

УДК 621.431.75

В. А. Михайлов, аспирант, **А. В. Байков**, канд. техн. наук, доц.
А. Н. Михайлов, д-р техн. наук, проф., **А. П. Пичко**, инженер
Донецкий национальный технический университет
Тел./Факс: +38 (062) 3050104; E-mail: tm@fimm.donntu.org

ОБЩИЙ ПОДХОД КОМПЛЕКСНОГО ПОВЫШЕНИЯ РЕСУРСА ГРУПП ЛОПАТОК ОСЕВОГО КОМПРЕССОРА ДВИГАТЕЛЯ ВЕРТОЛЕТА НА БАЗЕ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННЫХ СВОЙСТВ

В статье выполнен анализ действующих эксплуатационных воздействий и возникающих разрушений структурных групп лопаток осевого компрессора. Приведена классификация разрушений лопаток осевого компрессора и установлены основные их закономерности. Разработан общий подход комплексного повышения ресурса структурных групп лопаток осевого компрессора.

Ключевые слова: вертолетный двигатель, осевой компрессор, лопатка, группы лопаток, ресурс, технологические методы.

V. A. Mikhaylov, A. V. Baykov, A. N. Mikhaylov, A. P. Pychko

GENERAL APPROACH TO INTEGRATED IMPROVEMENT OF THE RESOURCE GROUP RESOURCES GROUP OF THE AXIAL COMPRESSOR OF THE HELICOPTER ENGINE ON THE BASIS OF PROVIDING FUNCTIONALLY-ORIENTED PROPERTIES

This article gives an analysis of current and emerging operational impacts of structural damage groups of blades of an axial compressor. The classification of the destruction of the axial compressor blades and mounted their basic patterns. A general approach is an integrated resource increase structural groups of the blades of the axial compressor.

Keywords: Helicopter engine, axial compressor, blade, blade group, resource, technological methods.

1. Введение

До настоящего времени для многих вертолетов российского производства широко использовались турбовальные двигатели серии ТВЗ-117 (рис. 1), украинского произ-

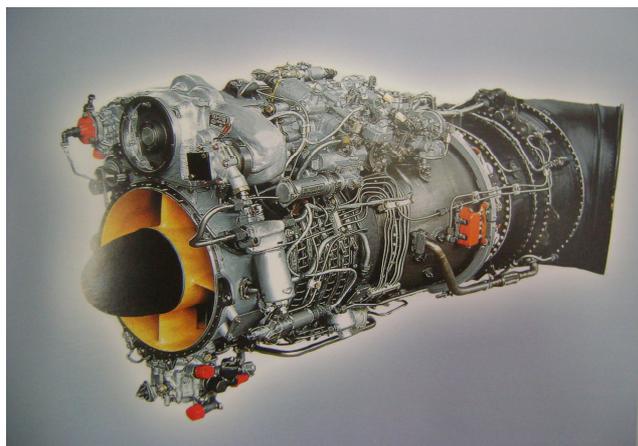


Рисунок 1 - Общий вид вертолетного турбовального двигателя ТВЗ-117В [1].

водства, которые создавались на базе разработок ОАО «Климов». Главными достоинствами этого двигателя является высокая надежность и большой ресурс. При этом назначенный ресурс его составляет 6000 - 9000 часов, межремонтный ресурс 2000 - 3000 часов налета. Многолетний опыт серийного производства и эксплуатации базового двигателя в сочетании с применением современной системы регулирования позволили серьезно повысить его эксплуатационные возможности.

украинского производства. Так уже, Ростовский вертолетный завод «Роствертол» пол-

Вместе с тем, сегодня в России наметилась тенденция снижения применения турбовальных ГТД (газотурбинных двигателей) серии ТВЗ-117

ностью отказался от установки украинских двигателей ТВЗ-117 производства завода «Мотор-Сич» [2, 3, 4]. И это общая тенденция для вертолетных заводов России - отказа от украинских двигателей. При этом сейчас, для изготовления вертолетов используются свои двигатели серии ВК-2500 отечественного - российского производства. Вертолетный двигатель ВК-2500 является модификацией повышенной мощности широко известного двигателя ТВЗ-117ВМА. По топливной экономичности и весовым характеристикам двигатель стоит в ряду лучших мировых образцов. В настоящее время ведутся работы по адаптации двигателя ВК-2500 для перспективного морского вертолета, по повышению его ресурса и улучшению других эксплуатационных характеристик [3]. Здесь, конечно, нужно проводить еще серьезную работу по увеличению ресурса его работы.

Тем не менее, турбовальные двигатели серии ТВЗ-117 продолжают широко использоваться в вертолетах, а именно следующих типов: Ми-8 МТ, Ми-8МСБ, Ми-24 и Ка-32 (применяются двигатели модели ТВЗ-117ВМА-СБМ1В); Ми-24П, Ми-28Н, Ка-32А1, Ка-50 и Ка-52 (применяются двигатели модели ТВЗ-117ВМА); и других машинах. Кроме того, двигатели модели ТВЗ-117ВМА-СБМ1 устанавливаются на самолеты Ан-140. В виду такого широкого использования необходимо выполнять работу по дальнейшему совершенствованию вертолетных двигателей этой серии. При этом двигатели серии ВК-2500, так как они начинают широко использоваться на вертолетных заводах России, также требуют выполнения подобных работ. Поэтому результаты данной статьи направлены на дальнейшее повышение ресурса вертолетных турбовальных двигателей серии ТВЗ-117 и ВК-2500.

Можно отметить, что одной из основных подсистем турбовального двигателя является осевой компрессор ГТД. В осевом компрессоре имеется пять различных групп лопаток. Именно лопатки являются слабым звеном вертолетного двигателя, так как они разрушаются одними из первых. При этом процесс эрозионно-абразивного износа лопаток каждого каскада имеет свои определенные особенности. К этим группам лопаток можно отнести следующие виды:

- поворотные лопатки входного направляющего аппарата (ВНА) (1-а ступень);
- поворотные лопатки направляющего аппарата (НА) статора (4-е ступени);
- лопатки направляющего аппарата (НА) статора (8-мь ступеней);
- лопатки спрямляющего аппарата (1-а ступень);
- лопатки ротора (12 ступеней).

На рис 2 представлена схема вертолетного ГТД со свободной турбиной и одно-вальным газогенератором. Здесь показано: 1 – входное устройство, 2 – осевой компрессор, 3 – камера сгорания, 4 – турбина компрессора, 5 – переходник, 6 – свободная турбина, 7 – выпускной канал, 8 – вал отбора мощности.

Главным недостатком разрушений лопаток осевого компрессора при эксплуатации является то, что лопатки разрушаются при эксплуатации неравномерно. А именно происходят следующие явления:

- каждая лопатка имеет неравномерное разрушение элементов по входной кромке, по периферийной кромке, по задней кромке, по поверхности корыта пера лопатки;
- неравномерные разрушения происходят по номерам ступеней каждой группы ступеней лопатки;
- по видам групп лопаток.

Таким образом, неравномерность разрушений действует по перу лопатки, по номерам ступеней каждой группы лопаток и по видам групп (каскадам) лопаток. При

этом разрушения лопаток имеют свои эксплуатационные особенности, а именно: каждая лопатка имеет свои особенности разрушения; разрушения лопаток каждой ступени в группе имеют свои особенности; каждый вид группы лопаток имеет свои особенности и закономерности разрушений.

Для исключения этих неравномерностей разрушения лопаток и повышения их ресурса необходимо разработать общий подход в повышении ресурса лопаток компрессора и создать ряд технологических методов, обеспечивающих комплексное повышение ресурса всех ступеней и каскадов лопаток проточной части осевого компрессора.

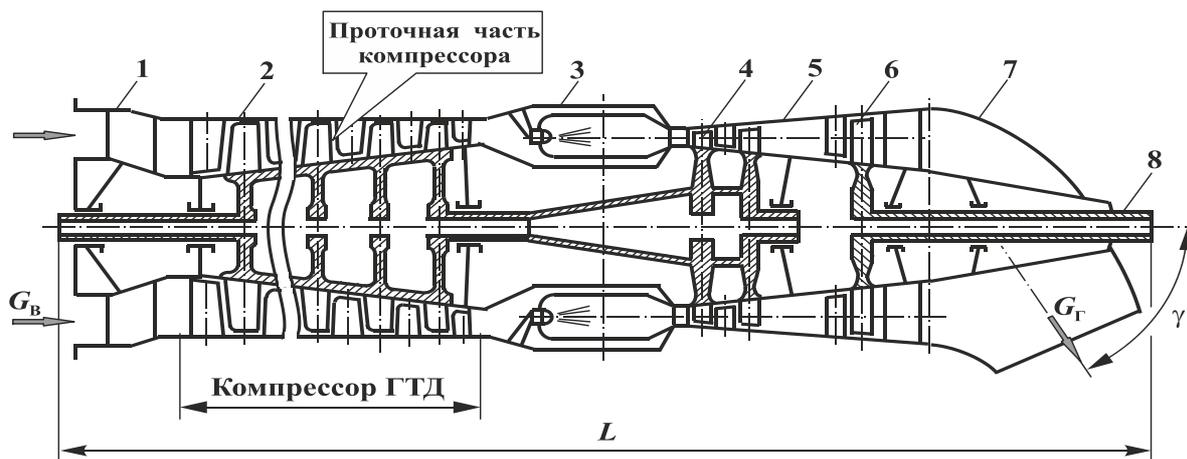


Рисунок 2 - Схема вертолетного ГТД со свободной турбиной и одновальным газогенератором: 1 – входное устройство, 2 – осевой компрессор, 3 – камера сгорания, 4 – турбина компрессора, 5 – переходник, 6 – свободная турбина, 7 – выпускной канал, 8 – вал отбора мощности

Целью данной работы является комплексное повышение ресурса структурных групп лопаток осевого компрессора вертолетного газотурбинного двигателя на основе совершенствования технологического обеспечения на базе функционально-ориентированного подхода.

В соответствии с поставленной целью в работе определены следующие задачи: выполнить анализ действующих эксплуатационных воздействий и происходящих разрушений на различные структурные группы лопаток осевого компрессора; исследовать особенности и основные закономерности разрушений структурных групп лопаток осевого компрессора; разработать общий подход комплексного повышения ресурса различных структурных групп лопаток осевого компрессора.

2. Анализ эксплуатационных особенностей структурных групп лопаток осевого компрессора

На рис. 3 представлена конструктивная схема вертолетного турбовального двигателя. Позиции показывают следующее: 1 – поворотные лопатки входного направляющего аппарата (ВНА), 2 – статор компрессора, 3 – поворотные лопатки направляющего аппарата (НА) статора, 4 – лопатки НА статора, 5 – ротор компрессора, 6 – передняя радиальная опора, 7 – задняя радиально-упорная опора.

Анализируя конструктивную схему рис. 3 [5] можно отметить, что осевой компрессор ГТД вертолета имеет определенную структуру лопаток, состоящую из трех групп лопаток, выполняющих свои эксплуатационные функции:

1. Группа лопаток ВНА (1 ступень).
2. Группа поворотных лопаток НА статора (4 ступени).
3. Группа лопаток НА статора (8 ступеней).
4. Группа лопаток спрямляющего аппарата (1 ступень).
5. Группа лопаток ротора (12 ступеней).

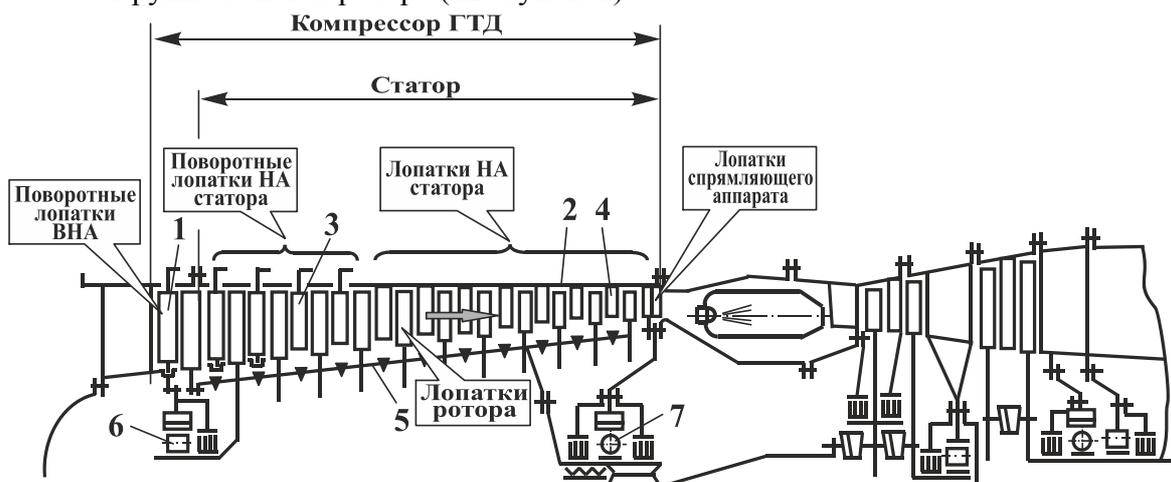


Рисунок 3 - Конструктивная схема вертолетного ГТД модели ТВ3-117: 1 – поворотные лопатки входного направляющего аппарата (ВНА), 2 – статор компрессора, 3 – поворотные лопатки направляющего аппарата (НА) статора, 4 – лопатки НА статора, 5 – ротор компрессора, 6 – передняя радиальная опора, 7 – задняя радиально-упорная опора

Рабочий процесс вертолетного турбовального двигателя (рис. 4) гипотетически соответствует идеальному термодинамическому циклу Брайтона [5] с подводом Q_1 и отводом Q_2 теплоты при постоянных давлениях и изэнтропическом сжатии (кривая $A-B$) и расширении (кривая $C-D$).

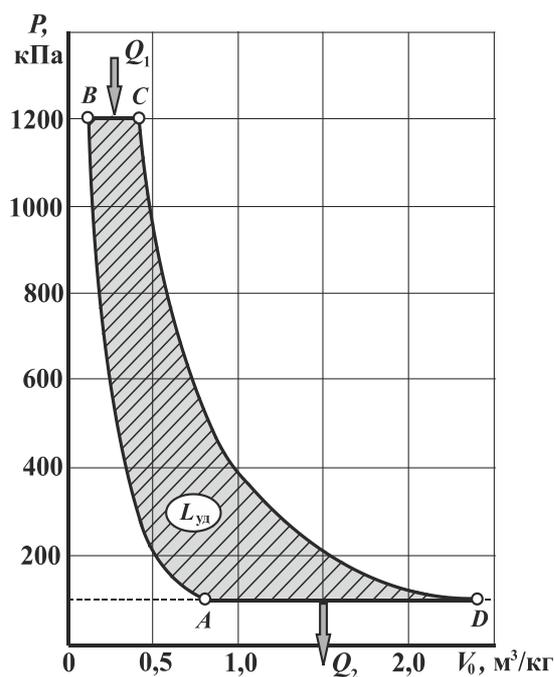


Рисунок 4 - Диаграмма идеального цикла Брайтона

и изэнтропическом сжатии (кривая $A-B$) и расширении (кривая $C-D$). Здесь, в качестве рабочего тела рассматривается воздух с удельной теплоемкостью c_p и показателем изэнтропы k , молекулярный состав которого не меняется.

На рис. 4 показана диаграмма идеального цикла Брайтона. Здесь, приведены данные для степени повышения давления $\pi_{сж} = p_b/p_a = 12$, максимальной температуры цикла $T_c = 1600$ К и температуры начала сжатия T_a и степени повышения температуры $\theta_{ц} = 1,73$. Для ГТД модели ТВ3-117 $\pi_{сж} = 9,9$. Получаемая при этом работа $L_{уд}$ является удельной, поскольку цикл рассматривается для 1 кг массы рабочего тела. Она соответствует заштрихованной площади рис. 4, которая равна разности работ в турбине (турбинах) и сжатия в компрессоре.

На основании диаграммы рис. 4, для осевого компрессора важнейшим является обеспечение параметров сжатия газоздушного потока проточной части в соответствии с кривой *A-B*. Однако, на практике идеальный цикл всегда отличается от реального термодинамического цикла. На это оказывает влияние целый комплекс различных параметров. Важнейшие из них это постоянно увеличивающиеся зазоры между лопатками ротора и статора, лопатками ротора и корпусом компрессора и лопатками статора и ротором. С увеличение зазоров проточной части компрессора снижаются все параметры термодинамического цикла. Увеличение зазоров между лопатками и элементами проточной части компрессора происходит в основном из-за эрозионно-абразивного их износа и действия целого комплекса других эксплуатационных воздействий.

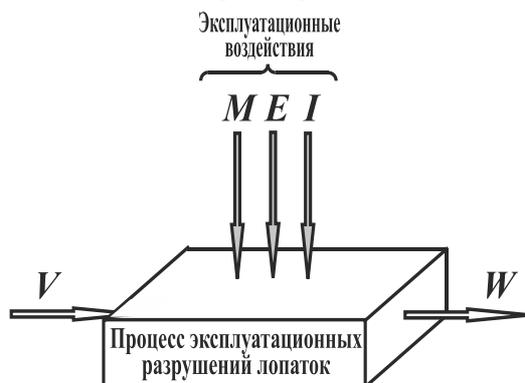


Рисунок 5 - Системная модель эксплуатационных преобразований свойств лопаток компрессора

Процессы увеличения зазоров проточной части осевого компрессора можно рассматривать системно на базе модели эксплуатационных преобразований свойств лопаток компрессора (рис. 5). На рис. 5 показано: *V* – вход (свойства лопаток до эксплуатационных воздействий), *W* – выход (свойства лопаток после эксплуатационных воздействий), *M*, *E*, *I* – потоки эксплуатационных воздействий материального, энергетического и информационного типов, соответственно. Здесь, можно отметить, что под действием потоков эксплуатационных воздействий происходит преобразование начальных свойств лопаток в конечные, то есть происходит разрушение лопаток и элементов проточной части компрессора, при этом зазоры между элементами проточной части компрессора увеличиваются.

Если анализировать особенности действия эксплуатационных воздействий потоков среды и разрушений пяти каскадных групп лопаток компрессора, то этот процесс можно представить в виде структурной схемы, представленной на рис. 6. Здесь показано, что осевой компрессор имеет пять групп лопаток.

Можно отметить, что процесс действия эксплуатационных воздействий потоков среды и возникающих при этом разрушений лопаток компрессора имеет определенные особенности. А именно, этот процесс обусловлен неравномерными действиями на элементы лопатки, на лопатки группы и лопатки входящие в различные виды их групп. Эти особенности неравномерных действий и разрушений можно характеризовать следующими неравномерностями:

- неравномерность 1-го рода (неравномерность по элементам лопатки),
- неравномерность 2-го рода (неравномерность по номерам ступеней),
- неравномерность 3-го рода (неравномерность по видам групп ступеней).

Следует отметить, что эти неравномерности приводят к неравномерным разрушениям лопаток осевого компрессора. Эти неравномерности усложняют процесс применения технологических методов повышения ресурса эксплуатации лопаток компрессора. Вместе с тем, для повышения ресурса лопаток компрессора необходимо рассматривать особенности их разрушения в едином комплексе и из этих условий обеспечивать свойства лопаток комплексно для всего компрессора.

Таким образом, при обеспечении свойств лопаток необходимо учитывать следующие особенности (рис. 6):

- неравномерные воздействия и разрушения лопатки в пределах каждой ступени в одноименном виде групп лопаток;

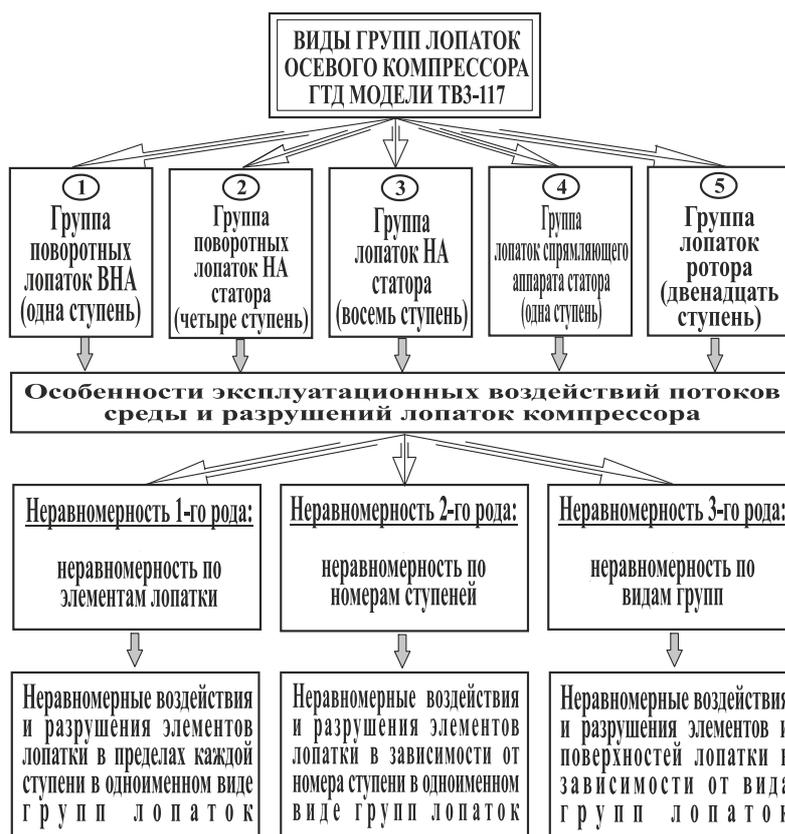


Рисунок 6 - Виды групп лопаток осевого компрессора ГТД модели ТВЗ-117 и особенности их разрушений

ных видов сил и возникающих при этом напряжений изгиба и кручения, растяжения и сжатия, смятия и среза;

- пар, жидкости, вода, льдинки, снег;
- кислотные, щелочные, солевые и другие виды воздействий;
- температурные и другие воздействия;
- комбинированные воздействия.

На этом множестве эксплуатационных воздействий, наиболее значительные, влияющие на увеличения зазоров в проточной части осевого компрессора, являются воздействия первого вида (рис. 7). То есть постоянно действующие эрозионные воздействия мелких частиц пыли, песка и абразива.

На рис. 8 показаны основные виды эксплуатационных разрушений лопаток осевого компрессора ГТД:

- эрозионные разрушения поверхностного слоя пера лопатки;
- местные царапины, риски, забоины и вмятины элементов пера лопатки;
- усталостные и ударные разрушения лопатки от действия различных видов разрушений;

- неравномерные воздействия и разрушения элементов лопатки в зависимости от номера ступени в одноименном виде групп лопаток;

- неравномерные воздействия и разрушения элементов лопатки в зависимости от вида групп лопаток.

Можно отметить, что основные виды эксплуатационных воздействий среды на лопатки компрессора ГТД можно представить следующим образом (рис. 7):

- газозвушной поток с включениями пыли, пепла, песка, абразива и тому подобных частиц;
- потоки крупных частиц и элементов;
- ударные, динамические и вибрационные нагрузки;

- действие различных

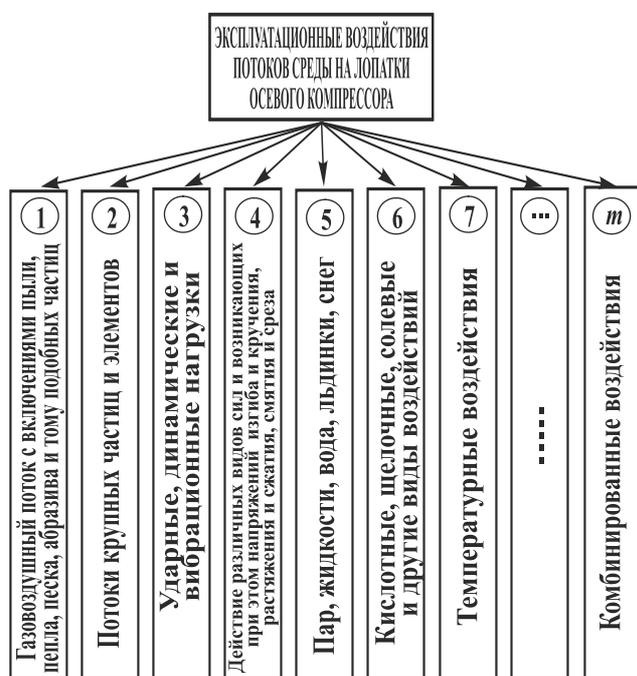


Рисунок 7 - Виды эксплуатационных воздействий среды на лопатки компрессора ГТД

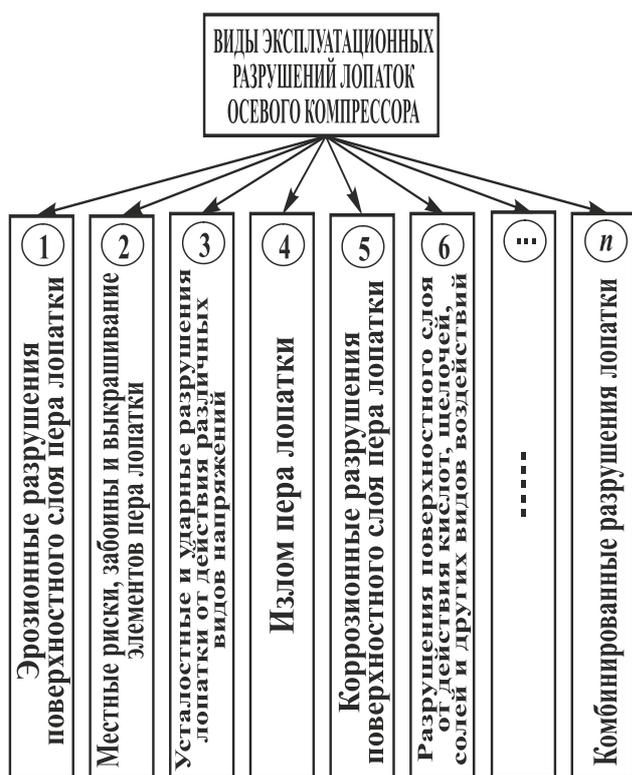


Рисунок 8 - Виды эксплуатационных разрушений лопаток осевого компрессора ГТД

- излом пера лопатки;
- коррозионные разрушения поверхностного слоя пера лопатки;
- разрушения поверхностного слоя от действия кислот, щелочей, солей и других видов воздействий;
- комбинированные разрушения лопатки.

Можно отметить, что на практике обычно возникают комбинированные разрушения лопаток. При этом следует отметить, что эрозионно-абразивный износ лопаток наиболее отрицательно влияет на увеличение зазоров в проточной части компрессора, что и снижает эксплуатационные параметры компрессора ГТД.

Параметры, влияющие на возникновение неравномерностей разрушения лопаток в осевом компрессоре ГТД можно классифицировать следующим образом (рис. 9):

- изменяющаяся пространственная форма лопатки;
- изменяющаяся пространственная структура лопаток по длине осевого компрессора;
- изменяющиеся параметры проточной зоны компрессора;
- изменяющиеся параметры потока среды в проточной части компрессора;
- особенности кинематики лопаток компрессора.

Анализируя классификацию рис. 9 можно отметить, что на возникновение неравномерности разрушения лопаток влияет изменяющаяся их пространственная форма. Перо лопатки имеет сложную пространственную форму [5, 6, 7], которая в определенной мере влияет на особенности эрозионно-абразивного износа элементов пера лопатки.

Также следует учитывать то, что на возникновение неравномерностей разрушений пера лопатки влияет изменяющаяся пространственная

структура лопаток по длине осевого компрессора (рис. 9). Эти особенности существенно зависят от следующего: количества лопаток в ступени и их пространственного расположения; количества ступеней в группе и их пространственного расположения;

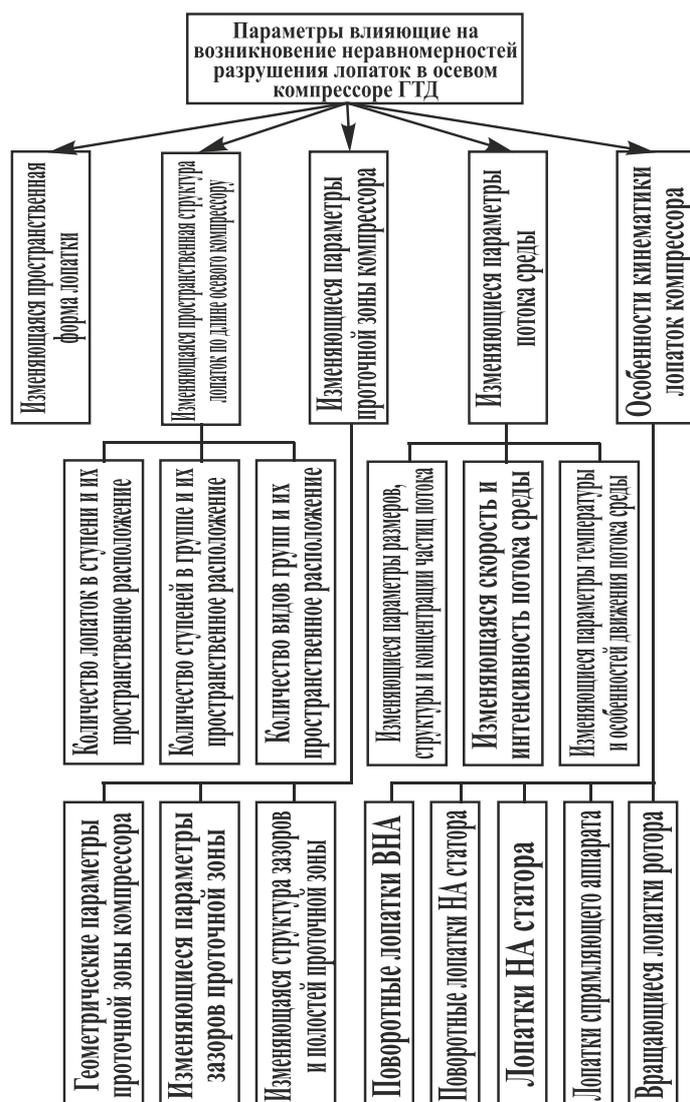


Рисунок 9 - Параметры, влияющие на возникновение неравномерностей разрушения лопаток в осевом компрессоре ГТД

количества видов групп и их пространственного расположения. Кроме того, возникновение неравномерностей разрушений пера лопатки обусловлены изменяющимися параметрами проточной зоны компрессора, которые определяются: геометрическими параметрами проточной зоны; изменяющимися параметрами зазоров проточной зоны [6]; изменяющейся структурой зазоров и полостей проточной зоны. Более того, возникновение неравномерностей происходит из-за изменяющихся параметров потока среды в проточной части компрессора, которые определяются: изменяющимися параметрами размеров, структуры и концентрации частиц потока; изменяющейся скоростью и интенсивностью потока среды; изменяющимися параметрами температуры и особенностями движения потока среды по проточной части компрессора. И наконец, возникновение неравномерностей разрушений лопаток происходит из-за особенностей кинематики лопаток компрессора, которые определяют - какие элементы компрессора имеют вращение или неподвижность. В целом, действие этих параметров необходимо учитывать комплексно.

В осевом компрессоре турбовального двигателя наиболее значительно изнашиваются рабочие лопатки. На рис. 10 представлена структурная схема компоновки лопаток в компрессоре ГТД и эпюры концентрации частиц пыли в единице объема среды потока его проточной части в условиях их сепарирования к периферии. Здесь показано: рис. 10,а – структурная схема компрессора, рис. 10,б – эпюры концентрации пыли в зонах лопаток ВНА, НА и спрямляющего аппарата статора, рис. 10, в – эпюры концентрации пыли в зонах лопаток ротора (ступени: I, II, III, IV, VI, VIII, X, XII).

Можно отметить, что эпюры концентрации частиц пыли представлены для зон поворотных лопаток ВНА, поворотных лопаток НА статора, лопаток - трех ступеней НА статора, лопаток спрямляющего аппарата и восьми ступеней ротора (на рис. 10

эпюры представлены для лопаток не всех ступеней). Анализ представленных эпюр показывает, что концентрация частиц пыли в единице объема среды может достигать до 6 г/м^3 на последних ступенях компрессора по сравнению с первыми ступенями лопаток компрессора. Эти особенности усложняют процессы эрозионно-абразивного износа элементов пера лопаток по длине проточной части компрессора. Поэтому каждая лопатка определенной ступени имеет свои особенности эрозионно-абразивного износа

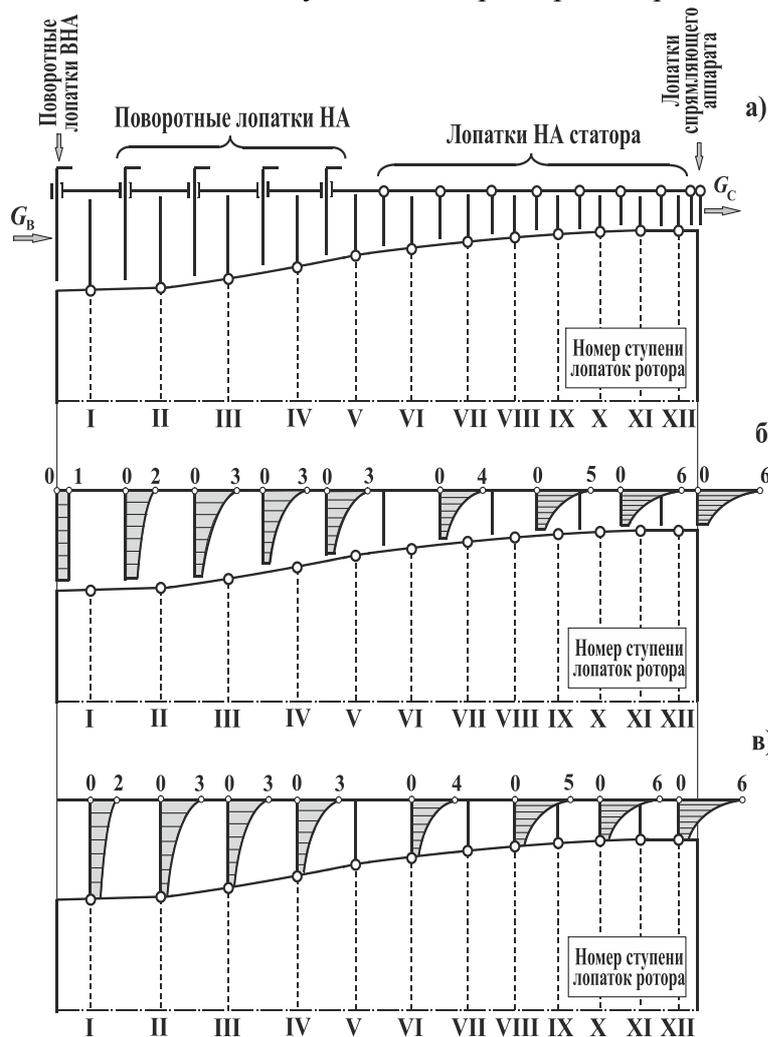


Рисунок 10 - Структурная схема компоновки лопаток в компрессоре ГТД и эпюры концентрации частиц пыли в единице объема среды потока его проточной части в условиях ее сепарирования к периферии:

а – структурная схема компрессора, б – эпюры концентрации пыли в зонах лопаток ВНА, НА и спрямляющего аппарата статора, в – эпюры концентрации пыли в зонах лопаток ротора (ступени: I, II, III, IV,

поворотных лопаток ВНА, поворотных лопаток НА, лопаток НА и лопаток спрямляющего аппарата.

В процессе эксплуатации ГТД лопатки компрессора разрушаются из-за действия эрозионно-абразивного износа. При этом возникают неравномерный износ лопаток, который подразделяется на неравномерности трех родов. На рис. 12 представлен общий вид эрозионных разрушений лопаток компрессора ГТД модели ТВ3-117: на рис. 12, а –

а) Лопатки спрямляющего аппарата

б) Лопатки НА статора на бандажах

в) Лопатки ротора



Рисунок 11 - Общий вид лопаток компрессора ГТД модели ТВ3-117:
 а – поворотные лопатки компрессора; б – лопатки НА статора; в – лопатки ротора

Рисунок 12 - Общий вид эрозийных разрушений лопаток компрессора ГТД модели ТВ3-117:
 а – поворотные лопатки НА статора; б – лопатки НА статора; в – лопатка ротора

поворотные лопатки НА статора; на рис. 12,б – лопатки НА статора; на рис. 12,в – лопатка ротора.

Анализ особенностей разрушения групп лопаток осевого компрессора (рис. 12) показал, что каждая группа лопаток имеет свои особенности разрушений, которые определяются неравномерностью 3-го рода. При этом в каждой группе лопатки имеют свои особенности разрушений, которые характеризуются неравномерностью 2-го рода. Если рассматривать конкретную лопатку, то по элементам пера лопатки действуют неравномерности 1-го рода.

Выполненные исследования этих особенностей разрушения позволили установить, что процесс разрушений групп лопаток, лопаток по ступеням и конкретно каждой лопатки имеют свои закономерности [7]. Эти закономерности можно представить в виде структурной схемы взаимосвязей различных групп лопаток и возникающих неравномерностей их разрушения при эксплуатации, которая показана на рис. 13.

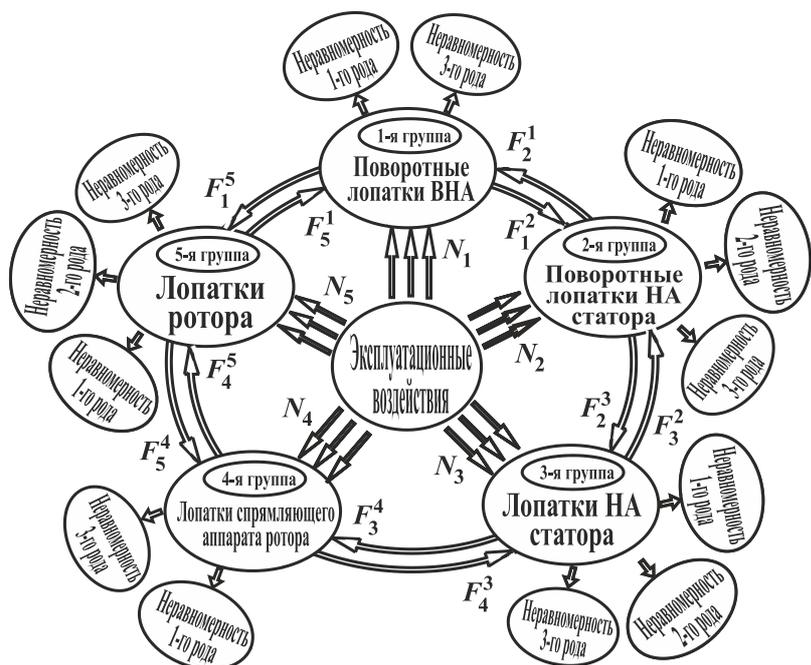


Рисунок 13 - Структурная схема взаимосвязей различных групп лопаток и возникающих неравномерностей их разрушения при эксплуатации

На рис. 13 представлена структурная схема взаимосвязей различных групп лопаток и возникающих неравномерностей их разрушения при эксплуатации. Лопатки осевого компрессора образуют пять различных групп лопаток, на них действуют эксплуатационные воздействия N_1, N_2, N_3, N_4, N_5 каждое из которых характеризуется потоками материи, энергии и информации. Взаимосвязь между особенностями разрушений различных групп лопаток показана с помощью связей F_i^j .

Взаимосвязь между особенностями разрушений различных групп лопаток показана с помощью связей F_i^j .

3. Общий подход комплексного повышения ресурса структурных групп лопаток осевого компрессора

Выполненные исследования особенностей разрушений лопаток компрессора турбовального двигателя вертолета позволили установить, что они имеют определенные особенности. Главной проблемной особенностью разрушения лопаток является то, что они разрушаются неравномерно. При этом в процессе неравномерного разрушения лопаток действует три рода неравномерностей, которые снижают ресурс лопаток и авиационного двигателя в целом. Для исключения таких неравномерных разрушений лопаток необходимо обеспечивать специальные свойства лопаток компрессора. Однако традиционными технологическими методами решить эти проблемы не возможно. Здесь

необходимы специальные подходы с применением функционально-ориентированных технологий [8].

На рис. 14 представлена структурная схема взаимосвязей различных групп лопаток и обеспечения ФОС, исключающих неравномерности разрушения лопаток компрессора. Здесь показано, что возникающие неравномерности 1-го, 2-го и 3-го рода

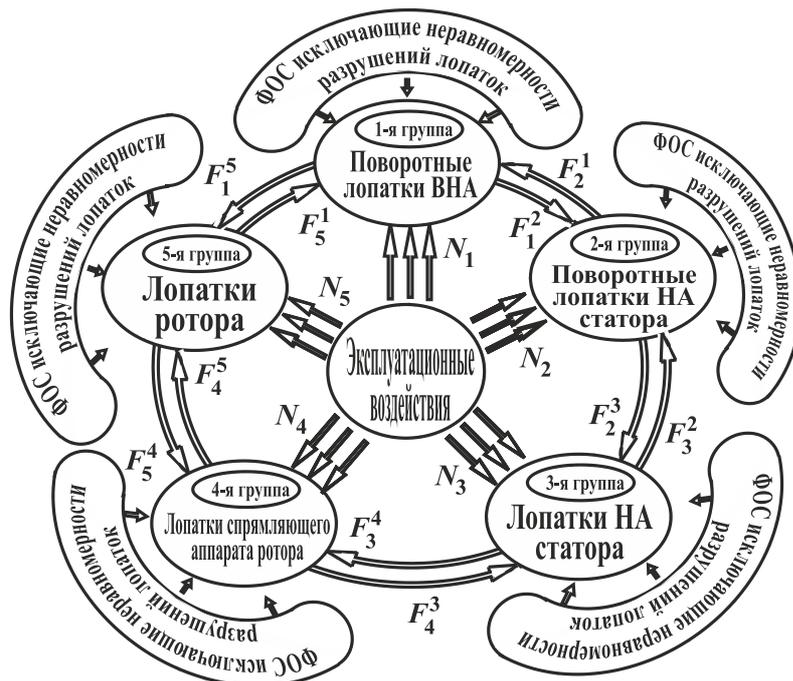


Рисунок 14 - Структурная схема взаимосвязей различных групп лопаток и обеспечения ФОС, исключающих неравномерности разрушения лопаток компрессора

разрушений лопаток компрессора (рис. 13) следует компенсировать посредством функционально-ориентированных свойств (ФОС) [8]. ФОС позволяют исключать неравномерные разрушения лопаток компрессора.

Можно отметить, что возникающие неравномерности эрозионно-абразивного износа лопаток не позволяют эффективно применять традиционные методы снижения их износа. Например, при нанесении традиционных нитрид титановых покрытий на перо лопатки ротора повышает только незначительно ресурс лопаток. Это обусловлено тем, что предельные разрушения пера лопатки ротора происходят на передней кромке пера у его периферии. После разрушения покрытия происходит интенсивное разрушение тела пера при отсутствии разрушения поверхности корыта пера лопатки. Это снижает ресурс лопатки в целом, и не позволяет их восстанавливать, в том числе многократно [7].

При обеспечении функционально-ориентированных свойств пера лопатки можно существенно повысить ресурс лопаток, например, за счет возможности многократного восстановления работоспособности лопаток посредством применения специальных покрытий неравномерной толщины или с неравномерными физико-механическими свойствами, как это выполнено в работе [7]. Однако в этой работе решена задача повышения ресурса лопаток только для рабочих лопаток ротора осевого компрессора. В этой работе планируется комплексно решать вопросы повышения ресурса лопаток компрессора для различных их групп с учетом действия разрушений, характеризуемых неравномерностями 3-х родов.

4. Технологические особенности и рекомендации

Для решения вопросов комплексного повышения ресурса лопаток осевого компрессора вертолетного ГТД разработана структурная схема взаимосвязей F_i^j и обеспе-

чения функционально-ориентированных свойств (ФОТ) на базе функционально-ориентированных технологий (ФОТ) [8]. Здесь показано следующее:

1. $Str \{F, A\}$ - структура, состоящая из двух множеств, а именно множества действующих на элементы лопатки эксплуатационных функций F и множества возникающих между ними связей A .

2. $Str \{P, B\}$ - структура, состоящая из двух множеств, множества составленного из функциональных элементов P множества лопаток компрессора и множества действующего между ними связей B .

3. $Str \{C, G\}$ - структура, состоящая из двух множеств, множества составленного из свойств элементов лопатки C , которые необходимо обеспечить, и множества действующих между ними связей G .

4. $Str \{TB, Q\}$ - структура, состоящая из двух множеств, множества составленного на технологических воздействиях TB , необходимых для обеспечения свойств, и множества действующих между ними связей Q .

5. Принципы ФОТ [8]. Представленные элементы методики связаны между собой на базе функционально-ориентированных технологии, а именно их принципов.

6. Функционально-ориентированные свойства (ФОС). Элементы позиции 3 структурной схемы рис. 15 обеспечиваются на базе ФОС [8].

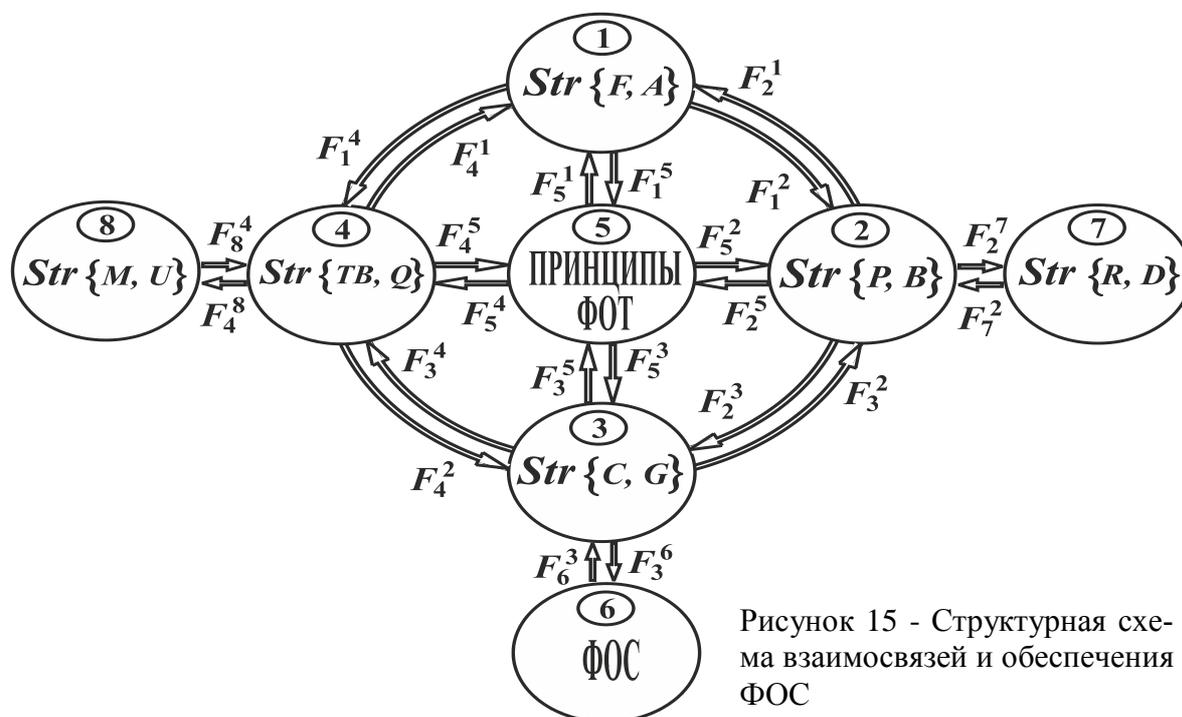


Рисунок 15 - Структурная схема взаимосвязей и обеспечения ФОС

7. $Str \{R, D\}$ - структура, состоящая из двух множеств, множества составленного на ресурсах R лопаток компрессора, и множества действующих между ними связей D .

8. $Str \{M, U\}$ - структура, состоящая из двух множеств, а именно множества необходимых методов M для обеспечения функционально-ориентированных свойств лопаток компрессора и множества возникающих между ними связей U .

Выполненный анализ структурной схемы взаимосвязей и обеспечения ФОС, позволил установить, что здесь, обеспечение свойств лопаток реализуются в едином комплексе на базе функционально-ориентированного подхода, который позволяет реализо-

вывать свойства всех групп лопаток в зависимости от действующих эксплуатационных функций и с учетом неравномерностей трех родов. А это дает возможность комплексно обеспечивать ресурс всех лопаток, реализовывать их предельных эксплуатационный потенциал и существенно повысить технико-экономические показатели эксплуатации вертолетного двигателя.

5. Выводы

В представленной работе выполнен анализ действующих эксплуатационных воздействий и возникающих при этом разрушений структурных групп лопаток осевого компрессора ГТД. При этом установлено, что процесс эрозионно-абразивного их разрушения имеет свои определенные закономерности, характеризуемые неравномерным разрушением лопаток 1-го, 2-го и 3-го рода. В работе разработан общий подход комплексного повышения ресурса различных структурных групп лопаток осевого компрессора ГТД, при этом показаны основные пути повышения ресурса вертолетного турбовального газотурбинного двигателя.

ЛИТЕРАТУРА

1. История конструкторской службы АО «Мотор Сич», - К.: Златограф, 2014. – 112 с.
2. Авиаинформ / Ежемесячный информационно-аналитический журнал. – М.: Международная ассоциация «Союз авиационного двигателестроения», 2016. - Вып. № 4 (145). – 182 с.
3. Авиаинформ / Ежемесячный информационно-аналитический журнал. – М.: Международная ассоциация «Союз авиационного двигателестроения», 2016. - Вып. № 6 (147). – 180 с.
4. Авиаинформ / Ежемесячный информационно-аналитический журнал. – М.: Международная ассоциация «Союз авиационного двигателестроения», 2016. - Вып. № 7 (148). – 178 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. Ганзен, М. А. Конструкторско-технологическое обеспечение минимальных радиальных зазоров в лопаточных машинах на основных стадиях жизненного цикла ГТД; автореф. дис. ... канд. техн. наук / М. А. Ганзен - Рыбинск, 2012. - 16 с.
7. Михайлов, Д. А. Технологическое обеспечение повышения работоспособности лопаток компрессора газотурбинного двигателя на основе функционально-ориентированных покрытий: автореферат дис. ... канд. техн. наук. / Д. А. Михайлов - Донецк, 2016. - 22 с.
8. Михайлов, А. Н. Основы синтеза функционально-ориентированных технологий. – Донецк: ДонНТУ, 2009. – 346 с.

Поступила в редколлегию 10.02.2017 г.