

УДК 531.39

EDN: OLUVIC DOI: 10.31429/vestnik-20-2-42-48

Изменение жаропрочности материала рабочих лопаток турбины с учетом влияния эксплуатационной наработки

Н. П. Великанова¹, П. Г. Великанов^{1,2}✉

¹ Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ, ул. К. Маркса, 10, Казань, 420111, Россия

² Казанский (Приволжский) федеральный университет, ул. Кремлевская, 18, Казань, 420008, Россия

✉ Великанов Петр Геннадьевич; ORCID 0000-0003-0845-2880; e-mail: pvelikanov@mail.ru

Аннотация. В статье рассматривается влияние длительной эксплуатационной наработки газотурбинного двигателя (ГТД) для гражданской авиации на долговечность (жаропрочность) материала рабочих лопаток (РЛ) турбин — литейного жаропрочного сплава ЖС6У-ВИ на никелевой основе равноосной структуры. Расчет статической прочности РЛ проведен по теории стержней переменного сечения (ТСПС) с начальной закруткой и с помощью метода конечных элементов (МКЭ). Исследован интервал наработки от 2400 до 10 500 ч.; общее количество испытанных образцов 145. Выполнен статистический анализ результатов испытаний с определением параметров эмпирических распределений величины $\lg \tau_p$, где τ_p — жаропрочность материала образцов из рабочих лопаток турбин в часах. Установлен закон эмпирических распределений в каждом интервале наработки, выполнена проверка однородности дисперсий S^2 и средних значений $\bar{\tau}_p$. Построены графики эмпирических распределений на нормальной вероятностной бумаге. Оценено влияние наработки на величину долговечности $\lg \tau_p$, построена аналитическая зависимость $\lg \tau_p = f(\tau_{\text{Э}})$, где $\tau_{\text{Э}}$ — эксплуатационная наработка в часах.

Ключевые слова: прочность, долговечность, лопатки, турбина, жаропрочный сплав, статистический метод.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Цитирование: Великанова Н. П., Великанов П. Г. Изменение жаропрочности материала рабочих лопаток турбины с учетом влияния эксплуатационной наработки // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. 2023. Т. 20, № 2. С. 42–48. EDN: OLUVIC. DOI: 10.31429/vestnik-20-2-42-48

Поступила 25 ноября 2022 г. После доработки 02 марта 2023 г. Принято 10 апреля 2023 г. Публикация 30 июня 2023 г.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. Вклад каждого соавтора в процесс написания статьи на разных этапах ее создания: идея работы, вычисления и расчеты, написание статьи, внесение правок и утверждение окончательного варианта (Великанова Н.П., Великанов П.Г.).

© Автор(ы), 2023. Статья открытого доступа, распространяется по лицензии [Creative Commons Attribution 4.0 \(CC BY\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Changing the Heat Resistance of the Turbine Blades Material with Taking Into Account the Influence of Operational Life

N. P. Velikanova¹, P. G. Velikanov^{1,2}✉

¹ Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI, 10, K. Marx st., Kazan, 420111, Russia

² Kazan (Volga Region) Federal University, 18, Kremlevskaya st., Kazan, 420008, Russia

✉ Peter G. Velikanov; ORCID 0000-0003-0845-2880; e-mail: pvelikanov@mail.ru

Abstract. The article examines the effect of long-term operational life of a gas turbine engine (GTE) for civil aviation on the durability (heat resistance) of the turbine working blades (WB) material – a foundry heat-resistant alloy ZhS6U-VI on a nickel-based equiaxial structure. The calculation of the static strength of the WB was carried out according to the theory of variable cross-section rods with an initial twist and using the finite element method. The operating time interval from 2400 to 10,500 hours was investigated; the total number of tested samples was 145. A statistical analysis of the test results was performed with the determination of the parameters of the empirical distributions of the value $\lg \tau_p$, where τ_p is the heat resistance of the material of the samples from the turbine WB in hours. The law of empirical distributions in each operating time interval is established, the homogeneity of variances S^2 and averages $\bar{\tau}_p$ is checked. Graphs of empirical distributions on normal probabilistic paper are constructed. The influence of operating time on the value of durability $\lg \tau_p$ is estimated, an analytical dependence $\lg \tau_p = f(\tau_{\text{Э}})$ is constructed, where $\tau_{\text{Э}}$ is the operational time in hours.

Keywords: strength, durability, blades, turbine, heat-resistant alloy, statistical method.

Funding. The study did not have sponsorship.

Cite as: Velikanova, N. P., Velikanov, P. G., Changing the heat resistance of the turbine blades material with taking into account the influence of operational life. *Ecological Bulletin of Research Centers of the Black Sea Economic Cooperation*, 2023, vol. 20, no. 2, pp. 42–48. DOI: 10.31429/vestnik-20-2-42-48

Received 25 November 2022. Revised 02 March 2023. Accepted 10 April 2023. Published 30 June 2023.

The author(s) declare no competing interests. The contribution of each co-author to the process of writing an article at different stages of its creation: the idea of the work, calculations and calculations, writing the article, making edits and approving the final version (N.P. Velikanova, P.G. Velikanov).

© The Author(s), 2023. The article is open access, distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 \(CC BY\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) license.

Введение

В предложенной вашему вниманию статье исследуется изменение жаропрочности материала рабочих лопаток (РЛ) турбины (во многом определяющих получение высоких рабочих параметров и ресурса двигателей; их разрушение как в полете, так и на газоперекачивающих станциях, приводит, как правило, к значительным разрушениям внутри силовой установки, поэтому проблема точного прогнозирования долговечности (жаропрочности) РЛ турбины, сводящего к минимуму вероятность разрушения, всегда была и остается актуальной на всех стадиях создания, доводки и эксплуатации двигателей) с учетом влияния эксплуатационной наработки.

Исходный уровень долговечности оценивался по результатам испытаний образцов, вырезанных из холодной зоны лопаток, в которой структура металла не претерпевает изменений. Уровень долговечности сплавов ЖС6У-ВИ после наработки в эксплуатации оценивался по результатам испытаний образцов, вырезанных из горячей зоны пера лопатки, где особенно сказывается влияние наработки.

Испытания образцов проводились в соответствии с ГОСТ 10145-81 «Металлы. Метод испытания на длительную прочность». В качестве температурного уровня использовалась температура $T = 1248$ К, близкая к расчетной температуре, которая имеет место в наиболее опасном сечении. В качестве уровня действующих напряжений использовался уровень в 230 МПа кг/мм² для сплава ЖС6У-ВИ. Испытание проводилось до разрушения образца.

В результате испытаний получились наборы экспериментальных данных времени до разрушения τ_p , которые были подвергнуты статистической обработке согласно рекомендациям [1]. Статистический анализ включал в себя установление закона распределения, проверку принадлежности выборок к одной генеральной совокупности и др.

1. Постановка и решение задач

РЛ первой ступени турбины высокого давления (ВД) являются наиболее нагруженными для авиационного двигателя НК-86 (авиационный турбореактивный двухконтурный двигатель (ТРДД), разработанный на СНТК им. Н.Д. Кузнецова для широкофюзеляжного пассажирского самолёта Ил-86), т.к. они работают в условиях максимальной частоты вращения ротора и при максимальной температуре.

Материал РЛ первой ступени турбины ВД (рис. 1) – литейный жаропрочный сплав ЖС6У-ВИ равноосной структуры.

Расчет статической прочности РЛ проведен по теории стержней переменного сечения (ТСПС) [2] с начальной закруткой и с помощью метода конечных элементов (МКЭ) [3]. Для расчётов выбран режим с минимальными запасами прочности.

Результаты расчета статической прочности РЛ (по ТСПС) первой ступени турбины ВД приведены в табл. 1 (σ_{Σ} – суммарное напряжение в опасном сечении РЛ (в сечении с минимальным запасом прочности по местным напряжениям), МПа; t_{Σ} – температура в опасном сечении РЛ, °С; $\sigma_{дл}$ – предел длительной прочности материала в опасном сечении РЛ, МПа; $K_{M \min}$ – минимальный коэффициент запаса прочности по местным напряжениям в опасном сечении РЛ).

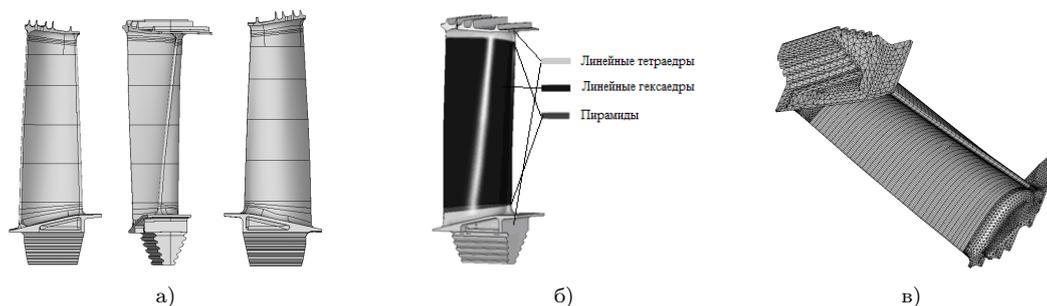


Рис. 1. а) геометрические модели РЛ; б) используемые типы изопараметрических КЭ; в) КЭ-ая модель РЛ

Fig. 1. а) geometric models of radar; б) used types of isoparametric finite elements; в) finite element model of rotor blades

Таблица 1. Результаты расчета статической прочности РЛ (по ТСПС)

Table 1. The results of calculating the static strength of rotor blades (according to the theory of rods of variable sections)

Радиус сечения РЛ R, м	Суммарные напряжения σ_{Σ} , МПа	Температура $t_{л}$, °С	Предел длительной прочности, $\sigma_{дл}$, МПа	$K_{M \min}$
0,470	166	962,5	254	1,53

Результаты расчета (с помощью МКЭ) статической прочности РЛ двигателя НК-86, выполненные в программе Ansys (конечно-элементная модель РЛ учитывает взаимодействие РЛ по контактным граням антивибрационных бандажных полок (взаимодействие РЛ по антивибрационной бандажной полке моделировалось с помощью контактных конечных элементов); РЛ была закреплена абсолютно жестко по верхним поверхностям всех пяти зубьев хвостовика; к конечно-элементной модели РЛ было приложено распределение температурного поля, определенного по результатам термометрирования на натурном двигателе, газовых нагрузок (окружных и осевых), действующих по профильной части РЛ, а также силы, действующей на антивибрационную бандажную полку, и частоты вращения ротора турбины), приведены на рис. 1–2.

Анализ расчетов РЛ двумя методами показал, что качественный характер распределения напряжений вдоль каждого сечения (на входной и выходной кромках, на спинке) и радиуса РЛ одинаков. Количественно суммарные напряжения, определенные с помощью МКЭ, в среднем на 7,6 % выше напряжений, полученных по ТСПС.

Различие в результатах расчета объясняется более полным учетом действующих контактных нагрузок и сложностью геометрической модели в МКЭ, которая реализуется, например, в Ansys, в сравнении с ТСПС.

Результаты испытаний долговечности материала рабочих лопаток (ЖС6У-ВИ) были подвергнуты статистической обработке с целью определения влияния наработки на закон и числовые характеристики распределения долговечности. Исходный уровень долговечности сплава ЖС6У-ВИ оценивался по результатам испытаний образцов, вырезанных из холодной зоны РЛ (хвостовика; диаметр вырезанных образцов не более 5 мм), в которой структура металла не претерпевает изменений. Уровень долговечности сплава ЖС6У-ВИ после наработки в эксплуатации оценивался по результатам испытаний образцов, вырезанных из горячей зоны профильной части РЛ (входная кромка среднего сечения; диаметр вырезанных образцов не более 3 мм), где особенно сказывается влияние наработки. Для проверки вида закона распределения долговечности после наработки использовался графический метод и критерий Шапиро–Уилка [4], предназначенный для проверки гипотезы о нормальном или логарифми-

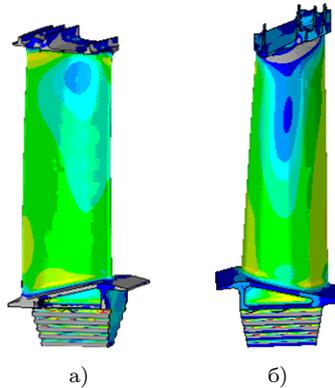


Рис. 2. Интенсивность напряжений по критерию прочности Мизеса–Губера–Генки: а) со стороны корытца РЛ; б) со стороны спинки РЛ

Fig. 2. Stress intensity according to the Mises–Huber–Genka strength criterion: a) from the side of the trough of the working blade; б) from the side of the back of the working blade

чески нормальном распределении при ограниченном объеме выборки ($n < 50$); он является более мощным, чем другие критерии [1].

Для вычисления статистики критерия $W_{\text{расч}} = b^2/S^2$, где $W_{\text{расч}}$ — расчетное значение статистики, $W_{\text{расч}} = b^2/S^2$ определяют величины (S , b — параметры статистики):

$$S^2 = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_i)^2,$$

где x_i — i -ое значение изучаемой величины, а \bar{x}_i — выборочное среднее, и

$$b = \sum_{i=1}^k a_{n-i+1} (x_{n-i+1} - x_i).$$

Гипотезу проверяют на основании неравенства $W_{\text{расч}} \geq W_{\alpha}$, где W_{α} — критическое значение статистики по критерию Шапиро–Уилка; α — уровень значимости. Если выполняется неравенство, то нулевую гипотезу не отвергают.

Графики, построенные на нормальной вероятностной бумаге, достаточно хорошо аппроксимируются прямыми линиями, что свидетельствует о том, что закон распределения долговечности в часах τ_p может являться логарифмически нормальным.

Проверка соответствия опытных данных логарифмически нормальному закону распределения по критерию Шапиро–Уилка показала, что закон распределения рассматриваемых характеристик после наработки является логарифмически нормальным при уровне значимости $\alpha = 0,05$. Согласно [1], уровень значимости α — это вероятность совершить ошибку первого рода, которая заключается в отбрасывании нулевой гипотезы в то время, когда на самом деле она верна.

В качестве иллюстрации результатов проведенного статистического исследования влияния наработки на долговечность сплава ЖС6У-ВИ (рис. 3–6) показаны графики эмпирических распределений величины $\lg \tau_p$, в табл. 2 даны результаты проверки нормальности распределений величины $\lg \tau_p$ по критерию Шапиро–Уилка.

В табл. 2 приведены следующие обозначения: K — параметр, определяющийся по количеству образцов; H_0 — проверка гипотезы о нормальности распределения.

Таким образом, наработка двигателей не оказывает влияния на закон распределения долговечности, который является логарифмически нормальным.

Также необходимо проверить, принадлежат ли выборки к одной генеральной совокупности. Для проверки равенства дисперсий ряда совокупностей при неодинаковом числе образцов в отдельных выборках использовался параметрический критерий Бартлетта [1].

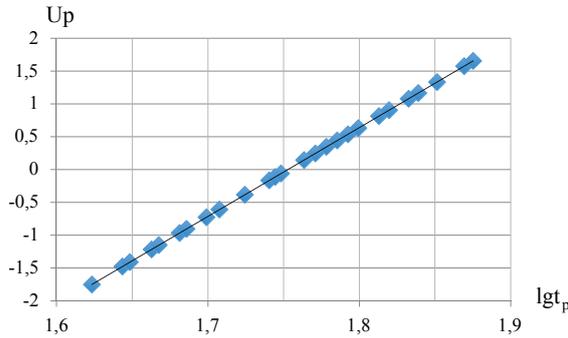


Рис. 3. График эмпирического распределения десятичного логарифма исходной долговечности τ_p сплава ЖС6У-ВИ

Fig. 3. Graph of the empirical distribution of the decimal logarithm of the initial durability τ_p of the ZhS6U-VI alloy

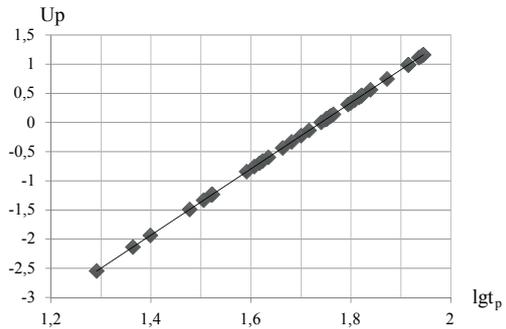


Рис. 4. График эмпирического распределения десятичного логарифма долговечности τ_p сплава ЖС6У-ВИ после эксплуатационной наработки в пределах от 2400 до 5000 ч.

Fig. 4. Graph of the empirical distribution of the decimal logarithm of the durability τ_p of the ZhS6U-VI alloy after operational life in the range from 2400 to 5000 hours

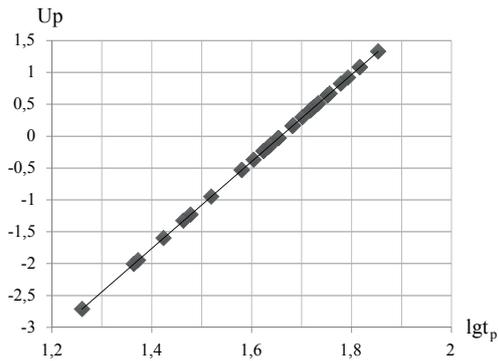


Рис. 5. График эмпирического распределения десятичного логарифма долговечности τ_p сплава ЖС6У-ВИ после эксплуатационной наработки в пределах от 5000 до 8500 ч.

Fig. 5. Graph of the empirical distribution of the decimal logarithm of the durability τ_p of the ZhS6U-VI alloy after operational life in the range from 5000 to 8500 hours

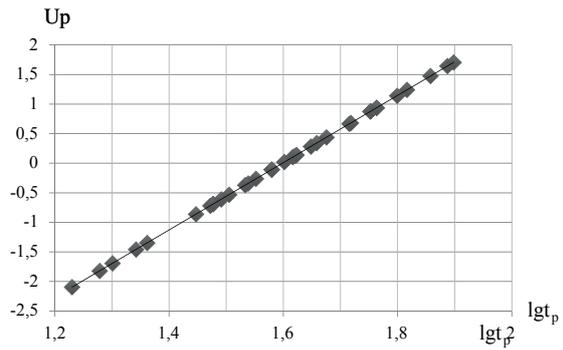


Рис. 6. График эмпирического распределения десятичного логарифма долговечности τ_p сплава ЖС6У-ВИ после эксплуатационной наработки в пределах от 8500 до 10 500 ч.

Fig. 6. Graph of the empirical distribution of the decimal logarithm of the durability τ_p of the ZhS6U-VI alloy after operational life in the range from 8500 to 10,500 hours

Таблица 2. Проверка нормальности распределения логарифма долговечности в исходном состоянии и после эксплуатационной наработки сплава ЖС6У-ВИ

Table 2. Checking the normality of the distribution of the logarithm of durability in the initial state and after the operational life of the ZhS6U-VI alloy

Наработка, ч.	Количество образцов	K	b^2	S^2	$W_{\text{расч}}$	W_{α}	H_0
0	26	13	0,131	0,136	0,963	0,920	+
2400–5000	48	24	1,439	1,460	0,985	0,947	+
5000–8500	37	18	0,728	0,774	0,940	0,936	+
8500–10 500	34	17	0,991	1,019	0,972	0,933	+

Таблица 3. Проверка однородности дисперсий логарифмов долговечности сплава ЖС6У-ВИ по критерию Бартрета

Table 3. Verification of the uniformity of the dispersions of the logarithms of the durability of the ZhS6U-VI alloy by the Bartret criterion

Параметр	Наработка, ч.	Количество образцов	$\chi^2_{\text{расч}}$	$\chi^2_{0,05}$	H_0
$\lg \tau_{pTi}$	0	26	5,87	5,99	+
	2400–5000	48			
	5000–8500	37			
	8500–10 500	34			

Таблица 4. Проверка однородности средних значений логарифмов долговечности сплава ЖС6У-ВИ

Table 4. Checking the homogeneity of the average logarithms values of the durability of the ZhS6U-VI alloy

Параметр	Число степеней свободы		S_1^2	S_2^2	$F_{\text{расч}} = S_1^2/S_2^2$	$F_{0,95}$	H_0	$F_{0,99}$	H_0
	K_1	K_2							
$\lg \tau_p$	3	144	0,2685	0,0138	19,46	2,68	–	3,94	–

Проверка проводилась при уровне значимости $\alpha = 0,05$. Результаты проверки однородности дисперсий логарифмов долговечности при различных уровнях наработки приведены в табл. 3.

В табл. 3 приведены следующие обозначения: $\chi^2_{\text{расч}}$ – расчетная статистика по критерию Бартрета; $\chi^2_{0,05}$ – расчетная статистика по критерию Бартрета при уровне значимости $\alpha = 0,05$; H_0 – проверка гипотезы об однородности дисперсий.

Как видно из приведенных результатов проверки, в данном случае выполняется условие

$$\chi^2_{\text{расч}} < \chi^2_{\alpha}.$$

Значит, гипотеза о том, что все m генеральных совокупностей долговечностей после наработки для сплава ЖС6У-ВИ имеют равные дисперсии, не отвергается. Проверка по критерию Бартрета показала, что для сплава ЖС6У-ВИ рабочих лопаток первой ступени двигателя НК-86 имеет место однородность дисперсий логарифмов $\lg \tau_{pT}$.

На основе результатов проверки однородности дисперсий рассматриваемой величины проводился анализ однородности средних значений этой величины путем использования процедуры однофакторного дисперсионного анализа.

В табл. 4 представлены результаты однофакторного дисперсионного анализа. Проверка нулевой гипотезы о равенстве средних значений долговечности выполнена с помощью F-критерия [5].

В табл. 4 приведены следующие обозначения: S_1, S_2 – параметры F-критерия; $F_{\text{расч}}$ – расчетная статистика F-критерия; $F_{0,95}$ – расчетная статистика F-критерия при доверительной вероятности $P_d = 0,95$; H_0 – проверка гипотезы об однородности средних значений; $F_{0,99}$ – расчетная статистика F-критерия при доверительной вероятности $P_d = 0,99$.

Из табл. 4 следует, что для всех исследуемых величин гипотеза об однородности средних значений логарифмов долговечностей для выборок во всех случаях отвергается. Значит, эксплуатационная наработка рабочих лопаток двигателя НК-86 из сплава ЖС6У-ВИ оказывает значимое влияние на среднее значение долговечности исследуемого сплава.

На рис. 7 приведен график изменения средних значений долговечности сплава ЖС6У-ВИ в зависимости от наработки.

Из приведенных на рис. 7 данных следует, что в интервале эксплуатационной наработки до 10 500 ч. жаропрочность материала $\bar{\tau}_p$ рабочих лопаток турбин сплава ЖС6У-ВИ снижается на 26 %.

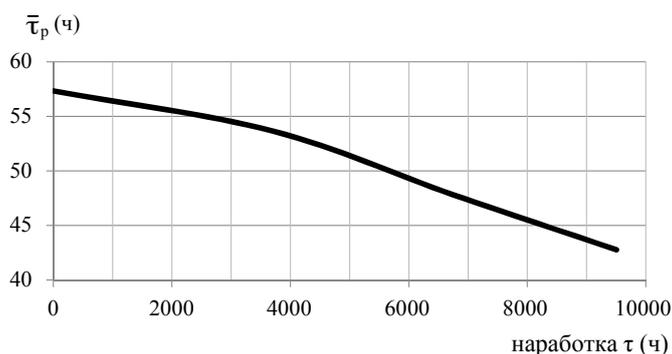


Рис. 7. Графики изменения средних значений долговечности сплава ЖС6У-ВИ при различных уровнях наработки

Fig. 7. Graphs of changes in the average values of the durability of the alloy ZhS6U-VI at different levels of operating time

Заключение

В статье был выполнен расчет статической прочности наиболее нагруженных РЛ, изготовленных из жаропрочного сплава ЖС6У-ВИ на никелевой основе равноосной структуры, первой ступени турбины ВД по ТСПС с начальной закруткой и с помощью МКЭ.

В статье также было показано, что:

1. Нарботка в эксплуатации не оказывает влияния на закон распределения долговечности (жаропрочности);
2. Эксплуатационная наработка не оказывает влияния на характеристики рассеяния — среднее квадратическое отклонение величины долговечности не изменяется в зависимости от наработки;
3. Эксплуатационная наработка оказывает влияние на среднее значение долговечности. При увеличении наработки до 10500 часов долговечность сплава снижается на 26 %.

Литература [References]

1. Степнов, М.Н., *Статистические методы обработки результатов механических испытаний*: Справочник. Машиностроение, Москва 1985. [Stepnov, M.N., *Statisticheskie metody obrabotki rezul'tatov mekhanicheskikh ispytaniy = Statistical methods of processing the results of mechanical tests*. Mechanical Engineering, Moscow, 1985. (in Russian)]
2. Великанова, Н.П., Закиев, Ф.К., Великанов, П.Г., *Расчет на прочность основных деталей газотурбинных двигателей*: Учебное пособие. Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, Казань, 2011. [Velikanova, N.P., Zakiev, F.K., Velikanov, P.G., *Raschet na prochnost' osnovnykh detaley gazoturbinnnykh dvigateley = Calculation of the strength of the main parts of gas turbine engines*. Publishing house of Kazan State Technical University, Kazan, 2011. (in Russian)]
3. Бондарчук, П.В., Фалалеев, С.В., *Прочностное проектирование лопаток и дисков ГТД в конечно-элементном комплексе ANSYS*. Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, Самара, 2006. [Bondarchuk, P.V., Falaleev, S.V., *Prochnostnoe proektirovanie lopatok i diskov GTD v konechno-elementnom komplekse ANSYS = Strength design of turbine engine blades and disks in the ANSYS finite element complex*. Publishing House of the Samara State Aerospace University, Samara, 2006. (in Russian)]
4. Хан, Г., Шапиро, С., *Статистические модели в инженерных задачах*. Мир, Москва, 1969. [Khan, G., Shapiro, S., *Statisticheskie modeli v inzhenernykh zadachakh = Statistical models in engineering problems*. Mir, Moscow, 1969. (in Russian)]
5. Мюллер, П., Нойман, П., Шторм, Р., *Таблицы по математической статистике*. Финансы и статистика, Москва, 1982. [Muller, P., Neuman, P., Storm, R., *Tablitsy po matematicheskoy statistike = Tables on mathematical statistics* Finance and Statistics, Moscow, 1982. (in Russian)]