

APPLICATION OF A PROBABILISTIC APPROACH FOR PREDICTING THE DURABILITY OF THE TURBINE BLADES OF A GROUND-BASED GAS GENERATOR TURBINE FOR A GPU

N. P. Velikanova ^{1a}, N. A. Protasova ^{2b}, P. G. Velikanov ^{1a}

¹ Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev - KAI (KNITU-KAI)

² LLC "AHTZ" (AHTZ)

^a pvelikanov@mail.ru, ^b nprotasova@bk.ru

Submitted 2021, April 25

Abstract. The method is based on the analysis of the stress-strain state of the turbine blades and its changes during long-term operation in accordance with the characteristics of the ground-based gas turbine units for the GPU. In addition, the paper examines statistical data on the mechanical characteristics and durability of the material of the turbine blades—a heat-resistant alloy ZhS6U-VI on a nickel base. Changes in the material characteristics during long-term operation are taken into account. The durability of the turbine blades is predicted based on changes in the statistical safety margins during operation. The object of the study is the working blades of the gas generator turbine of the NK-16ST ground installation, which is currently widely used and has an established assigned resource of 150000 hours.

Keywords: working blade; ZhS6U-VI; durability; resource; statistical analysis; probabilistic criterion of destruction.

ПРИМЕНЕНИЕ ВЕРОЯТНОСТНОГО ПОДХОДА ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ДОЛГОВЕЧНОСТИ РАБОЧИХ ЛОПАТОК ТУРБИНЫ ГАЗОГЕНЕРАТОРА НАЗЕМНОЙ ГТУ ДЛЯ ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩЕГО АГРЕГАТА

Н. П. Великанова ^{1a}, Н. А. Протасова ^{2b}, П. Г. Великанов ^{1a}

¹ ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева-КАИ» (КНИТУ-КАИ)

² ООО «Атомхимтехзащита» (АХТЗ)

^a pvelikanov@mail.ru, ^b nprotasova@bk.ru

Поступила в редакцию 25.04.2021

Аннотация. Метод основан на анализе напряженно-деформированного состояния (НДС) рабочих лопаток турбин и его изменении в процессе длительной эксплуатации в соответствии с особенностями работы наземных ГТУ для газоперекачивающего агрегата. Кроме этого, в работе исследуются статистические данные о механических характеристиках и долговечности материала рабочих лопаток турбин — жаропрочного сплава ЖС6У-ВИ на никелевой основе. Учитывается изменение характеристик материала в процессе длительной эксплуатации на наземной ГТУ. Прогнозирование долговечности рабочих лопаток турбин осуществляется на ос-

нове изменения статистических запасов прочности в процессе эксплуатации. Объект исследования — рабочие лопатки турбины газогенератора наземной установки НК-16СТ, которая в настоящее время широко используется и имеет установленный назначенный ресурс 150000 часов.

Ключевые слова: рабочая лопатка; ЖСБУ-ВИ; долговечность; ресурс; статистический анализ; вероятностный критерий разрушения.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время авиационные газотурбинные двигатели, отработавшие свой летный ресурс, находят применение для привода газоперекачивающих агрегатов, электрогенераторов, газоструйных установок, устройств для очистки карьеров, снегоочистителей и т.д. [1, 2]. Такое применение авиадвигателей, сохранивших способность к дальнейшему использованию, позволяет сохранить овестьвленный труд в наукоемкой высокотехнологичной продукции, а также сэкономить дорогостоящие материалы. При этом сохраняется большинство деталей и узлов базового авиационного двигателя. К этим деталям относятся и рабочие лопатки (РЛ) турбины газогенератора. РЛ турбин газотурбинных двигателей, как авиационных, так и наземных, являются важнейшими деталями, во многом определяющими возможность получения высоких рабочих параметров, ресурс и безопасность работы. Разрушение РЛ турбины, как в полете, так и на газоперекачивающих станциях, приводит, как правило, к значительным разрушениям внутри силовой установки. Поэтому проблема точного прогнозирования долговечности РЛ, сводящего к минимуму вероятность разрушения, всегда была и остается актуальной на всех стадиях создания, доводки и эксплуатации двигателей.

В процессе длительной эксплуатации вследствие деградиционных изменений (эрозия и коррозия лопаток, выработка уплотнений, загрязнение и изменение размеров проточной части двигателя) происходит изменение основных параметров работы двигателей, в частности, частот вращения роторов и температур газа в турбине, определяющих напряженно-деформированное состояние (НДС) роторных деталей турбин.

Конструкционные материалы, применяемые в машиностроении, в том числе и для деталей авиационных ГТД, обладают рассеянием механических свойств и характеристик долговечности, как в исходном состоянии, так и после длительной наработки.

Исходные характеристики рассеяния механических свойств и долговечности материалов деталей турбин под действием деформационного и температурного старения, протекающего в процессе эксплуатации двигателя, имеют тенденцию к изменению, что необходимо учитывать для успешного решения проблемы прогнозирования долговечности. Приведенные аргументы предопределяют необходимость применения методов теории вероятности и математической статистики для оценки и прогнозирования долговечности ответственных деталей, какими являются РЛ турбин.

Объектом исследования в настоящей работе являются РЛ 1 ступени турбины высокого давления (ВД) газогенератора серийных одноконтурных двухвальных газотурбинных наземных установок НК-16СТ для газоперекачивающего агрегата, разработанных на основе конвертированных авиационных двигателей семейства НК-8 конструкции Н. Д. Кузнецова. Опыт создания приводных агрегатов на базе авиационного двигателя показывает, что примерно до 75 % узлов и деталей базового двигателя удается сохранить [1, 2]. Изменения проводятся в узлах, связанных с новым назначением изделия, сменой вида используемого топлива и появлением в составе конвертированного двигателя силовой турбины. Силовая турбина создается заново.

Рабочая лопатка 1 ступени турбины ВД газогенератора является наиболее нагруженной РЛ двигателя НК-16СТ, т.к. работает в условиях максимальной частоты вращения ротора и при максимальной температуре.

Материал лопатки – литейный сплав ЖС6У-ВИ равноосной структуры.

РАСЧЕТ НА ПРОЧНОСТЬ РЛ ТУРБИНЫ ГАЗОГЕНЕРАТОРА

Расчет статической прочности РЛ проведен по теории стержней с начальной закруткой.

Расчет проведен на ресурс 200000 часов со 100 % его использованием за ресурс. Аппроксимация свойств длительной прочности материала лопаток проведена с использованием параметра Ларсона — Миллера.

Результаты расчета статической прочности РЛ 1 ступени турбины ВД газогенератора двигателя НК-16СТ приведены в табл. 1 и 2.

Таблица 1. Результаты расчета статической прочности РЛ

<i>Режим</i>	<i>Радиус сечения R, м</i>	<i>Суммарные напряжения σ_{Σ}, МПа</i>	<i>Температура t_r, °C</i>
N = 16 МВт $t_H = +15$ °C $T_4^* = 1066$ К $\tau = 100$ %	0,455	145	739

Таблица 2. Результаты расчета статической прочности РЛ

<i>Режим</i>	<i>Предел длительной прочности, $\sigma_{ол}$, МПа</i>	<i>K_{Mmin}</i>
N = 16 МВт $t_H = +15$ °C $T_4^* = 1066$ К $\tau = 100$ %	314	2,16

В результате выполненного расчета лопаток установлено следующее:

– максимальные суммарные действующие напряжения имеют место в корневом сечении лопатки и составляют $\sigma_{\Sigma max} = 185$ МПа;

– минимальные значения коэффициентов запасов для рассматриваемой конструкции лопаток – это коэффициенты эквивалентных запасов по напряжениям (по длительной прочности) K_M ; остальные коэффициенты запасов – эквивалентные запасы по долговечности K_{τ} , по температуре K_t и по циклической долговечности K_N значительно превышают требования нормативной документации; из этого следует, что основным механизмом повреждения этих рабочих лопаток является их сопротивление длительному статическому нагружению;

– минимальные значения запасов прочности K_M пера лопаток рассматриваемой конструкции имеют место в среднем сечении ($R \approx 0,455$ м), совпадающим с местом действия максимальных рабочих температур;

– в зоне действия максимальных рабочих температур действующие суммарные напряжения составляют $\sigma_{\Sigma} = 145$ МПа.

Соответствие результатов расчетного исследования НДС рабочих лопаток их реальной нагруженности подтверждается данными металлургического исследования лопаток после длительной эксплуатации [3, 4].

Для анализа закономерностей нагруженности рассматриваемых РЛ необходимо отметить следующие факты:

– как было отмечено выше, при длительной эксплуатации ГТД происходит загрязнение проточной части двигателей;

– учитывая значительную естественную запыленность атмосферы при эксплуатации наземных ГТУ [2], эти двигатели получают в процессе эксплуатации более интенсивное загрязнение проточной части двигателя по сравнению с авиационными;

– в связи с этим для двигателей НК-16СТ введена межрегламентная наработка 3000 часов с проведением диагностических мероприятий и промывкой проточной части двигателя специальным составом. Это позволяет восстановить параметры работы двигателей до исходных значений.

Из этого следует вывод: учитывая значительные ресурсы наземных двигателей и многократное восстановление параметров работы двигателей, можно считать, что суммарная наработка не оказывает влияния на параметры работы двигателя и, следовательно, нагруженность деталей двигателя остается близкой к исходному уровню, в отличие от авиационных двигателей.

ОЦЕНКА СТАТИСТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НАГРУЖЕННОСТИ РЛ ТУРБИН ГАЗОГЕНЕРАТОРА

С учетом того, что наземная ГТУ НК-16СТ эксплуатируется в различных климатических зонах, в интервале температур атмосферного воздуха от -50 °С до $+45$ °С, для получения информации о нагруженности рабочих лопаток и ее статистических характеристиках были построены приближенные зависимости:

$$n_{ВД} = f_1(T_H) + f_2(P_H); \tag{1}$$

$$t_6^* = f_3(T_H) + f_4(P_H); \tag{2}$$

$$\sigma_{\Sigma л} = f_5(n^2); \tag{3}$$

$$t_n = f_6(t_6^*) \tag{4}$$

и для 100 значений условий эксплуатации вычислены 100 значений действующих в лопатках напряжений. Затем эта выборка в 100 значений была подвергнута статистической обработке в соответствии с рекомендациями [5] с использованием программы Excel.

В табл. 3 представлены числовые характеристики распределения – средние значения величин $\sigma_{\Sigma л}$ и среднее квадратическое отклонение $S\sigma_{\Sigma л}$.

Таблица 3. Числовые характеристики распределения

Материал лопаток	$\sigma_{\Sigma л}$	$S\sigma_{\Sigma л}$
ЖС6У-ВИ равноосной структуры	127,6	1,965

Результаты проверки гипотезы о нормальности закона распределения величины $\lg \sigma_{\Sigma n}$ с использованием критерия согласия Пирсона (χ^2) позволяют сделать вывод о том, что закон распределения величины $\lg \sigma_{\Sigma n}$ является нормальным при уровне значимости $\alpha = 0,05$ [6].

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАРАБОТКИ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ХАРАКТЕРИСТИКИ ДОЛГОВЕЧНОСТИ МАТЕРИАЛА РЛ ТУРБИН ГАЗОГЕНЕРАТОРА

По результатам анализа большого объема данных металлургического контроля производства и эксплуатации по механическим свойствам (кратковременное растяжение при 20 °С, длительное растяжение при 975 °С, 230 МПа) и микроструктуре материала рабочих лопаток первой ступени турбины из сплава ЖС6У-ВИ за период производства 1986...2008 гг. и после длительной эксплуатации до 100 тыс. ч в составе двигателей семейства НК газоперекачивающих агрегатов получено следующее [3, 4]:

1. Характеристики кратковременных свойств σ_b , δ , ψ материала распределены по нормальному закону, характеристики долговечности τ – по логарифмически нормальному закону, как в исходном состоянии, так и после длительной эксплуатационной наработки до 100 тыс. ч. Длительная наработка не оказывает влияния на величины дисперсии распределений, но влияет на средние значения характеристик долговечности в горячей зоне лопатки и кратковременных характеристик относительного удлинения (пластичности) материала в горячей и холодной зонах лопатки. Характеристики кратковременных механических свойств σ_b и ψ от наработки не зависят.

2. Установлены количественные связи между характеристиками механических свойств (τ и δ) и наработкой, на основании которых определена динамика эксплуатационного расходования механических свойств. Наилучшая аппроксимация эксплуатационных изменений характеристик долговечности τ (при 975 °С, 230 МПа) материала лопаток достигнута степенным уравнением, характеристик относительного удлинения δ (при 20 °С) – экспоненциальным уравнением.

Для оценки морфологии основных фазовых составляющих материала ЖС6У-ВИ в исходном состоянии и после эксплуатационной наработки 70...100 тыс. ч были проведены исследования структуры материала и на рис. 1 и 2 приведены типичные фотографии.

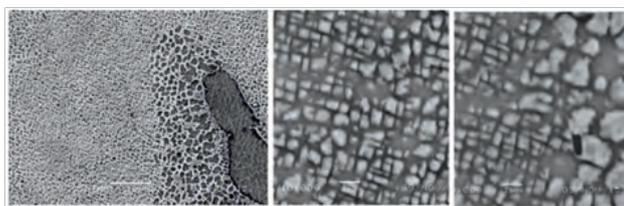


Рис. 1. Типичная микроструктура сплава ЖС6У-ВИ РЛ турбины ГПА в исходном состоянии после термической обработки

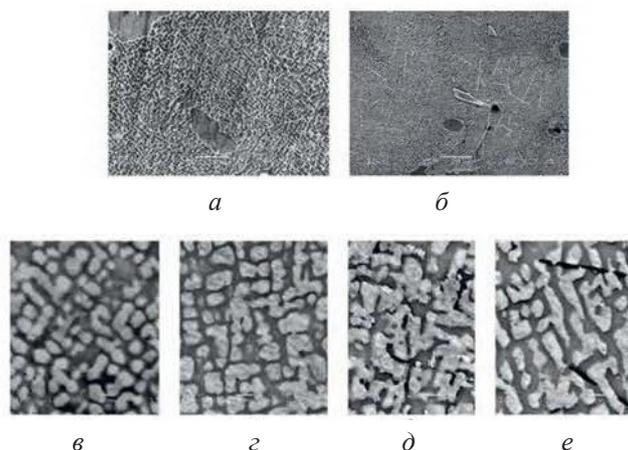


Рис. 2. Типичная микроструктура сплава ЖС6У-ВИ рабочей лопатки турбины ГПА после эксплуатационной наработки 70...100 тыс. ч

Сопоставлением микроструктуры материала в исходном состоянии и после наработки 70...100 тыс. ч установлено следующее:

- после длительной эксплуатации микроструктура основной упрочняющей γ' -фазы претерпевает незначительные изменения, наблюдается начальный процесс направленной коалесценции частиц (рис. 2, в–е), что сопровождается сохранением высокого уровня жаропрочности, не ниже нормативных требований на исходный материал;

- выявлены игольчато-пластинчатые выделения ТПУ-фаз (рис. 2, а, б, е), как в холодной, так и в горячей зонах лопатки, вызывающие охрупчивание сплава: в нашем случае получено значительное снижение уровня относительного удлинения δ (ниже норматива на исходный материал).

ВЕРОЯТНОСТНЫЙ МЕТОД ОЦЕНКИ ДОЛГОВЕЧНОСТИ РЛ ТУРБИН ГАЗОГЕНЕРАТОРА ГТУ ПО ПАРАМЕТРУ ДЛИТЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ

Предлагаемый метод прогнозирования долговечности рабочих лопаток турбин по параметру длительной прочности основан на статистической информации об изменении нагруженности и характеристик сопротивления материала РЛ турбин длительному статическому нагружению в процессе длительной эксплуатации.

Для длительного статического нагружения, характерного для РЛ турбин, И. А. Биргером [5] был предложен двумерный вероятностный критерий разрушения:

$$P_{\text{разр}} = \text{ver}(\sigma_r < \sigma_q, \tau_r < \tau_q), \quad (5)$$

где $\sigma_r = \sigma_{\text{дл}}$ – предел длительной прочности материала лопаток; $\sigma_q = \sigma_{\Sigma\text{л}}$ – эквивалентное действующее напряжение в опасном сечении (с минимальным запасом прочности K_M) лопатки при работе двигателя на наиболее тяжелом режиме; $\tau_r = \tau_p$ – время до разрушения материала лопатки при работе двигателя на наиболее тяжелом режиме; τ_q – время работы лопатки на указанном выше режиме.

Преобразуем выражение (5) к виду:

$$P_{\text{разр}} = \text{ver}(\sigma_r/\sigma_q < 1, \tau_r/\tau_q < 1) = \text{ver}(K_M^* < 1, K_\tau^* < 1), \quad (6)$$

где K_M^* и K_τ^* – статистические запасы прочности и долговечности, вычисленные по статистически экстремальным значениям параметров.

Для рабочих лопаток турбин выражения для статистических запасов прочности и долговечности представляют собой функции от толерантных коэффициентов K_{s1}, \dots, K_{s4} [7, 8], выбранных с уровнем значимости α и доверительной вероятностью P_d , а также объема выборок n_1, \dots, n_4 и искомого значения долговечности τ_3 .

Тогда условия разрушения в соответствии с критериями (5) и (6) можно представить в виде:

$$K_M^* = \varphi_1(\alpha, P_d, n_1, n_2, \tau_3) = 1; \quad (7)$$

$$K_\tau^* = \varphi_2(\alpha, P_d, n_3, n_4, \tau_3) = 1. \quad (8)$$

Из решения уравнений (7) и (8) относительно τ_3 получаем два значения долговечности в часах, из которых берем минимальное значение (оказалось, что минимальное значение долговечности τ_3 определяется из уравнения (7)).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный метод прогнозирования долговечности на основе статистической информации об изменении нагруженности и характеристик сопротивления материала РЛ турбин длительному статическому нагружению в процессе длительной эксплуатации позволяет определять долговечность рабочих лопаток турбин авиационных двигателей и газогенератора наземной ГТУ для газоперекачивающего агрегата при любом уровне эксплуатационной наработки. Метод применим для оценки индивидуального ресурса при эксплуатации по техническому состоянию.

Впервые получены новые экспериментальные данные по механическим свойствам и долговечности жаропрочного сплава на никелевой основе ЖС6У-ВИ за период эксплуатации до 100000 часов на наземной ГТУ. Выполненный статистический анализ полученных экспериментальных данных о механических свойствах и долговечности сплава ЖС6У-ВИ позволил построить регрессионные модели изменения средних значений характеристик материала РЛ турбин в зависимости от их исходного уровня и наработки, что позволило оценить снижение характеристик материала в процессе длительной эксплуатации в составе наземной ГТУ.

Предлагаемый метод прогнозирования долговечности РЛ турбин на основе вероятностно-статистического подхода позволяет прогнозировать долговечность РЛ турбин ГТД по параметру длительной прочности при проектировании, доводке и любом уровне эксплуатационной наработки.

С помощью предложенного метода, разработанного на основе вероятностного подхода, определена долговечность наиболее нагруженной РЛ турбины газогенератора двигателя НК-16СТ, и полученные результаты могут быть использованы для дальнейшего увеличения ресурса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зрелов В. А., Карташов Г. Г. Двигатели НК. Самара: Самар. Дом печати, 1999. 288 с. [V. A. Zrelov, G. G. Kartashov, *NK engines*, (in Russian). Samara: Samar. Dom pechat, 1999.]
2. Конвертирование авиационных ГТД в газотурбинные установки наземного применения / Е. А. Гриценко [и др.]. Самара: СНЦ РАН, 2004. 266 с. [E. A. Gritsenko, et al., *Conversion of aviation gas turbine engines into ground-based GTU*, (in Russian). Samara: SNCz RAN, 2004.]
3. Влияние эксплуатационной наработки на свойства и микроструктуру рабочих лопаток турбины двигателей ГПА / Н. А. Протасова [и др.] // Насосы. Турбины. Системы. 2019. № 1 (30). С. 18–25. [N. A. Protasova, et al., "Influence of operating time on the properties and microstructure of turbine blades of GTU engines", (in Russian), in *Nasosy. Turbiny. Sistemy*, no. 1 (30), pp. 18-25, 2019.]
4. Эксплуатационные закономерности расходования прочностных характеристик материала турбинных лопаток двигателей ГПА / Н. А. Протасова [и др.] // Авиационные двигатели. 2019. № 2 (3). С. 39–48. [N. A. Protasova, et al., "Operational patterns

of consumption of the material strength characteristics of GTU turbine blades engines”, (in Russian), in *Aviacionnye dvigateli*, no. 2 (3), pp. 39-48, 2019.]

5. **Великанова Н. П., Киселев А. С.** Анализ статистической нагруженности рабочих лопаток турбин авиационных ГТД большого ресурса на основе вероятностного подхода // *Авиационно-космическая техника и технология*. 2010. № 9 (76). С. 112–115. [N. P. Velikanova, A. S. Kiselev, “Analysis of the statistical loading of the turbine blades of large-resource aviation gas turbine engines on the basis of a probabilistic approach”, (in Russian), in *Aviacionno-kosmicheskaya tehnika i tehnologiya*, no. 9 (76), pp. 112-115, 2010.]

6. **Биргер И. А.** Вероятность разрушения и запасы прочности при многомерных критериях разрушения // *Проблемы прочности и динамики в авиадвигателестроении*. 1985. Вып. 3. С. 7–22. (Труды ЦИАМ. № 1109). [I. A. Birger, “Failure probability and safety margins under multidimensional failure criteria”, (in Russian), in *Problemy prochnosti i dinamiki v aviadvigatelestroenii*, Iss. 3, pp. 7-22, 1985. (Trudy CIAM no. 1109).]

7. **Степнов М. Н., Шаврин А. В.** Статистические методы обработки результатов механических испытаний. М.: Машиностроение, 2005. 400 с. [M. N. Stepnov, A. V. Shavrin, *Statistical methods for processing the results of mechanical tests*, (in Russian). Moscow: Mashinostroenie, 2005.]

8. **Большев Л. Н., Смирнов Н. В.** Таблицы математической статистики. М.: Наука, 1983. 416 с. [L. N. Bolshev, N. V. Smirnov, *Tables of mathematical statistics*, (in Russian). Moscow: Nauka, 1983.]

ОБ АВТОРАХ

ВЕЛИКАНОВА Нина Петровна, проф. каф. РДиЭУ. Дипл. механик (Казанск. гос. ун-т, 1971). Д-р техн. наук по динамике, прочности машин, приборов и аппаратуры (ЦИАМ, 2012). Иссл. в обл. оценки долговечности основных деталей ГТД с использованием вероятностно-статистических методов.

ПРОТАСОВА Надежда Анатольевна, зам. ген. директора по науке ООО «АХТЗ». Дипл. физика (Казанск. гос. ун-т, 1982). Канд. техн. наук по металловедению и терм. обр. металлов, а также физике твердого тела (ВИАМ, 1993). Иссл. в обл. материаловедения основных деталей ГТД.

ВЕЛИКАНОВ Петр Геннадьевич, доц. каф. РДиЭУ. Дипл. магистра механики (Казанск. гос. ун-т, 2005). Канд. физ.-мат. наук по механике деформируемого твердого тела (КГУ, 2008). Иссл. в обл. оценки долговечности основных деталей ГТД с использованием вероятностно-статистических методов, определение фундаментальных решений и компонент матриц фундаментальных решений дифференциальных уравнений, расчет изо-, орто-, анизотропных пластин и оболочек разными вариантами метода граничных элементов.

VELIKANOVA, Nina Petrovna, Prof., Dept. of Aircraft Engines and Power Plants. Dipl. Mechanics (Kazan State Univ., 1971). Dr. of Tech. Sci. (CIAM, 2012).

PROTASOVA, Nadezhda Anatolyevna, deputy Director General for Science LLC "AHTZ". Dipl. Physics (Kazan State Univ., 1982). Cand. of Tech. Sci. (VIAM, 1993).

VELIKANOV, Peter Gennadyevich, Assoc. Prof., Dept. of Aircraft Engines and Power Plants. Dipl. Master of Mechanic (Kazan State Univ., 2005). Cand. of Phis. and Math. Sci. (KSU, 2008).

Language: Russian.

Source: Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 26, no. 1 (95), pp. 40-47, 2022. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).