Вестник Азербайджанской Инженерной Академии $g - 2019.- Т.11.- №2 - С.24-32.

УДК 621-192; 621.81-192

АНАЛИЗ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ НАДЕЖНОСТИ И ДОЛГОВЕЧНОСТИ МАШИН И ОБОРУДОВАНИЙ, РАБОТАЮЩИХ В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ

А.М. ГАФАРОВ*, П.Г. СУЛЕЙМАНОВ*, Ф.М. КАЛБИЕВ**, В.А. ГАФАРОВ***

Одним из основных методов оценки надежности и долговечности машин и оборудований, работающих в экстремальных условиях, являются математические методы. В статье рассматриваются вопросы, связанные с применением различных способов математической статистики при определении надежности машин и механизмов. Анализируются полученные закономерности.

Ключевые слова: *оборудование, надежность, экстремальные условия, долговечность, статистика, случайная величина.*

Введение. По результатам многочисленных исследований, показатели надежности и долговечности оборудования во многих случаях являются случайными величинами [1-4]. Для получения достаточной информации о случайных величинах иногда можно применять не функции распределения, а их количественные характеристики. При оценке параметров случайных величин наиболее приемлемыми их характеристиками являются: математическое ожидание, дисперсия, моменты, мода, медиана и коэффициент вариации [3-5].

Целью работы является использование различных математических методов статистики при оценке надежности и долговечности машин и оборудований, эксплуатируемых в экстремальных условиях.

Постановка и решение задачи. Для случайных величин применяются различные виды и интерпретации математических ожиданий:

– для случайных величин, имеющих скачкообразный дискретный характер, таких, например, как волнистость поверхности, можно использовать следующее описание математического ожидания:

$$M_x = x_{\text{ср}} = \sum_i x_i P(x_i) \quad ; \tag{1}$$

* Академия МЧС Азербайджанской Республики
** Азербайджанская Государственная Морская Академия
*** Государственная Нефтяная Компания Азербайджана (ГНКР)

– для шероховатости поверхности, имеющей непрерывный случайный характер:

$$M_x = \int_{-\infty}^{+\infty} xf(x)dx = \int_{-\infty}^{+\infty} xdF(x); \quad (2)$$

– для некоторых погрешностей формы деталей, имеющих положительный непрерывный характер:

$$M_x = \int_0^{\infty} [1 - F(x)]dx = \int_0^{\infty} P(x)dx. \quad (3)$$

Принимая во внимание то, что математическое ожидание можно характеризовать как начальный момент распределения $F(x)$, можно записать:

$$M_n(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} x^n dF(x). \quad (4)$$

Дисперсия с учетом математического ожидания записывается зависимостью:

$$D(x) = M[x - M(x)]^2 = M(x^2) - M^2(x). \quad (5)$$

Для показателей качества поверхности деталей, являющихся непрерывными случайными величинами, дисперсии описываются как:

$$D(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} [x - M(x)]^2 dF(x) \ . \quad (6)$$

Разброс результатов измерения можно характеризовать средним квадратическим отклонением σ_x

$$\sigma_x = \left|\sqrt{D(x)}\right| \ . \quad (7)$$

Коэффициент вариации определяется зависимостью

$$V_x = \frac{\sigma_x}{M(x)}. \quad (8)$$

Нормированная величина $\overline{x}$ записывается выражением

$$\overline{x} = \frac{x}{\sigma_x} \quad (9)$$

Параметры точности и качества поверхности, имеющие характер дискретности, часто анализируются с применением биномиального и Пуассоновского распределений [5–7].

Биномиальное распределение записывается зависимостью:

$$P(x) = \frac{n!}{x!(n-x)!} P^x (1-P)^{n-x} = C_n^x P^x (1-P)^{n-x}, \quad x = 0,1,\dots,n \quad (10)$$

и при необходимости задается функцией $F(x)$:

$$F(x) = \sum_{i=0}^{x} P(i) = \sum_{i=0}^{x} \frac{i!}{i!(n-i)!} P^i \,(1-P)^{n-i} = \sum_{i=0}^{x} C_n^i P^i (1-P)^{n-i} \ . \quad (11)$$

При проведении экспериментов: P– вероятность испытания; $P(x)$ – вероятность x успешных испытаний; C_n^x – биномиальные коэффициенты.

Характеристики биномиального распределения характеризуются как

$$M(x) = nP; \ \ D(x) = nP(1-P); \ \ \ V = \sqrt{\frac{1-P}{nP}} \ . \quad (12)$$

Распределение Пуассона описывается выражением

$$P(x) = \frac{\lambda x}{x!} \exp(-\lambda)\,, \qquad x = 0,1,2, \dots \ . \quad (13)$$

Для распределения Пуассона интегральная функция записывается как

$$F(x) = \sum_{i=1}^{x} \frac{\lambda^i}{i!} \exp(-\lambda), \qquad \text{где } \lambda = np. \tag{14}$$

Основные характеристики распределения Пуассона выражаются формулами:

$$M(x) = D(x) = \lambda, \quad \mathrm{V} = \frac{1}{\sqrt{\lambda}}. \tag{15}$$

Распределение Пуассона можно применять при оценке надежности машин и оборудований, для которых свойственны постоянные интенсивные отказы.

При исследовании надежности машин и механизмов, работающих в чрезвычайных ситуациях и экстремальных условиях, распределение случайных величин может быть проанализировано с использованием отрицательного биномиального распределения (распределение Паскаля) [3]

$$P(x) = C_{R+x-1}^{i} \quad P^R(1-P)^x, \qquad x = 0,1,\dots,R. \tag{16}$$

Функция распределения Паскаля записывается выражением

$$F(x) = \sum_{i=0}^{x} C_{R+i-1}^{\,i} \ P^R(1-P)^i \ . \tag{17}$$

Распределение Паскаля характеризуется зависимостями:

$$M(x) = \frac{R(1-P)}{P}, \quad D(x) = \frac{R(1-P)}{P^2}, \qquad U = \frac{1}{\sqrt{R(1-P)}}. \tag{18}$$

Распределение Паскаля характеризует число «отрицательных» результатов предшествующему числу «положительных» результатов при проведении экспериментов по схеме Бернулли. Оно часто применяется при планировании исправных изделий при известном браке. Может быть также использовано при определении надежности машин и оборудований при известном их отказе.

При оценке надежности машин и механизмов, эксплуатируемых в чрезвычайных ситуациях и экстремальных условиях, можно использовать метод равномерного распределения. В теории надежности равномерное распределение может характеризовать параметры элементов, систем, нагрузку и др. При этом указанные показатели принимают любое значение в известном интервале a , b [2], [8], [9]:

$$F(x) = \frac{x-a}{b-a}, \qquad f(x) = \frac{1}{b-a}, a \le x \le b\ . \tag{19}$$

Основными характеристиками равномерного распределения являются:

$$M(x) = \frac{a+b}{2}, \ D(x) = \frac{(b-a)^2}{12}, \qquad V_x = \frac{2(b-a)}{\sqrt{3}(a+b)}. \tag{20}$$

Для определения характеристики наработки машин и оборудований, эксплуатируемых в чрезвычайных ситуациях и экстремальных условиях, при их отказе, постоянной интенсивности отказов $\lambda = const$ и наработки $t = \frac{1}{\lambda}$ можно использовать экспоненциальное распределение, которое характеризуется зависимостями:

$$F(x) = 1 - \exp(-\lambda x)\,, \ f(x) = \lambda \exp(-\lambda x)\,, \quad x \ge 0 \tag{21}$$

Экспоненциальное распределение характеризуется следующими показателями:

$$M(x) = \frac{1}{\lambda}, \quad D(x) = \frac{1}{\lambda^2} \ , \qquad \mathrm{V} = 1. \tag{22}$$

Для описания износовых отказов или когда износ является следствием большого числа различных причин, часто используется нормальное распределение (распределение Гаусса). Часто нормальное распределение считается предельным для других видов распределений.

Нормальное распределение описывается следующими зависимостями:

$$F(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{x} exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right] dx, \;\; f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right]. \qquad (23)$$

Основными характеристиками нормального распределения являются $M(x) = \mu$, $D(x) = \sigma^2$, $V = \frac{\sigma}{\mu}$ где $-\infty < \mu < +\infty$ и $\sigma > 0$ – параметры сдвига и масштаба.

Иногда, при необходимости, нормальное распределение можно представить функцией Лапласа $\Phi(z)$

$$\Phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^z exp\left(-\frac{z^2}{2}\right) dz \;, \; \varphi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \; exp\left(-\frac{z^2}{2}\right) \qquad (24)$$

Если при измерениях параметры характеризуются только положительными значениями, тогда получается усеченное нормальное распределение и вносятся уточнения в расчеты. Плотность вероятности характеризуется как нормальное распределение, но с коэффициентом пропорциональности С.

$$f(x) = \frac{C}{\sigma\sqrt{2\pi}} exp\left[-\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma^2}\right]. \qquad (25)$$

C – определяется из условия, ограниченного пределами изменения.

Для определения коэффициента C следует применять таблицы функции Лапласа или квантилей нормального распределения.

При $0 \le x \le \infty$ характеристики усеченного распределения имеют форму:

$$\bar{M}(x) = M(x) + R\sigma, \quad \bar{D}(x) = \bar{\sigma}^2 = \sigma^2\left[1 - R^2 - R\frac{M(x)}{\sigma}\right]. \qquad (26)$$

Интегральная функция для (25) записывается в виде

$$F(x) = C\left[\frac{1}{2} + \Phi\left(\frac{x-x_0}{\sigma}\right)\right]. \qquad (27)$$

Если это случайные величины, логарифм которых расположен по закону Гаусса, их можно характеризовать логарифмическими нормальными распределениями:

$$F(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_0^x \frac{1}{x} exp\left[-\frac{(lnx-\mu^2)}{2\sigma^2}\right] dx,$$

$$f(x) = \frac{1}{\sigma x\sqrt{2\pi}} exp\left[-\frac{(lnx-\mu)^2}{2\sigma^2}\right] dx, \quad x > 0 \qquad (28)$$

Основные характеристики логарифмических распределений имеют некоторые особенности и описываются формулами:

$$M(x) = exp\left(\mu + \frac{\sigma^2}{2}\right), \quad D(x) = \exp(2\mu + \sigma^2)\,[\exp(\sigma^2) - 1],$$

$$V = \sqrt{\exp(\sigma^2)} - 1 \qquad (29)$$

Для объяснения причин отказов с монотонной интенсивностью применяется распределение Вейбулла, которое описывается зависимостями

$$F(x) = 1 - exp\left[-\left(\frac{x}{a}\right)^b\right], f(x) = \frac{b}{a}\left(\frac{x}{a}\right)^{b-1} exp\left[-\left(\frac{x}{a}\right)^b\right], \; x \ge 0 \qquad (30)$$

При распределении Вейбулла изменение параметров формы приводит к изменению характера графиков распределения. Такая закономерность может обеспечить совпадение экспериментальных данных с теоретическими описаниями.

Характерные показатели распределения Вейбулла описываются следующими выражениями:

$$M(x) = aK,\ D(x) = a^2(C - K^2),\ V = \sqrt{\frac{C}{K^2} - 1}. \quad (31)$$

В распределении Вейбулла можно увидеть частные случаи экспоненциального распределения (при $b = 1$), распределение Рэлея ($b = 2$) и близость к нормальному распределению (при $b \geq 3{,}5$).

Для записи распределения Вейбулла иногда применяется форма, отличающаяся от формулы (30)

$$F(x) = 1 - \exp(-\lambda x^{\alpha}),\ f(x) = \alpha\lambda x^{\alpha-1} exp(-\lambda x^{\alpha}). \quad (32)$$

где $\alpha = b,\ \lambda = \left(\frac{1}{\alpha}\right)^b$.

$$F(x) = \frac{1}{a\Gamma(b+1)} \int_0^{\infty} \left(\frac{x}{a}\right)^b \exp\left(-\frac{x}{a}\right) dx,\ f(x) = \frac{1}{a\Gamma(b+1)} \left(\frac{x}{a}\right)^b exp\left(-\frac{x}{a}\right). \quad (33)$$

$a > 0$ и $b \geq -1$ в гамма-распределении являются параметрами масштаба и формы.

Показателями гамма-распределения являются:

$$M(x) = a(b+1),\quad D(x) = a^2(b+1),\ V = \frac{1}{\sqrt{b+1}}. \quad (34)$$

Если результаты измерения имеют одинаковые экспоненциальные распределения, тогда их сумма будет характеризовать гамма-распределение. Это дает возможность применять ее для описания машин и механизмов с резервированием деталей или узлов с дальнейшим замещением.

При анализе надежности машин и механизмов иногда возникают ситуации, при которых случайная величина является сочетанием более двух величин.

Тогда функции $f_1(x_1), f_2(x_2), \dots, f_n(x_n)$ являются функциями плотности вероятности разных случайных величин и сумма вероятностей этих величин P_i будет равна единице.

$$f(x) = P_1 f_1(x_1) + P_2 f_2(x_2) + \cdots + P_n f_n(x_n) = \sum_{i=1}^{n} P_i f_i(x_i) \quad (35)$$

является плотностью сочетаний распределений.

Тогда интегральная функция будет иметь форму

$$F(x) = P_1 F_1(x_1) + P_2 F_2(x_2) + \cdots + P_n F_n(x_n) = \sum_{i=1}^{n} P_i F_i(x_i). \quad (36)$$

$F_i(x_i)$ – интегральные функции распределений плотности $f_i(x_i)$. Тогда, согласно формулы (35), математическое ожидание сочетания распределений запишется в виде

$$M(x) = P_1 M_1(x_1) + P_2 M_2(x_2) + \cdots + P_n M_n(x_n) = \sum_{i=1}^{n} P_i M_i(x_i) \quad (37)$$

При оценке надежности машин и механизмов часто применяется центральная предельная теорема, при которой случайные величины описываются нормальным законом

$$\lim_{n\to\infty} P\left\{a < \frac{x - n\mu}{\sigma\sqrt{n}} < b\right\} = \Phi(b) - \Phi(a). \quad (38)$$

где $n\mu$ - математическое ожидание, $n\sigma^2$ - дисперсия.

Известно [4], что если нагрузка и прочность распределены по закону Гауса, то запас прочности (их композиция) также будет распределяться по нормальному закону

$$f(L) = \frac{1}{\sigma_L\sqrt{2\pi}} exp\left[-\frac{(L - M(L))^2}{2\sigma_L^2}\right]. \tag{39}$$

Схожие формулы могут быть получены и для других законов распределения нагрузки и прочности [10 – 12].

При определении надежности с учетом минимальной стоимости можно использовать метод Лагранжа.

Для решения задачи методом Лагранжа целевая функция (лагранжиан) записывается в виде

$$L(R_i) = C(R_i) + y[Q(R_i) - Q_0], \tag{40}$$

где y – неопределенный множитель Лагранжа.

Решение задачи сводится к решению уравнений с неизвестными показателями $k_1, k_2, \dots, k_n, y$ [4]:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial L(k_i)}{\partial k_i} = \dfrac{\partial}{\partial k_i}\left[\sum_{i=1}^{n} k_i c_i + y\left(\sum_{i=1}^{n} q_i^{R_i} - Q_0\right)\right] = 0, \quad i = 1,2,\dots,n \\ \sum_{i=1}^{n} q_i^{R_i} = Q_0 \,. \end{cases} \tag{41}$$

После дифференцирования первых n уравнений

$$c_i + yq_i^{R_i} lnq_i = 0, \tag{42}$$

откуда

$$q_i^{R_i} = -\frac{c_i}{ylnq_i}. \tag{43}$$

После постановки выражения (43) в (41) определяется, что

$$-\frac{1}{y}\sum_{i=1}^{n}\frac{c_i}{lnq_i} = Q_0, \tag{44}$$

откуда

$$y = -\frac{1}{Q_0}\sum_{i=1}^{n}\frac{c_i}{lnq_i}. \tag{45}$$

Тогда уравнение (43) приобретает вид

$$q_i^{R_i} = \frac{c_i Q_0}{lnq_i \sum_{i=1}^{n}\frac{c_i}{lnq_i}}, \tag{46}$$

откуда

$$R_i = \frac{1}{lnq_i}\left[ln\left(-Q_0 \Big/ \sum_{i=1}^{n}\frac{c_i}{lnq_i}\right) + ln\left(-\frac{c_i}{lnq_i}\right)\right] = \frac{1}{lnq_i}[A + \ln(-h_i)], \tag{47}$$

где

$$h_i = \frac{c_i}{lnq_i}, P \approx 1 - \frac{1}{n!}(1 - p)^n. \tag{48}$$

Аналогично решается обратная задача оптимизации.

При обработке данных исследовательских испытаний используются экспериментальные данные, измеряемые параметры и их неизвестные значения. Наиболее точными данными являются точечные величины и математические ожидания, характеризующие несмещенность оценки.

Несмещенная оценка x^* является достоверной тогда, когда характеризует закон максимальных чисел, т.е.

$$\lim_{n\to\infty} P\{|x^* - x| < \varepsilon\} = 1, \tag{49}$$

ε – относительная точность исследованного параметра.

При выявлении точечных оценок часто применяют способ правдоподобия. При этом методе функция правдоподобия имеет наибольшую величину.

При расчете точечных оценок по результатам испытаний используются различные методы. Для точечной оценки при отказе объекта можно использовать экспоненциальный закон распределения

$$f(t) = \lambda \exp(-\lambda t), \tag{50}$$

t – значение наработки на отказ.

Для точечной оценки в данном случае принимается только λ, характеризующая интенсивность отказов.

При использовании закона Гаусса для точечной оценки основными параметрами являются показатели μ и σ.

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}\right). \tag{51}$$

При точечной оценке параметров с применением логарифмически нормального закона

$$f(t) = \frac{1}{\sigma t\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(lnt-\mu)^2}{2\sigma^2}\right]. \tag{52}$$

Оценки показателей вычисляются по формулам для нормального закона [13].

При точечной оценке параметров по определению Вейбулла их можно характеризовать зависимостью

$$f(t) = \frac{b}{a}\left(\frac{t}{a}\right)^{b-1} \exp\left[-\left(\frac{t}{a}\right)^{b}\right]. \tag{53}$$

Параметры a и b выбираются в зависимости от плана испытаний указанных в работах [14-16].

Расчет ресурса при полных, усеченных и многократных усеченных испытаниях определяется по методике, изложенной в работе [4].

Например, для ходовой части гусеничных машин и цилиндропоршневой группы двигателей тракторов в доремонтное время V=0,3, для механизмов трансмиссии и двигателей тракторов V=0,4, для узлов трансмиссии и тракторов в межремонтном периоде V=0,6, для подшипниковых узлов, валов зубчатых передач, работающих в закрытых агрегатах, V=0,4÷0,6 (при большой загрузке V≈0,4), для деталей, теряющих работоспособность в основном из-за внезапных отказов, V=0,8. Если при испытаниях не отказало не одно оборудование, тогда производится расчет нижней доверительной границы характеристик надежности [4].

Определение среднего числа отказов машин и механизмов за установленную наработку обычно рассчитывают как по отдельным машинам, так и по отдельным узлам.

Процедура испытаний предшествует их планированию, заключающемуся в определении показателей норматива и количества оборудований [15, 17].

Одним из способов, используемых для сокращения количество экспериментов, не снижающих качество проверенных изделий, является применение критерия Неймана-Пирсона. Сущность критерия заключается в сопоставление выборочной оценки R^* с приёмочным нормативом R_{np}. Учитывается предположение H_0 $(R_Ф \geq R_0)$ и предположение H_1 $(R_Ф \leq R_1)$.

Одним из применяемых способов контроля надежности является метод двухступенчатого контроля и другие методы. Партии с очень низким или высоким уровнем надежности можно определить и при меньшем количестве экспериментов. Для этого достаточно применить метод последовательного контроля надежности с использованием критерия Вальда [9, 10, 18].

Заключение. Все описанные выше математические методы применимы при оценке надежности и долговечности машин и оборудований, работающих в экстремальных условиях.

REFERENCES

1. **Gihman I.I., Skorohod A.V., Yadrenko M.I.** Teoriya veroyatnostej i matematicheskaya statistika. Kiev: Vyssh. shkola. 2008. 439 s.
   Гихман И.И., Скороход А.В., Ядренко М.И. Теория вероятностей и математическая статистика. Киев: Высш. школа. 2008. 439 с.
2. **Ivashev-Misatov O.S.** Teoriya veroyatnostej i matematicheskaya statistika. M.: Nauka, 1979. 256 s.
   Ивашев-Мисатов О.С. Теория вероятностей и математическая статистика. М.: Наука, 1979. 256 с.
3. **Nevzarov V.N., Sugak E.V.** Nadezhnost mashin i oborudovanij. 4.1. Krasnoyarsk: SGTU, 1998, 264 s.
   Невзаров В.Н., Сугак Е.В. Надежность машин и оборудований. 4.1. Красноярск: СГТУ, 1998, 264 с.
4. **Nechiperenko V.I.** Strukturnyj analiz i metody postroeniya nadezhnyh sistem. M.: Sov. Radio. 1968. 255 s.
   Нечиперенко В.И. Структурный анализ и методы построения надежных систем. М.: Сов. Радио. 1968. 255 с.
5. **Babaev S.G., Kershenbaum V.Y., Gabibov I.A.** Evoluciya kachestva tribosopryazhenij neftegazovoj tehniki. M.: NING, 2018.-516 s.
   Бабаев С.Г., Кершенбаум В.Я., Габибов И.А. Эволюция качества трибосопряжений нефтегазовой техники. М.: НИНГ, 2018.-516 с.
6. **Ventcel E.S., Ovgarov L.A.** Teoriya veroyatnostej. M.: Nauka. 1973. 260 s.
   Вентцель Е.С., Овгаров Л.А. Теория вероятностей. М.: Наука. 1973. 260 с.
7. **Ignatev V.A., Manshin G.G., Trajnev V.A.** Statisticheskaya optimizaciya kachestva funkcionirovaniya elektronnyh sistem. M.: Energiya. 1974, 264 s.
   Игнатев В.А., Маньшин Г.Г., Трайнев В.А. Статистическая оптимизация качества функционирования электронных систем. М.: Энергия. 1974, 264 с.
8. GOST 27.003-90. Nadezhnost v tehnike. Sostav i obshhie pravila zadaniya trebovanij po nadezhnosti.
   ГОСТ 27.003-90. Надежность в технике. Состав и общие правила задания требований по надежности.
9. **Suleymanov P.G.** Povyshenie nadezhnosti mashin i oborudovaniyj, ekspluatiruemyh v ekstremalnyh usloviyah. Baku: Nauka. 2018. 308 s.
   Сулейманов П.Г. Повышение надежности машин и оборудований, эксплуатируемых в экстремальных условиях. Баку: Наука. 2018. 308 с.
10. **Suleymanov P.G.** Povyshenie nadezhnosti mashin i oborudovanij, ekspluatiruemyh v ekstremalnyh usloviyah. Baku: Nauka. 2018. 308 s.
    Сулейманов П.Г. Повышение надежности машин и оборудований, эксплуатируемых в экстремальных условиях. Баку: Наука. 2018. 308 с.
11. **Gafarov A.M. i dr.** Vliyjanie ostatochnyh napryazhenij na iznos vtulok cepnyh zvezdochek brashpilej sudov razlichnogo naznacheniya // Vestnik Azerbaijanskoj Inzhenernoj Akademii. Baku. 2017. №1. S. 32-41.
    Гафаров А.М. и др. Влияние остаточных напряжений на износ втулок цепных звездочек брашпилей судов различного назначения // Вестник Азербайджанской Инженерной Академии. Баку. 2017. №1. С. 32-41.
12. **Gafarov A.M. i dr.** Issledovanie vlijaniya harakteristik poverhnostnogo sloya na iznos detalej, obrabotannyh razlichnymi metodami // Teoreticheskaya i prikladnaya mehanika. 2016. №4, s. 118-125.

Гафаров А.М. и др. Исследование влияния характеристик поверхностного слоя на износ деталей, обработанных различными методами // Теоретическая и прикладная механика. 2016. №4, с. 118-125.

13. **Gafarov A.M.** Tehnologicheskie sposoby povysheniyja iznosostojkosti detalej mashin. Baku: Nauka, 1998. 318 s.
Гафаров А.М. Технологические способы повышения износостойкости деталей машин. Баку: Наука, 1998. 318 с.
14. GOST 27.503-87. Nadezhnost v tehnike. Sistema sbora i obrabotki informacii. Metody ocenki pokazatelej nadezhnosti.
ГОСТ 27.503-87. Надежность в технике. Система сбора и обработки информации. Методы оценки показателей надежности.
15. Nadezhnost i effektivnost v tehnike: Spravochnik v 10 tomah. T, 2. 1987. 280 s.
Надежность и эффективность в технике: Справочник в 10 томах. Т, 2. 1987. 280 с.
16. **Gafarov A.M., Sulejmanov P.G., Gafarov V.A.** Prognozirovanie i statisticheskaya ocenka nadezhnosti mashin i oborudovanij, ekspluatiruemyh v ekstremalnyh usloviyah // Himicheskoe i neftegazovoe mashinostroenie. 2014. №11. S. 15-17.
Гафаров А.М., Сулейманов П.Г., Гафаров В.А. Прогнозирование и статистическая оценка надежности машин и оборудований, эксплуатируемых в экстремальных условиях // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2014. №11. С. 15-17.
17. Spravochnik po nadezhnosti. T.: Mir. 1969. 340 s.
Справочник по надежности. Т.: Мир. 1969. 340 с.
18. **Volkov L.I., Shishkevich A.M.** Nadezhnost letatelnyh apparatov. M.: Vyssh. shkola. 2015. 293 s.
Волков Л.И., Шишкевич А.М. Надежность летательных аппаратов. М.: Высш. школа. 2015. 293 с.

EKSTREMAL VƏZİYYƏTLƏRDƏ İŞLƏYƏN MAŞIN VƏ AVADANLIQLARIN ETİBARLILIĞININ VƏ UZUNÖMÜRLÜLÜYÜNÜN TƏDQİQİNDƏ RİYAZİ METODLARIN ANALİZİ

A.M. QAFAROV, P.H. SÜLEYMANOV, F.M. KƏLBİYEV, V.A. QAFAROV

Ekstremal vəziyyətlərdə işləyən maşın və avadanlıqların etibarlılığının və uzunömürlülüyünün qiymətləndirilməsi üçün əsas metodlardan biri riyazi metodlardır. Məqalədə, maşın və avadanlıqların etibarlılığının təyin edilməsi üçün müxtəlif riyazi statistika metodlarının tətbiqi ilə bağlı məsələlərə baxılır. Alınan qanunauyğunluqlar müzakirə edilir.

Açar sözlər: *maşınlar, avadanlıqlar, etibarlılıq, riyaziyyat, statistika, metodlar, təsadüfi kəmiyyətlər, funksiyalar.*

ANALYSIS OF MATHEMATICAL METHODS IN THE STUDY OF RELIABILTY AND DURABILTY OF MACHINES AND EQUIPMENT WORKING IN EXTREME CONDITION

A.M. GAFAROV, P.H. SULEYMANOV, F.M. KALBIYEV, V.A. GAFAROV

One of the main methods of evaluating the reliability and durability of machines and equipment working in extreme condition is the mathematical methods. The application of different mathematical statistics methods to determine the reliability of the machinery and equipment is considered in this article. Obtained consequences are discussed.

Keywords: *machines, equipment, reliability, mathematics, statistics, methods, random quantity, functions.*
