

УДК 621.433: 629.735.45

А. П. Пичко¹, соискатель, **В. А. Михайлов**¹, аспирант,
Д. А. Михайлов², канд. техн. наук, ст. преп., **Е. А. Шейко**¹, канд. техн. наук, доц.,
А. Н. Михайлов¹, д-р техн. наук, проф.

¹ ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет», ДНР

² ГОУВПО «Академия гражданской защиты», ДНР

ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ОСОБЕННОСТИ ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК НЕФТЕГАЗОВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ И ОБЩИЙ ПОДХОД В ПОВЫШЕНИИ ИХ СВОЙСТВ

В представленной работе исследованы основные эксплуатационные особенности газотурбинных установок в нефтегазовой промышленности. Выполнен анализ их принципиально-структурных вариантов и разработан общий подход в обеспечении заданных эксплуатационных свойств этих систем. А также в статье показаны основные пути повышения работоспособности газотурбинных установок на базе обеспечения функционально-ориентированных свойств лопаток компрессора и турбин. Эти пути базируются на технологическом обеспечении равенства ресурсов лопаток компрессора и турбин, который выполняется на основе принципа структурного соответствия их свойств, эксплуатационных функций и технологических воздействий.

Ключевые слова: нефтегазовая промышленность, газотурбинная установка, принципиально-структурные схемы, равенство ресурсов, функционально-ориентированные свойства.

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

OPERATING FEATURES OF GAS TURBINE INSTALLATIONS OF OIL AND GAS INDUSTRY AND GENERAL APPROACH IN INCREASING THEIR PROPERTIES

In this paper, the main operational features of gas turbine units in the oil and gas industry are investigated. The analysis of their fundamentally-structural variants is carried out and the general approach in maintenance of the given operational properties of these systems is developed. And also the article shows the main ways to improve the efficiency of gas turbine plants on the basis of providing the functionally-oriented properties of compressor blades and turbines. These ways are based on technological ensuring of equality of resources of the compressor and turbine blades, which is performed on the basis of the principle of structural correspondence of their properties, operational functions and technological influences.

Keywords: oil and gas industry, gas turbine installation, fundamentally-structural schemes, resource equality, functionally-oriented properties.

1. Введение

Газотурбинные установки (ГТУ) широко используются в нефтегазовой промышленности для решения технологических задач производства. Теоретически, работа газотурбинной установки (ГТУ) базируется на идеальном термогазодинамическом цикле Брайтона (рис. 1) [1]. Условно, этот цикл основывается на четырех этапах работы ГТУ, а именно: всасывание воздуха, непрерывное сжатие воздуха в компрессоре (образование заторможенного потока), сгорание топлива с нагревом (подвод тепла) сжатого воздуха с образованием газозвдушного потока, выхлоп газозвдушного потока с расширением потока и отводом тепла.

Данный цикл можно рассмотреть с использованием рис. 1, на котором показана диаграмма идеального цикла Брайтона [2, 3]. Эти данные приведены для степени по-

вышения давления 12, максимальной температуры цикла 1237 °С и температуры начала сжатия T_a и степени повышения температуры 1,73. Получаемая при этом работа $L_{уд}$ является удельной, поскольку цикл рассматривается для 1 кг массы рабочего тела.

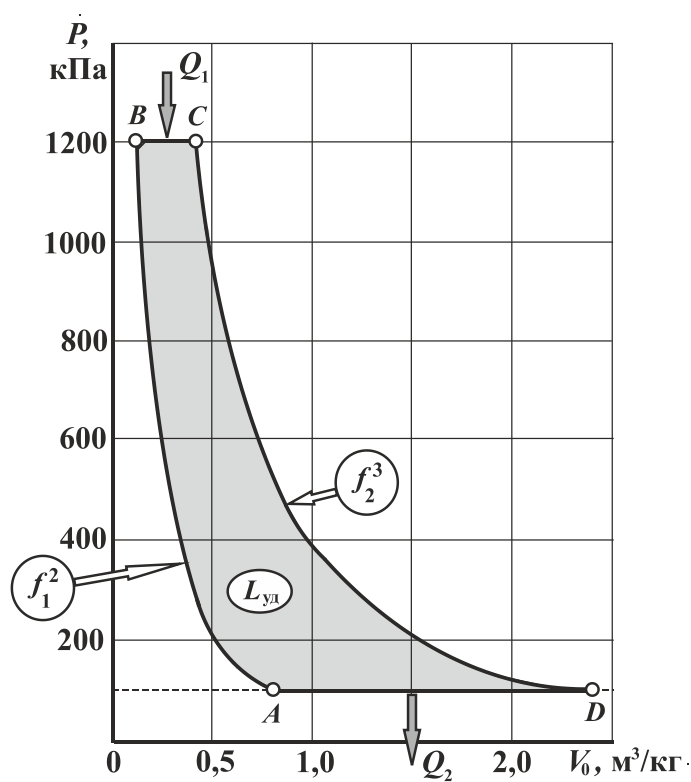


Рисунок 1. Диаграмма идеального цикла Брайтона для ГТУ

Здесь, можно отметить, что зазоры увеличиваются между лопатками турбины и статора, лопатками турбины и корпусом турбины, а также лопатками статора и турбины.

Таким образом, увеличение зазоров проточной части турбокомпрессора ГТУ снижаются все параметры термогазодинамического цикла.

Вместе с тем, анализируя термогазодинамический цикл Брайтона (рис. 1) особенно следует заметить, что составляющие турбокомпрессора, а именно лопатки компрессора и лопатки турбин (включая лопатки свободной турбины), работают в кардинально различных условиях. Здесь, лопатки компрессора испытывают преобладающие эрозионные воздействия (присутствуют небольшие температурные воздействия на последних ступенях), а на лопатки турбины компрессора (свободной турбины) действуют значительные температурные, химические, физические и эрозионные воздействия. Это приводит к тому, что в едином турбокомпрессоре ГТУ лопатки компрессора и лопатки турбин работают в совершенно различных эксплуатационных условиях. Это приводит к неодинаковым разрушениям лопаток компрессора и турбин и неполному использованию потенциала ГТУ. Все это снижает работоспособность, ресурс и технико-экономические показатели турбокомпрессора и всей ГТУ,

Целью данной работы является повышение работоспособности турбокомпрессора за счет выравнивания ресурсов лопаток компрессора и лопаток турбин на основе обеспечения их функционально-ориентированных свойств за счет применения специальных технологий.

Она соответствует выделенной темным цветом площади рис. 1, которая равна разности работ в турбине (турбинах) и сжатия в компрессоре турбокомпрессора.

На основании диаграммы рис. 1 [4], для осевого компрессора важнейшим является обеспечение параметров сжатия газовой 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.

Увеличивающиеся зазоры в зонах турбин также отрицательно влияют на параметры термогазодинамического цикла, кривая $C-D$.

На основании поставленной цели в работе определены следующие задачи: выполнить исследования особенностей эксплуатации лопаток турбокомпрессора; выполнить анализ основных вариантов принципиально-структурных схем ГТУ; разработать методы повышения работоспособности лопаток турбокомпрессора, работающих в различных условиях эксплуатации; предложить общий подход выравнивания ресурсов лопаток компрессора и лопаток турбин. Эти задачи решаются в данной работе.

2. Исследование особенностей эксплуатации лопаток турбокомпрессора

Выполненный анализ особенностей эксплуатации ГТУ, обеспечивающих электроэнергией Хасырейское, Черпаюское, Нядейюское 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 различных условиях. Это обусловлено, прежде всего, тем, что ГТУ работает в соответствии с термогазодинамическим циклом, состоящим из четырех различных этапов работы (рис. 1), причем работа каждой подсистемы, а именно компрессора или турбины соответствует параметрам своего этапа работы механизма. При этом группы лопаток турбокомпрессора работают в своих зонах, а именно, лопатки компрессора работают в условиях, соответствующих кривой *A-B*, а лопатки турбин эксплуатируются в условиях, соответствующих параметрам кривой *C-D*.

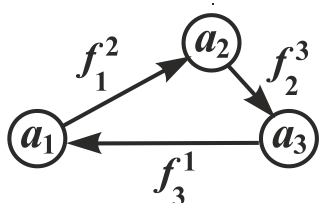


Рисунок 2. Структурная схема газогенератора ГТУ

Причем лопатки компрессора a_1 (рис. 2) (по разрушениям износа) испытывают значительные эрозионные воздействия, а лопатки турбин a_3 испытывают больше температурные эрозионно-коррозионные, химические, физические и другие воздействия. А также здесь накладываются воздействия на лопатки, связанные растяжением, ускорением, динамическими колебаниями и тому подобными явлениями. Это приводит к различным особенностям работы групп лопаток турбокомпрессора или газогенератора (рис. 2) и наличию

различного ресурса их эксплуатации в ГТУ. В связи с этим, представленные особенности в целом снижают работоспособность ГТУ и требуют обеспечения своевременного ремонта групп лопаток турбин по сравнению с лопатками компрессора. Значительное различие условий работы лопаток компрессора и турбин турбокомпрессора обусловлено наличием в газогенераторе камеры сгорания a_2 , с помощью которой выполняются заданные параметры термогазодинамического цикла.

На рис. 3 представлены графики зависимостей параметров газовоздушного потока в зонах по тракту ГТУ. Здесь, график 1 – температурные характеристики (T), график 2 – характеристики давления (P), график 3 – скоростные характеристики (v_o).

Анализируя графики рис. 3 можно отметить, что в процессе эксплуатации ГТУ на группы лопаток турбокомпрессора в каждой зоне (рис. 3) действует свой комплекс эксплуатационных функций. Здесь показано: V_1 – вход воздушного потока в компрессор ГТУ; V_2 – вход топлива в камеру сгорания; W_2 – выход газовоздушного потока в ГТУ (выхлоп).

Компрессор ГТУ работает в широком диапазоне режимов эксплуатации, определяемых согласованием его параметров с параметрами остальных подсистем установки (рис. 2) на установившихся и переходных режимах. Камера сгорания обеспечивает нагрев рабочей среды до заданного значения температуры с допустимой неравномерностью параметров температурного поля и с минимальными потерями давления и

теплоты. В турбине компрессора кинетическая энергия выходящих газов не является потерянной для ГТУ, так как они совершают работу выходного вала или свободной турбине.

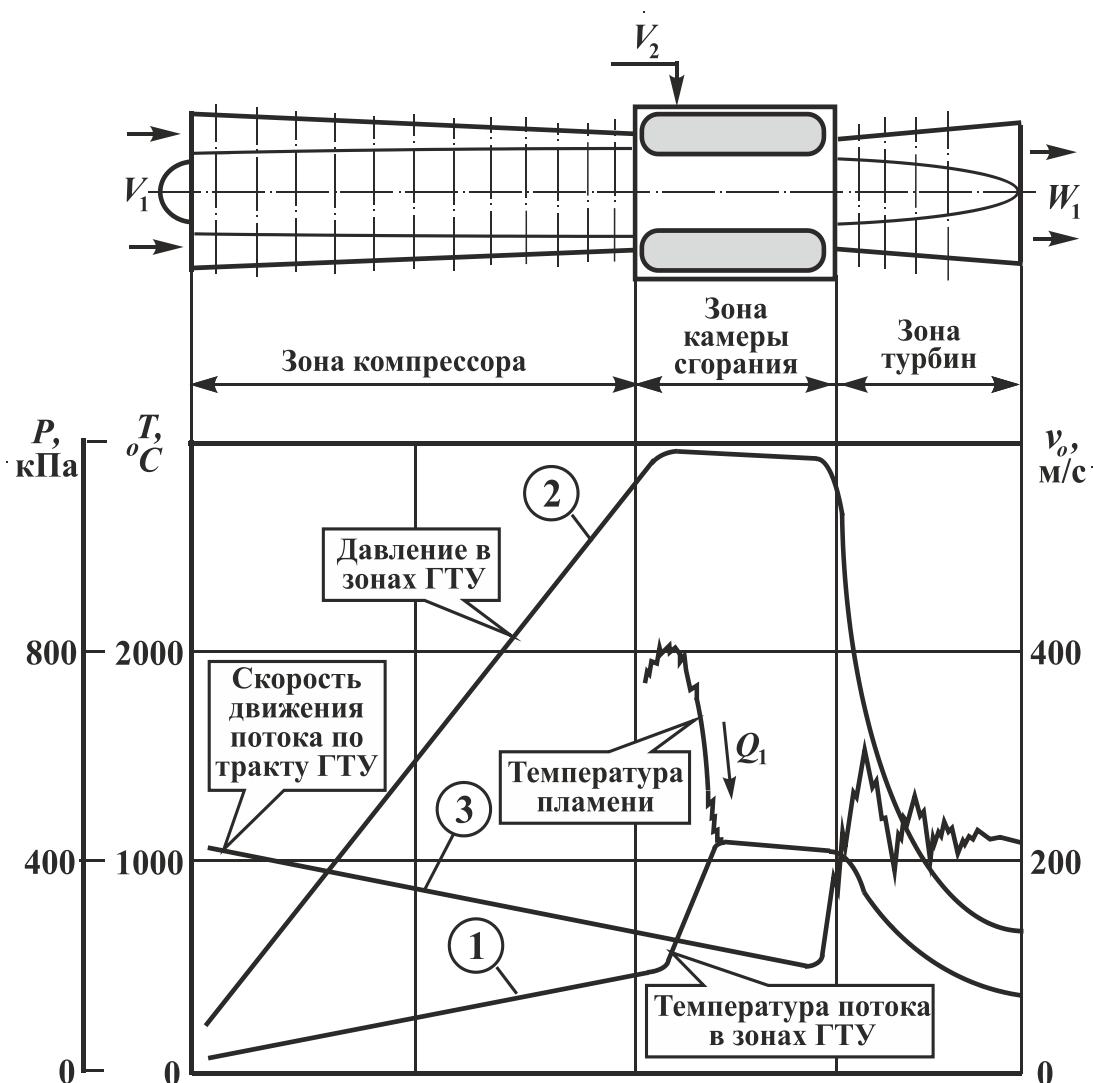


Рисунок 3. Графики зависимостей параметров газоздушного потока в зонах по тракту ГТУ: 1 – температурные характеристики, 2 – характеристики давления, 3 – скоростные характеристики

Таким образом, на основании проведенных исследований, можно сделать вывод, что группы лопаток компрессора и группы лопаток турбин работают в различных эксплуатационных условиях. При этом выполненный анализ процесса разрушений этих лопаток показывает, что лопатки турбин по сравнению с лопатками компрессора имеют в 2 ... 3 раза меньший ресурс из-за особенностей действия эксплуатационных функций.

В охлаждаемых турбинах компрессора, работающих при более высокой температуре $T = 1200 \dots 1350 \text{ }^\circ\text{C}$ значительное количество охлаждающего воздуха выпускается в газо-воздушный поток до горла первого соплового аппарата турбины.

3. Анализ основных вариантов принципиально-структурных схем ГТУ

Развитие ГТУ идет по пути улучшения их термогазодинамических параметров, структурного, принципиально-структурного, схемно-конструктивного совершенствования с целью повышения показателей эффективности использования этих установок для решения технологических задач в нефтегазовой промышленности. А также в направлении улучшения их эксплуатационных свойств, компактности, эргономичности и экологической безопасности.

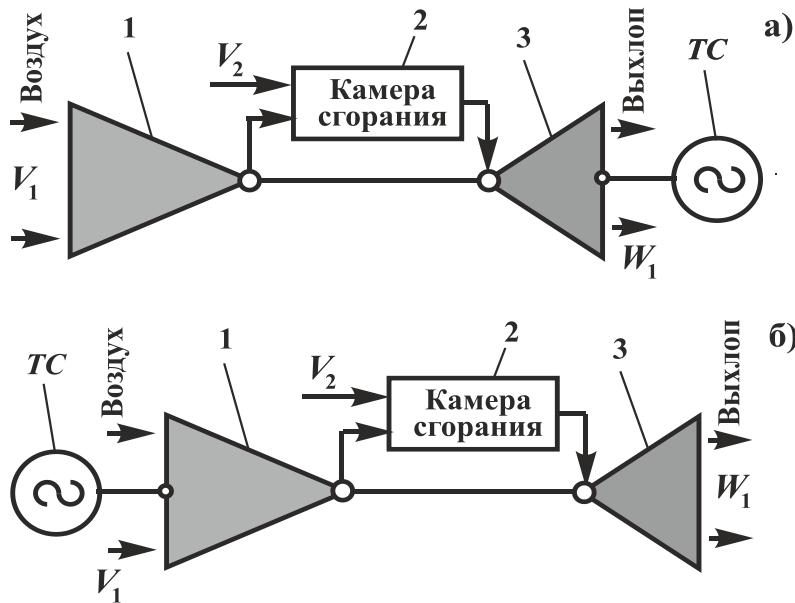


Рисунок 4. Варианты принципиально-структурных схем однокаскадной ГТУ: а – с расположением выходного вала назад; б – с расположением выходного вала вперед

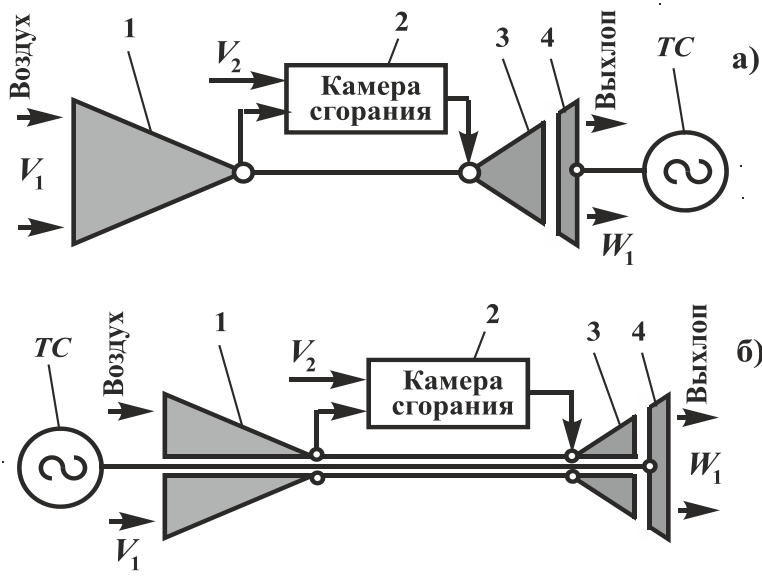


Рисунок 5. Варианты принципиально-структурных схем однокаскадной ГТУ со свободной рабочей турбиной: а – с расположением выходного вала назад; б – с расположением выходного вала вперед

5);

- двухкаскадные ГТУ со свободной рабочей турбиной, с задним и передним расположением выходного вала (рис. 6).

структурного, принципиально-структурного, схемно-конструктивного совершенствования с целью повышения показателей эффективности использования этих установок для решения технологических задач в нефтегазовой промышленности. А также в направлении улучшения их эксплуатационных свойств, компактности, эргономичности и экологической безопасности.

В нефтегазовой промышленности используются различные варианты принципиально-структурных схем ГТУ. К основным вариантам принципиально-структурных схем ГТУ можно отнести следующие:

- однокаскадные ГТУ, с задним и передним расположением выходного вала (рис. 4);
- однокаскадные ГТУ со свободной рабочей турбиной, с задним и передним расположением выходного вала (рис.

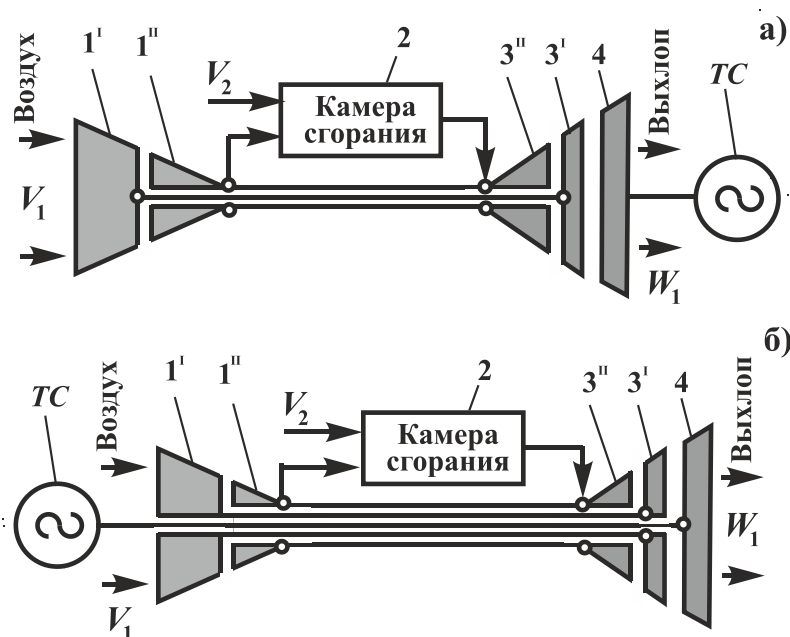


Рисунок 6. Варианты принципиально-структурных схем двухкаскадной ГТУ со свободной рабочей турбиной: а – с расположением выходного вала назад; б – с расположением выходного вала вперед

На рис. 4, ..., рис. 6 цифрами обозначены следующие позиции: 1 – компрессор, 2 – камера сгорания, 3 – турбина компрессора, 4 – рабочая (свободная) турбина, 1^l – компрессор низкого давления, 1^h – компрессор высокого давления, 3^l – турбина компрессора низкого давления, 3^h – турбина компрессора высокого давления. Здесь также показано: V_1 – входной поток воздуха; V_2 – подача топлива; W_1 – выход газовой смеси (выхлоп); $ТС$ – технологическая система, например генератор электричества.

Анализ особенностей работы (рис. 3) всех вариантов ГТУ (рис. 4, ..., рис. 6) в производственных

условиях показывает, что его подсистемы, а именно лопатки компрессора и турбин, работают в различных эксплуатационных условиях. Обычно, из-за высоких температурных режимов работы и процессов, происходящих при этом, лопатки турбин имеют низкий ресурс работы по сравнению с лопатками компрессора. При этом высокие температуры в зоне турбин усиливают эрозионно-коррозионные явления, химические и физические процессы из-за нагрева лопаток, действия солей, кислот и других воздействий. Все это снижает работоспособность лопаток турбокомпрессора и в целом уменьшает ресурс ГТУ.

4. Метод и общий подход повышения работоспособности лопаток турбокомпрессора

Для повышения ресурса лопаток турбокомпрессора, а именно компрессора, турбины компрессора и рабочей (свободной) турбины 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. 7 представлена структурная схема общего подхода реализации одинакового ресурса лопаток компрессора и турбин. Для того чтобы выполнить 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 ресурсов.



Рисунок 7. Структурная схема общего подхода реализации одинакового ресурса лопаток компрессора и турбин

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 могут быть выполнены с помощью функционально-ориентированных технологий [5], которые могут быть следующие:

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

На рис. 7 стрелки показывают связи (отношения) φ_i^j между объектами общего подхода 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 [5]:

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

где φ_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 $B = \{b_1, b_3\}$;

φ_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;

φ_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.

5. Заключение

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 метод повышения работоспособности лопаток турбокомпрессора, работающих в различных условиях эксплуатации. Этот метод базируется на обеспечении функционально-ориентированных свойств групп лопаток различных подсистем. Он обеспечивает выравнивание ресурсов лопаток компрессора и лопаток турбин.

ЛИТЕРАТУРА

1. Корж, В. В. Эксплуатация и ремонт оборудования насосных и компрессорных станций: учеб. пособие [Текст] / В. В. Корж, А. В. Сальников. – Ухта: УГТУ, 2010. – 184 с.
2. Михайлов, В.А., Общие основы и принципы повышения ресурса газотурбинных двигателей на базе функционально-ориентированного подхода / В. А. Михайлов [и др.] // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных трудов. – Донецк: ДонНТУ, 2017. – Вып. 3 (58). – С. 32-43.
3. 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, 2017 – №9. – С. 42-48.
4. Пичко, А. П. К определению структурной надежности газотурбинных установок нефтегазовой промышленности / А. П. Пичко [и др.] // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных трудов. – Донецк: ДонНТУ, 2017. – Вып. 3 (58). – С. 54-74.
5. Михайлов, А. Н. Основы синтеза функционально-ориентированных технологий / А. Н. Михайлов. – Донецк: ДонНТУ, 2009. – 346 с.

Поступила в редколлегию 15.05.2018 г.