток компрессора);  $R_1$  - ресурс лопаток компрессора;  $V_2$  - входной поток (начальные свойства лопаток турбины);  $W_2$  - выходной поток (конечные свойства лопаток турбины с ФОП);  $M_2^{TB}, E_2^{TB}, I_2^{TB}$  - технологические воздействия для лопаток турбины, соответственно материального, энергетического и информационного

основе разработки структурно-технологического обеспечения отделочно-упрочняющей обработки лопаток компрессора и турбины путем применения ФОП и обеспечения равенства ресурсов лопаток компрессора и лопаток турбины. При этом в работе разработаны общие положения и принципы комплексного обеспечения функционально-ориентированных свойств лопаток компрессора и лопаток турбины. А также разработана структурная схема синтеза технологических процессов лопаток компрессора и турбины с ФОП на базе системного подхода.

Выполненные исследования позволяют комплексно реализовать структуру технологических процессов для лопаток компрессора и лопаток турбины с функционально-ориентированными свойствами из условия обеспечения равенства их ресурсов при эксплуатации.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Шаммазов, А. М. Проектирование и эксплуатация насосных и компрессорных станций: учеб. для вузов / А. М. Шаммазов [и др.]. – М.: Недра - Бизнесцентр, 2003. – 404 с.
2. Богданов, Е. Л. Основы технической диагностики нефтегазового оборудования: учеб. пособие для вузов./ Е. Л. Богданов. – М.: Высш. шк., 2006. – 279 с.
3. Авиаинформ [Текст] / Ежемесячный информационно-аналитический журнал. – М.: Международная ассоциация «Союз авиационного двигателестроения». – 2016. – Вып. № 3(144). – 162 с.
4. Авиаинформ [Текст] / Ежемесячный информационно-аналитический журнал. – М.: Международная ассоциация «Союз авиационного двигателестроения». – 2018. – Вып. № 12(177). – 153 с.
5. Хубка, В. Теория технических систем: пер. с нем. / В. Хубка. – М.: Мир, 1987. – 208 с.
6. Михайлов, А. Н. Основы синтеза функционально-ориентированных технологий / А. Н. Михайлов. – Донецк: ДонНТУ, 2009. – 346 с.
7. Михайлов, А. Н. Основы проектирования функционально-ориентированных технологий машиностроения и перспективы их развития / А. Н. Михайлов, Н. А. Данияров, О. Т. Балабаев. – Караганда: КарГТУ, 2018. – 169 с.
8. Михайлов, Д. А. Общий подход в обеспечении функционально-ориентированных свойств лопаток компрессора ГТД на базе принципа одновременного полного износа покрытия / Д. А. Михайлов, А. В. Хандожко, Е. А. Шейко, А. Н. Михайлов // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных трудов. – Донецк: ДонНТУ, 2015. – Вып. 4(50). – С. 132 - 139.
9. Михайлов, В. А. Комплексное повышение ресурса всех групп лопаток компрессора турбовального ГТД на основе функционально-ориентированного подхода / В. А. Михайлов, А. Н. Михайлов, А. В. Байков // Научно-технические технологии в машиностроении. – Брянск: ФГБОУ ВО «БГТУ», 2017. – №9. – С. 42-48.
10. Демин, Ф. И. Технология изготовления основных деталей газотурбинных двигателей: учеб. пособие. / Ф. И. Демин, Н. Д. Проничев, И. Л. Шитарев – М.: Машиностроение, 2002. – 328 с.
11. Богуслаев, В. А. Технологическое обеспечение и прогнозирование несущей способности деталей ГТД / В. А. Богуслаев, В. К. Яценко, В. Ф. Притченко – Запорожье: ОАО «Мотор Сич», 2006. – 335 с.

Поступила в редколлегию 21.05.2019 г.