

УДК 629.7

DOI 10.52928/2070-1616-2023-48-2-60-65

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ОСЕВОГО КОМПРЕССОРА ВЕРТОЛЕТНОГО ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ

*В.А. ПОТАПОВ, канд. тех. наук, доц. А.А. САНЬКО
(Белорусская государственная академия авиации, Минск)*

Целью работы является повышение качества со снижением трудоемкости диагностирования осевого компрессора вертолетного газотурбинного двигателя при эрозионно-абразивном изнашивании его лопаток. Выявлены закономерности изменения структурных и диагностических параметров компрессора в зависимости от наработки и региона эксплуатации двигателя. Обоснованы значения основных газодинамических параметров и износа лопаток компрессора и связей между ними, определяющих предельное состояние вертолетного газотурбинного двигателя типа ТВ3-117. Предложена методика определения остаточного ресурса компрессора, учитывающая регион эксплуатации вертолета. Проведена оценка качества диагностирования компрессора с применением газодинамических параметров вертолетного газотурбинного двигателя в эксплуатации.

Ключевые слова: *диагностирование, газотурбинный двигатель, осевой компрессор, износ лопаток, запас устойчивости, помпаж, остаточный ресурс, зависимости газодинамических параметров.*

Введение. Важной задачей в эксплуатации авиационной техники государственной авиации Республики Беларусь (ГА РБ) является совершенствование как структуры технической диагностики, так и процессов, направленных на объективное определение технического состояния основных элементов воздушного судна с минимальными трудозатратами. Одним из основных элементов воздушного судна является газотурбинный двигатель (ГТД). Для вертолетных ГТД ресурсные возможности в основном определяются техническим состоянием компрессора [1]. Главной проблемой в эксплуатации ГТД является ухудшение характеристики компрессора вследствие эрозионно-абразивного изнашивания его лопаток, приводящего к потере газодинамической устойчивости (помпажу) [2]. Объективное определение запаса устойчивости компрессора вертолетных ГТД и его ресурса – важная научно-техническая задача эксплуатирующих данный вид техники организаций, решение способствует ее поддержанию на высоком уровне надежности.

Постановка задачи. Исследования осевого компрессора вертолетного газотурбинного двигателя как объекта технического диагностирования (контроля технического состояния) показали:

- известные методы определения запаса устойчивости компрессора, основанные на анализе его газодинамических параметров, в основном применяются в заводских условиях при испытаниях двигателей. Их использование в условиях эксплуатации затруднительно [2];
- используемые сегодня в эксплуатации методы косвенного определения запаса устойчивости компрессора по износу элементов его проточной части [3] имеют высокую степень субъективности, большую трудоемкость и не дают прогноз остаточного ресурса компрессора с учетом эксплуатационных факторов двигателя;
- среди множества эксплуатационных воздействий наиболее значительными, влияющими на изнашивание лопаток осевого компрессора, являются воздействия мелких частиц пыли, песка и абразива. Износ лопаток прямо пропорционален суммарному количеству пыли, прошедшей через воздушный тракт ГТД, или ее концентрации в воздухе [4];
- проводимые в ряде стран исследования закономерностей изменения геометрических и газодинамических параметров проточной части компрессора от наработки вертолетного ГТД применимы для отдельных регионов эксплуатации и не находят практического применения в условиях Республики Беларусь [5];
- вопрос использования газодинамических характеристик компрессора с целью диагностирования его технического состояния не раскрыт в достаточной мере.

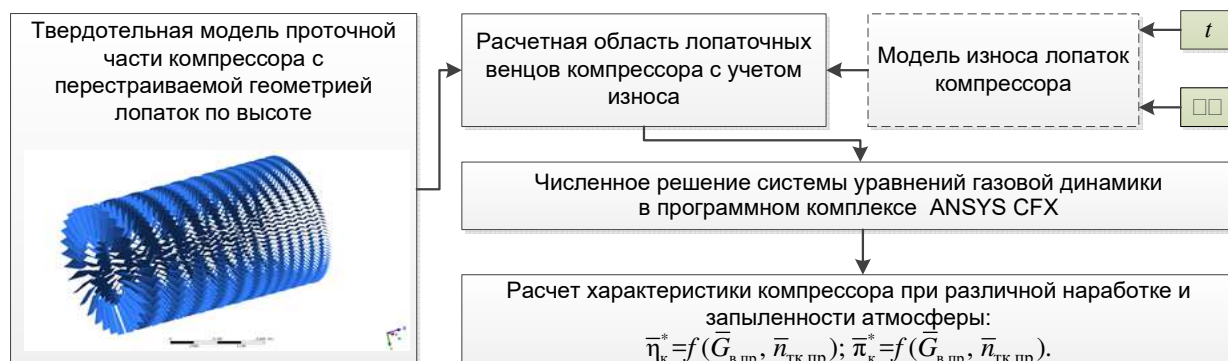
Таким образом, проведенные исследования доказывают необходимость внедрения в эксплуатацию ГТД новых методов и средств контроля, повышающих качество диагностирования компрессора, с определением вида и содержания работ в зависимости от региона эксплуатации двигателя. Это возможно за счет исследования закономерностей изменения структурных и диагностических параметров компрессора и взаимосвязей между ними в зависимости от наработки и региона эксплуатации двигателя (запыленности атмосферы).

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- теоретико-экспериментальные исследования газодинамических параметров и геометрических величин лопаток компрессора от наработки двигателя и запыленности атмосферы региона эксплуатации вертолета;
- выбор газодинамических параметров двигателя, представляющих диагностическую ценность в определении технического состояния осевого компрессора при эрозионно-абразивном изнашивании его лопаток;
- Разработка методики определения остаточного ресурса осевого компрессора с учетом региона эксплуатации вертолета.

Решение задач. В качестве объекта исследования был выбран 12-ступенчатый осевой компрессор широко применяемого в мире и в ГА РБ двигателя типа ТВ3-117. Для исследования газодинамической характе-

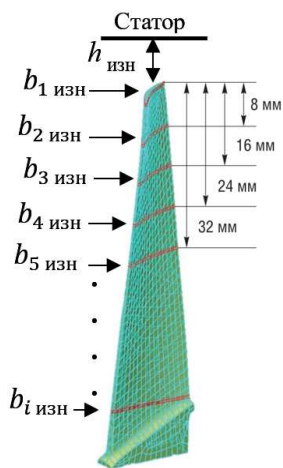
ристики компрессора с учетом закономерностей износа лопаток от наработки двигателя и запыленности атмосферы разработана методика расчета, учитывающая форму изношенной поверхности лопатки и основанная на численном решении уравнений газовой динамики с описанием лопаточных венцов компрессора (рисунок 1).



t – наработка двигателя, ч; PM – концентрация пыли в воздухе, мкг/м^3 ; η_k^* – коэффициент полезного действия компрессора; $G_{в пр}$ – приведенный секундный расход воздуха, проходящего через входное сечение компрессор, кг/с ; $n_{тк пр}$ – приведенная частота вращения ротора компрессор, об/мин ; π_k^* – степень повышения полного давления воздуха в компрессоре

Рисунок 1. – Блок-схема методики расчета газодинамических параметров и износа лопаток осевого компрессора вертолетного газотурбинного двигателя типа ТВ3-117 от наработки и запыленности атмосферы

Блок-схема методики расчета (см. рисунок 1) включает в себя разработанную твердотельную модель проточной части компрессора с перестраиваемой геометрией лопаток [4]. Для расчета газодинамических параметров компрессора, учитывающих форму изношенной поверхности лопаток по высоте в отличие от существующих одномерных расчетов [6], разработана модель износа лопаток компрессора. Модель износа представляет собой эмпирические зависимости износов хорд пера по сечениям и радиального зазора между лопатками рабочего колеса (РК) и статором компрессора от концентрации пыли и наработки двигателя (рисунки 2, 3) [4].



$$h_{изн} = a_0 + a_1 \cdot t + a_2 \cdot PM + 2 a_3 \cdot t \cdot PM, \quad (1)$$

$$b_{i\text{ изн}} = a_0 + a_1 \cdot t + a_2 \cdot PM + 2 a_3 \cdot t \cdot PM \quad (2)$$

Рисунок 2. – Зависимости износа хорды пера по сечениям лопатки $b_{i\text{ изн}}$ и радиального зазора $h_{изн}$ между лопаткой РК и статором компрессора от PM и t

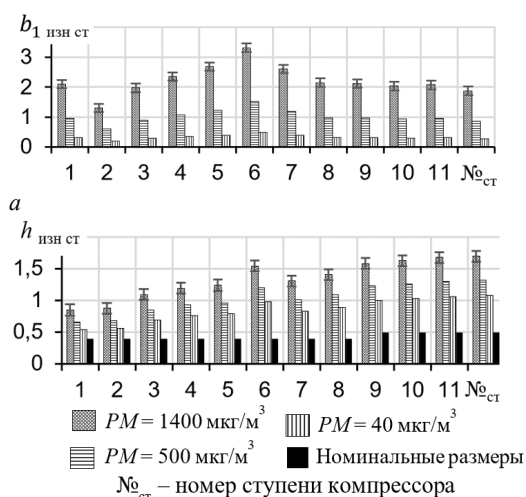


Рисунок 3. – Гистограмма износа хорды $b_{i\text{ изн ст}}$ и радиального зазора $h_{изн ст}$ у периферии рабочих лопаток компрессора

На основе предварительных расчетов газодинамических параметров входной ступени компрессора с использованием разработанной методики установлено (рисунок 4), что полученные зависимости износа лопаток компрессора от наработки и среднегодовой концентрации пыли в воздухе, с учетом формы изношенной поверхности лопаток, позволяют повысить точность определения газодинамических параметров компрессора до 10% [6]. Расчет газодинамических параметров всего компрессора при различной наработке t и запыленности

атмосферы PM на номинальном режиме работы ГТД ($n_{тк пр} = 95\%$) (рисунок 5) позволил установить снижение степени повышения давления воздуха в компрессоре, коэффициента полезного действия, приведенного расхода воздуха и запаса газодинамической устойчивости компрессора ΔK_y для различных регионов эксплуатации двигателей [4].

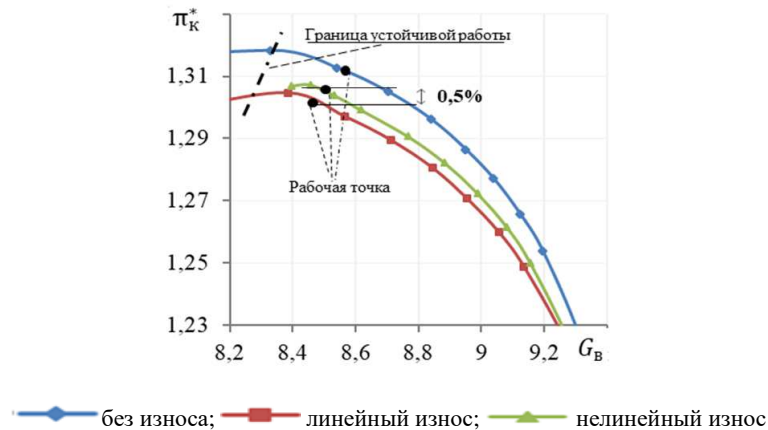
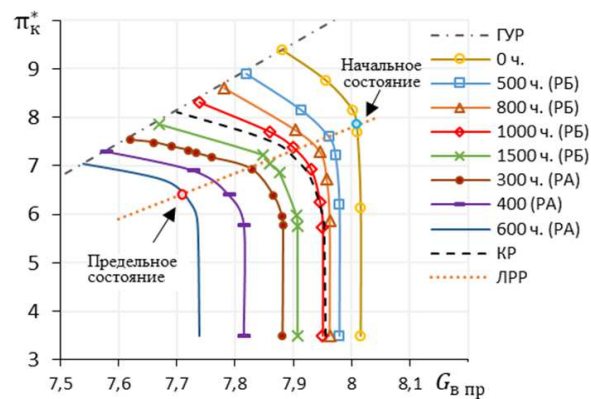


Рисунок 4. – Напорная характеристика входной ступени компрессора с различными видами износа



РБ – Республика Беларусь ($PM = 40 \text{ мкг/м}^3$); РА – Республика Алжир ($PM = 1400 \text{ мкг/м}^3$); ЛРР – линия рабочих режимов; Гур – граница устойчивой работы; КР – капитальный ремонт (РБ)

Рисунок 5. – Напорная характеристика компрессора при различной наработке t и запыленности атмосферы PM

Проведенные исследования показали, что изменения газодинамических параметров до предельного состояния компрессора составляют ΔK_y (44,12%) и π_k^* (18,5%), η_k^* (6,15%), $G_{в пр}$ (5,35%). Таким образом, наиболее информативными параметрами для определения технического состояния компрессора при эрозивно-абразивном изнашивании его лопаток являются ΔK_y и π_k^* .

В работе [2] доказана возможность определения ΔK_y компрессора в эксплуатации с применением диагностических матриц. Однако в разработанной системе диагностических уравнений с учетом конструкции двигателя типа ТВЗ-117 используется функциональный параметр – температура газов перед турбиной двигателя T_T . Изменение T_T может быть вызвано не только ухудшением характеристики компрессора, но и неисправностью топливной автоматики и других элементов двигателя. Эти факты не дают адресности в постановке диагноза, а именно степень износа лопаток компрессора в эксплуатации. Таким образом, для контроля технического состояния компрессора при эрозивно-абразивном изнашивании его лопаток и определения остаточного ресурса компрессора в качестве основного газодинамического параметра двигателя предлагается использовать диагностический параметр π_k^* .

Анализ расчета газодинамических параметров компрессора показал, что увеличение износа лопаток по найденным зависимостям (см. рисунок 2) до предельного ($b_{1 изн} > 2 \text{ мм}$) приводит к снижению границы устойчивой работы компрессора (см. рисунок 5) и, соответственно, к уменьшению ΔK_y . При снижении ΔK_y с 24,25% до 12,4% наблюдаются срывные явления в периферийной области лопаток 6–12-й ступеней, приводящие к воз-

никновению помпажа [4]. При этом предельное значение степени повышения давления воздуха в компрессоре $\pi_{к.пр}^*$ составляет 6,5.

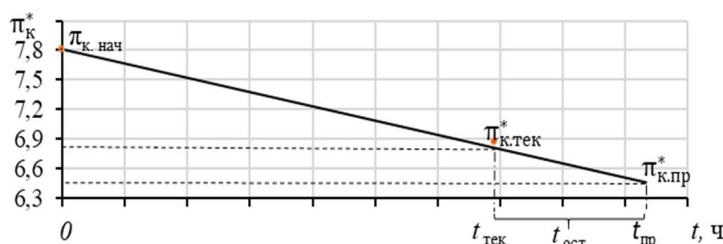
Исходя из полученной напорной характеристики компрессора, диагностический параметр π_k^* , рассчитывается как

$$\pi_k^* = 7,8 - 3,5 \cdot 10^{-4} \cdot PM - 3,4 \cdot 10^{-4} \cdot t - 2 \cdot 3,2 \cdot 10^{-7} \cdot t \cdot PM. \quad (1)$$

Связь между износом лопаток первой ступени компрессора $b_{1изн}$ и π_k^* имеет вид:

$$b_{1изн} = 11,46 - 1,46 \cdot \pi_k^*, \quad (2)$$

Выражения (3) и (4) позволяют прогнозировать остаточный ресурс компрессора $t_{ост}$ вертолетного ГТД типа ТВ3-117 с учетом региона его эксплуатации. На рисунке 6 показано снижение параметра π_k^* от наработки двигателя t .



$t_{пр}$ и $t_{тек}$ – наработка двигателя до предельного состояния и в рассматриваемый момент времени (текущая), соответственно, ч; $\pi_{к.нач}^*$, $\pi_{к.тек}^*$ и $\pi_{к.пр}^*$ – значения структурного показателя: начальное, текущее и предельное, соответственно

Рисунок 6. – Снижение диагностического параметра π_k^* от наработки двигателя t

Остаточный ресурс компрессора рассчитывается как

$$t_{ост} = t_{пр} \cdot \frac{\pi_{к.тек}^* - \pi_{к.пр}^*}{\pi_{к.нач}^* - \pi_{к.пр}^*}. \quad (3)$$

Наработка двигателя до предельного состояния компрессора определяется по выражению (3), где $\pi_{к.пр}^*$ имеет значение 6,5. Таким образом, $t_{пр}$ имеет вид:

$$t_{пр} = 3028 - 1,74 \cdot PM. \quad (4)$$

Выполнен сравнительный анализ достоверности определения ΔK_y с использованием на сегодня структурного параметра $b_{1изн}$ и предлагаемого в работе диагностического π_k^* . На основании расчетных данных газодинамических параметров компрессора проведен полнофакторный эксперимент, определяющий статистическую связь между исследуемыми параметрами с учетом капитального ремонта двигателя (рисунок 5) с заменой лопаток первой ступени компрессора (таблица 1).

Таблица 1. – Зависимости изменения ΔK_y от износа лопаток первой ступени $b_{1изн}$ и степени повышения давления воздуха в компрессоре π_k^*

Вид контроля	Определение ΔK_y		Коэффициент детерминации	Средняя ошибка аппроксимации
По $b_{1изн}$	$\Delta K_y = 23,3 - 7,18 b_{1изн}$	(5)	0,57	11%
По π_k^*	$\Delta K_y = -45,5 + 8,8 \pi_k^*$	(6)	0,956	5%
По $b_{1изн}$ и π_k^*	$\Delta K_y = -42,4 - 0,5 b_{1изн} + 8,4 \pi_k^*$	(7)	0,957	4,7%

Согласно таблице 1, параметр $b_{1изн}$ имеет слабую корреляционную связь по отношению к ΔK_y в отличие от π_k^* . В выражении (7) коэффициент при $b_{1изн}$ статистически незначим при доверительной вероятности 0,05. Все это подтверждает слабую информативность структурного параметра $b_{1изн}$ и, как следствие, низкую досто-

верность определения технического состояния компрессора при эксплуатации двигателей, прошедших капитальный ремонт.

Таким образом, методика контроля технического состояния компрессора при изнашивании его лопаток представляет собой допусковый контроль степени повышения давления компрессора с помощью разработанного средства контроля π_k^* двигателя типа ТВ3-117 и представлена в работе [2].

Качество диагностирования компрессора двигателя типа ТВ3-117 с применением разработанной методики было оценено главными показателями качества систем диагностирования, характеризующими полноту и глубину поиска дефекта, а также вторичным показателем времени поиска дефекта (таблица 2).

Таблица 2. – Сравнительный анализ показателей диагностирования компрессора

Показатели диагностирования	До применения разработанной методики	С применением разработанной методики
$K_{п.п}$	0,33	0,66
$K_{ГП}$	0,1	0,17
$S_{д}$	0,9	0,3

1. Коэффициент полноты проверки $K_{п.п}$:

$$K_{п.п} = n_k / n_o. \quad (8)$$

2. Коэффициент безразборного диагностирования $K_{БД}$:

$$K_{БД} = F/R. \quad (9)$$

3. Средняя трудоемкость диагностирования $S_{д}$

$$S_{д} = \sum_{j=1}^N S_{дj}, \quad (10)$$

где n_k – число диагностических параметров;

n_o – число параметров технического состояния, использование которых обеспечивает методическую достоверность проверки;

F – число составных частей изделия, с точностью до которых определяется место дефекта;

R – общее число составных частей изделия, с точностью до которых требуется определение места дефекта;

$S_{дj}$ – трудоемкость j -й операции диагностирования (чел.-ч).

Заключение. Проведенные в работе исследования позволили: обосновать значения основных газодинамических параметров и износа лопаток рабочего колеса компрессора и связей между ними, определяющих предельное состояние вертолетного газотурбинного двигателя типа ТВ3-117 и исключают возникновение помпажа при его работе; разработать методику определения остаточного ресурса компрессора, учитывающую регион эксплуатации вертолета, и средство для контроля степени повышения полного давления воздуха в компрессоре.

Полученные результаты свидетельствуют о достижении цели исследования, а именно, повышении качества со снижением трудоемкости диагностирования осевого компрессора вертолетного газотурбинного двигателя, что способствует поддержанию работы двигателя типа ТВ3-117 на высоком уровне надежности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лозинский Л.П., Янко А.К. Оценка технического состояния авиационных ГТД. – М.: Транспорт, 1982. – 160 с.
2. Санько А.А., Потапов В.А., Хованский Р.И. Диагностика технического состояния компрессора ГТД в процессе его эксплуатации по комплексному термогазодинамическому параметру // Авиацион. вестн. – 2020. – № 3. – С. 19–25.
3. Богданов А.Д., Калинин Н.П., Кривко А.И. Турбовальный двигатель ТВ3-117ВМ: конструкция и техническое обслуживание. – М.: Воздуш. транспорт, 2000. – 392 с.
4. Потапов В.А., Санько А.А., Кудин М.В. Зависимость термогазодинамических параметров работы компрессора вертолетного газотурбинного двигателя от его наработки и запыленности атмосферы // Изв. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-мат. наук. – 2021. – Т. 57, № 3. – С. 307–319.
5. Павленко Д.В., Двирник Я.В. Закономерности изнашивания рабочих лопаток компрессора вертолетных двигателей, эксплуатирующийся в условиях запыленной атмосферы // Вестн. двигателестроения. – 2016. – № 1. – С. 42–51.
6. Потапов В.А., Санько А.А. Моделирование характеристик многоступенчатого осевого компрессора турбовального ГТД с учетом нелинейности эрозионного износа его лопаток // Науч. вестн. МГТУ ГА. – 2020. – Т. 23, № 5. – С. 39–53.

REFERENCES

1. Lozinskii, L.P. & Yanko, A.K. (1982). *Otsenka tekhnicheskogo sostoyaniya aviatsionnykh GTD*. Moscow: Transport. (In Russ.)

2. San'ko, A.A., Potapov, V.A. & Khovanskii, R.I. (2020). Diagnostika tekhnicheskogo sostoyaniya kompressora GTD v protsesse ego ekspluatatsii po kompleksnomu termogazodinamicheskomu parametru [Diagnostics of the technical condition of the gas turbine engine compressor during its operation according to the complex thermogasdynamic parameter]. *Aviatsionnyi vestnik [Aviation Bulletin]*, (3), 19–25. (In Russ., abstr. in Engl.)
3. Bogdanov, A.D., Kalinin, N.P. & Krivko, A.I. (2000). *Turboval'nyi dvigatel' TVZ-117VM: konstruktziya i tekhnicheskoe obsluzhivanie*. Moscow: Vozdush. Transport. (In Russ.)
4. Potapov, V.A., San'ko, A.A. & Kudin, M.V. (2021). Zavisimost' termogazodinamicheskikh parametrov raboty kompressora vertoletnogo gazoturbinnoho dvigatelya ot ego narabotki i zapylennosti atmosfery [Dependence of the thermogas-dynamic parameters of the compressor of a helicopter gas turbine engine on its operating time and dustiness of the atmosphere]. *Izvestiya Natsional'noi akademii nauk Belarusi. Seriya fiz.-mat. nauk [Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Series of Phys.-Math. Sciences]*, 57(3), 307–319. (In Russ., abstr. in Engl.)
5. Pavlenko, D.V. & Dvirnik, Ya.V. Zakonomernosti iznashivaniya rabochikh lopatok kompressora vertoletnykh dvigatelei, ekspluatiruyu-shchiisya v usloviyakh zapylennoi atmosfery [Patterns of wear of rotor blades of a helicopter engine compressor operating in a dusty atmosphere]. *Vestnik dvigatelestroeniya [Bulletin of engine building]*, (1), 42–51. (In Russ., abstr. in Engl.)
6. Potapov, V.A. & San'ko, A.A. (2020). Modelirovanie kharakteristik mnogostupenchatogo osevoho kompressora turboval'nogo GTD s ucheto nelineinosti erozionnogo iznosa ego lopatok [Modeling of the characteristics of a multistage axial compressor of a turboshaft gas turbine engine taking into account the nonlinearity of the erosive wear of its blades]. *Nauchnyi vestnik MGTU GA [Scientific Bulletin MSTU GA]*, 23(5), 39–53. (In Russ., abstr. in Engl.)

Поступила 16.05.2023

IMPROVING THE QUALITY OF DIAGNOSTICS OF AN AXIAL COMPRESSOR OF A HELICOPTER GAS TURBINE ENGINE

V. POTAPOV, A. SANKO
(Belarusian State Aviation Academy, Minsk)

The aim of the work is to improve the quality with a decrease in the complexity of diagnosing an axial compressor of a helicopter gas turbine engine with erosive-abrasive wear of its blades. Regularities of changes in the structural and diagnostic parameters of the compressor depending on the operating time and the region of operation of the engine are revealed. The values of the main gas-dynamic parameters and the wear of the compressor blades and the links between them, which determine the limiting state of the TV3-117 type helicopter gas turbine engine, are substantiated. A method for determining the residual life of the compressor is proposed, taking into account the region of operation of the helicopter. The quality of compressor diagnostics was assessed using the gas-dynamic parameters of a helicopter gas turbine engine in operation.

Keywords: *diagnostics, gas turbine engine, axial compressor, blade wear, stability margin, surging, residual life, dependencies of gas dynamic parameters.*