

Министерство образования Российской Федерации
Самарский государственный аэрокосмический
университет имени академика С.П. Королева

РАСЧЕТ БЕЗОТКАЗНОСТИ ИЗДЕЛИЙ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ

Методические указания

Самара 2003

Составитель *В.А. Кочуров*

УДК 629.7.017.1 – 192

Расчет безотказности изделий авиационной техники: Методические указания / Самар. гос. аэрокосм. ун-т; Сост. В.А. Кочуров. – Самара, 2003. – 32 с.

Даны примеры решения задач определения характеристик надежности изделий авиационной техники в условиях ограниченной статистической информации для различных планов наблюдений и справочные материалы, необходимые для расчетов.

Предназначены для студентов, обучающихся по специальности 13.03, и могут быть полезны студентам, обучающимся по другим специальностям, изучающим проблемы надежности технических устройств.

Выполнены на кафедре эксплуатации летательных аппаратов и двигателей.

Печатаются по решению редакционно-издательского совета Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королева.

Рецензент А.В. Суслин

СОДЕРЖАНИЕ

1. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ РАБОТЫ.....	4
2. МЕТОДИКА РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ.....	4
3. ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ.....	6
4. ВАРИАНТЫ ЗАДАЧ.....	14
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	16
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	17

1. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ РАБОТЫ

Целью настоящей работы является определение характеристик надежности элементов, узлов и агрегатов изделий авиационной техники (АТ) в условиях наличия недостаточной статистической информации, когда невозможно получить статистическое распределение наработки до отказа.

2. МЕТОДИКА РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Решение задач сводится к правильному применению уравнения для нахождения параметров законов распределения наработки до отказа (см. Приложение) и последующей оценке вероятности безотказной работы. Для этого необходимо:

- определить план наблюдения;
- выбрать теоретический закон распределения, физическая модель которого наиболее близка к характеру отказа;
- для выбранного закона распределения и плана наблюдения определить уравнения, необходимые для вычисления параметров закона распределения;
- вычислить величину вероятности безотказной работы при заданной наработке для выбранного закона распределения.

Определение плана наблюдения. Различают следующие основные планы проведения наблюдений:

$[N,U,N]$; $[N,U,T]$; $[N,U,r]$; $[N,R,T]$ и $[N,R,r]$,

где N - общее число изделий, поставленных под наблюдения;

U - планы для неремонтируемых изделий (отказавшие изделия АТ в дальнейшем могут ремонтироваться, но их отказы после ремонта исключаются из рассмотрения);

T - установленное время наблюдения;

R - планы для ремонтируемых изделий (результаты наблюдения за отремонтированными изделиями включаются в общие вплоть до замены изделия);

r - число отказов (предельных состояний), до возникновения которых проводятся наблюдения.

Эти планы трактуются следующим образом:

$[N,U,N]$ – под наблюдение поставлено N изделий авиационной техники, наблюдение ведется до отказа (наступления предельного состояния) всех изделий, отказавшие изделия новыми не заменяются;

$[N,U,T]$ – под наблюдение поставлено N изделий, наблюдение ведется до наступления момента T , отказавшие изделия новыми не заменяются;

$[N,U,r]$ – под наблюдение поставлено N изделий, наблюдения ведутся до появления r отказов, отказавшие изделия новыми не заменяются;

$[N, R, T]$ – под наблюдение поставлено N изделий, наблюдения ведутся до наступления момента T , отказавшие изделия заменяются новыми или ремонтируются;

$[N, R, r]$ – под наблюдение поставлено N изделий, наблюдения ведутся до наступления r отказов, отказавшие изделия заменяются новыми или ремонтируются.

Выбор теоретического закона распределения. Гипотеза о виде теоретического распределения наработки до отказа принимается исходя из физической природы появления отказа и физической модели, которую описывает каждый конкретный закон распределения.

Экспоненциальное распределение. Причины отказов - внезапные концентрации нагрузок внутри или вне объекта. Отказ наступает при превышении нагрузкой допустимой величины. Очевидно, что интенсивность отказов здесь не зависит от наработки. Такое распределение характерно для большого класса внезапных отказов, появляющихся без каких-либо предшествующих симптомов. Типичным примером такого отказа является отказ, связанный с попаданием посторонних предметов в проточную часть двигателя. Также близки к экспоненциальному распределению отказы объекта, состоящего из большого числа элементов, вероятности отказов которых малы (например, отказы радиоэлектронного, высотного оборудования самолетов).

Нормальное распределение. Это распределение имеет случайная величина, представляющая собой сумму большого числа независимых случайных величин, причем все они в об щей сумме играют относительно малую роль. В практике эксплуатации нормальное распределение характерно для отказов, связанных с накоплением повреждений в материале конструкции, происходящем с постоянной или примерно постоянной скоростью развития. Такими отказами могут являться износы, старение материалов, наклеп, происходящие с постоянной скоростью.

Логарифмически-нормальное распределение. Этому распределению могут подчиняться отказы, имеющие следующую причину. Каждое воздействие внешней нагрузки приводит к накоплению повреждений в материале детали. При этом величина добавляемого повреждения пропорциональна уже накопленному. Отказ наступает при превышении накопленного повреждения определенной величины. Примером такого отказа может служить усталостная долговечность лопаток, дисков, валов и других деталей авиадвигателей, силовой набор, узлы крепления агрегатов и другие детали планера ЛА.

Распределению Вейбулла обычно отвечает физическая модель так называемого «слабого звена». Объект представляется состоящим из большого числа элементов, накопление повреждений в которых идет независимо друг от друга. Отказ объекта наступает при отказе одного любого элемента. При этом, независимо от типа распределения отказов каждого элемента, распределение отказов объекта будет Вейбулловским. Оно хорошо описывает усталостную долговечность авиационных конструкций и приработочные отказы.

Распределение Рэлея характерно для объектов, имеющих интенсивные износы, старение, накопление повреждений.

Равномерное распределение применяется, если отсутствуют физические предпосылки, приводящие к вышеперечисленным моделям, а гистограмма плотности не имеет явно выраженной тенденции к увеличению или уменьшению.

3. ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Задача № 1. Наблюдение велось над шестью невозстанавливаемыми объектами. За время наблюдения все шесть объектов отказали при следующей наработке (в часах): 7; 106; 198; 302; 417; 481. Известно, что отказы вызваны накоплением усталостных повреждений. Найти вероятность безотказной работы объектов при наработке 350 часов.

Решение.

1. *Определяем план наблюдения.* Так как за время наблюдения отказали все невозстанавливаемые объекты, поставленные на испытания, следовательно, это план [NUN].

2. *Определяем закон распределения наработки до отказа.* Нарботка до отказа, связанного с накоплением усталостных повреждений, хорошо описывается логарифмически-нормальным законом распределения.

3. *Определяем параметры закона распределения.* Для логарифмически-нормального закона распределения необходимо определить два параметра:

- логарифмическое математическое ожидание m_1 ;
- логарифмическое среднеквадратическое отклонение σ_1 .

Для плана [NUN] из таблицы 16 Приложения находим формулы для расчета m_1 и σ_1 :

$$m_1^* = \frac{\sum_{i=1}^N \ln t_i}{N}; \quad (1) \quad \sigma_1^* = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\ln t_i - m_1^*)^2}{N - 1}}. \quad (2)$$

Подставив значения наработки до отказа t_i в формулу (1) получим:

$$m_1 = \frac{\ln 7 + \ln 106 + \ln 198 + \ln 302 + \ln 417 + \ln 481}{6} = 4,97.$$

Подставим найденное значение m_1 в (2):

$$\sigma_1 = \sqrt{\frac{(\ln 7 - 4,97)^2 + (\ln 106 - 4,97)^2 + (\ln 198 - 4,97)^2 + (\ln 302 - 4,97)^2 + (\ln 417 - 4,97)^2 + (\ln 481 - 4,97)^2}{5}} = 1,58$$

4. *Находим вероятность безотказной работы для наработки 350 часов.*

Вычисляем квантиль для $t=350$ часов:

$$z = \frac{\ln t - m_1}{\sigma_1}; \quad z = \frac{\ln 350 - 4,97}{1,58} = 0,562.$$

По таблице 2 Приложения находим значение стандартной нормальной функции распределения для квантиля $z=0,562$, с учетом того, что $\Phi(z)=1 - \Phi(z)$:

$$\Phi(0,562)=1 - 0,287 = 0,713.$$

Вероятность безотказной работы равна: $P(t)=1 - \Phi(t)$.

$$P(350)=1 - 0,713 = 0,287.$$

Задача № 2. Наблюдение велось над шестнадцатью невосстанавливаемыми объектами в течение $T=700$ часов. За время наблюдения пять объектов отказали при следующей наработке (в часах): 126; 378; 421; 607; 684. Известно, что отказы вызваны износом. Найти вероятность отказа объектов при наработке 1000 часов при условии, что известен коэффициент «к», равный 0,5.

Решение.

1. *Определяем план наблюдения.* Так как время наблюдения фиксировано и отказали не все невосстанавливаемые объекты, поставленные на испытания, следовательно, это план [NUT].

2. *Определяем закон распределения наработки до отказа.* Нарботка до отказа, связанного с износом, хорошо описывается нормальным законом распределения.

3. *Определяем параметры закона распределения.* Для нормального закона распределения необходимо определить два параметра:

- математическое ожидание m_t ;
- среднеквадратическое отклонение σ_t .

Для плана [NUT] формулы для определения m_t и σ_t выглядят следующим образом (таблица 14 Приложения):

$$m_t = k * \sigma_t + T; \quad \sigma_t = \frac{T - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i}{\frac{N-n}{n} f_1(k) - k}.$$

Величину $f_1(k)$ находим из таблицы 18 Приложения: $f_1(0,5)=0,509$.

$$\sigma_t = \frac{700 - \frac{1}{5} (126 + 378 + 421 + 607 + 684)}{\frac{16-5}{5} * 0,509 - 0,509} = 420,43 \text{ ч.}$$

$$m_t = 0,5 * 420,43 + 700 = 910,22 \text{ ч.}$$

4. *Находим вероятность отказа объекта для наработки 1000 часов.*

Вычисляем квантиль для $t=1000$ часов:

$$z = \frac{t - m_t}{\sigma_t}; \quad z = \frac{1000 - 910,22}{420,43} = 0,213.$$

По таблице 2 Приложения находим значение стандартной нормальной функции распределения для квантиля $z=1,041$, с учетом того, что $\Phi(z)=1 - \Phi(-z)$:
 $\Phi(1,041)=1 - 0,4154= 0,5846$.

Вероятность отказа равна: $Q(t)= \Phi(t)$.

$$Q(1000)= 0,5846.$$

Задача № 3. На основе расчетных данных задачи № 2 определить доверительные интервалы для m_t и σ_t для доверительной вероятности 0,95.

Решение.

Из таблицы 15 Приложения для плана наблюдения [NUT] выбираем формулы для оценки верхней и нижней границ параметров нормального закона распределения.

$$m_{тН} = m_t^* - Z_\beta \frac{\sigma_t^*}{\sqrt{N}} \sqrt{f_2(K)}; \quad m_{тВ} = m_t^* + Z_\beta \frac{\sigma_t^*}{\sqrt{N}} \sqrt{f_2(K)};$$

$$\sigma_{тН} = \sigma_t^* - Z_\beta \frac{\sigma_t^*}{\sqrt{N}} \sqrt{f_3(K)}; \quad \sigma_{тВ} = \sigma_t^* + Z_\beta \frac{\sigma_t^*}{\sqrt{N}} \sqrt{f_3(K)}.$$

Параметр Z_β находится по таблице 4 Приложения в зависимости от величины $\beta=0,95$, функции $f_2(k)$ и $f_3(k)$ – по таблице 18 как функции коэффициента $k=0,5$:
 $Z_\beta=1,96$; $f_2(k)= 2,898$; $f_3(k)= 2,178$.

$$m_{тН} = 910,22 - 1,96 \frac{420,43}{\sqrt{16}} \sqrt{2,898} = 559,52 \text{ ч.}$$

$$m_{тВ} = 910,22 + 1,96 \frac{420,43}{\sqrt{16}} \sqrt{2,898} = 1260,92 \text{ ч.}$$

$$\sigma_{тН} = 420,43 - 1,96 \frac{420,43}{\sqrt{16}} \sqrt{2,178} = 116,40 \text{ ч.}$$

$$\sigma_{тВ} = 259,52 + 1,96 \frac{259,52}{\sqrt{16}} \sqrt{2,178} = 724,46 \text{ ч.}$$

Задача № 4. Наблюдение велось над двенадцатью невосстанавливаемыми объектами до появления у пяти из них внезапных отказов. Отказы произошли при следующей наработке (в часах): 16; 31; 42; 67; 84. Найти вероятность безотказной работы при наработке 100 часов. Определить доверительные интервалы для параметров закона распределения и среднего времени наработки до отказа для доверительной вероятности $\beta=0,95$.

Решение.

1. *Определяем план наблюдения.* Так как время наблюдения не фиксировано, отказали не все невосстанавливаемые объекты, поставленные на испытания, и

испытания прекращены при наступлении определенного числа отказов, следовательно, это план [NUr].

2. *Определяем закон распределения наработки до отказа.* Наработка до отказа, вызванного внезапными причинами, хорошо описывается экспоненциальным законом распределения.

3. *Определяем параметры закона распределения.* Для экспоненциального закона распределения необходимо определить один параметр: интенсивность отказов λ .

Формулу для определения параметра λ берем из таблицы 6 Приложения для плана [NUr]:

$$\lambda = \frac{r-1}{\sum_{i=1}^r t_i + (N-r)t_r},$$

где r – число отказов;

t_r – наработка при последнем отказе.

$$\lambda = \frac{5-1}{(16+31+42+67+84) + (12-5)*84} = 0,00483 \text{ 1/ч.}$$

4. *Находим вероятность отказа объекта для наработки 100 часов*

Вероятность безотказной работы для экспоненциального распределения определяется выражением $P(t)=e^{-\lambda t}$ (таблица 1 Приложения).

$$P(100)=e^{-0,00483*100}=0,617.$$

5. *Определение доверительного интервала.*

Верхняя и нижняя оценка параметра λ по формулам таблицы 7 Приложения для плана наблюдения [NUr]:

$$\lambda_H = \frac{\lambda * \chi_{\frac{1-\beta}{2}, 2r}^2}{2(r-1)}; \quad \lambda_B = \frac{\lambda * \chi_{\frac{1+\beta}{2}, 2r}^2}{2(r-1)}.$$

Величина $\chi_{\frac{1+\beta}{2}, 2r}^2$ - квантиль распределения χ^2 для доверительной вероятности $(1+\beta)/2$ (для нашего случая – $(1 + 0,95)/2=0,975$) и числа степеней свободы $2r$ ($2*5=10$). Значение квантиля находится по таблице 3 Приложения:

$$\lambda_H = \frac{\lambda * \chi_{\frac{1-\beta}{2}, 2r}^2}{2(r-1)} = \frac{0,00483 * \chi_{0,025, 10}^2}{2 * (5-1)} = \frac{0,00483 * 3,25}{8} = 0,00196 \text{ 1/ч.}$$

$$\lambda_B = \frac{\lambda * \chi_{\frac{1+\beta}{2}, 2r}^2}{2(r-1)} = \frac{0,00483 * \chi_{0,975,10}^2}{2 * (5-1)} = \frac{0,00483 * 20,5}{8} = 0,01238 \text{ 1/ч.}$$

Величина средней наработки до отказа определяется формулой: $T_{cp}=1/\lambda$, причем минимальной интенсивности отказа соответствует максимальная наработка и наоборот: максимальной интенсивности – минимальная наработка. Отсюда:

$$T_{срн} = 1/\lambda_B, \quad T_{срв} = 1/\lambda_H.$$

$$T_{срн} = 1/0,01238 = 80,79 \text{ ч.}, \quad T_{срв} = 1/0,00196 = 510,2 \text{ ч.}$$

Задача № 5. Наблюдение велось над восемью невосстанавливаемыми. Объекты состоят из большого количества элементов, накопление повреждений в которых происходит независимо друг от друга; отказ объекта происходит при отказе одного любого элемента. Отказы произошли при следующей наработке (в часах): 106; 371; 422; 567; 704; 798; 905; 1020. Найти вероятность безотказной работы при наработке 1000 часов. Определить доверительные интервалы для среднего времени наработки до отказа для доверительной вероятности $\beta=0,95$, если известно, что параметр распределения $m=1$.

Решение.

1. *Определяем план наблюдения.* Так как за время наблюдения отказали все невосстанавливаемые объекты, поставленные на испытания, следовательно, это план [NUN].

2. *Определяем закон распределения наработки до отказа.* Нарботка до отказа объектов, физическая модель которых описана в условиях задачи, как правило описывается законом распределения Вейбулла.

3. *Определяем параметры закона распределения.* Распределение Вейбулла определяется заданием двух параметров: m и t_0 . Частным случаем этого распределения при значении параметра $m=1$ является экспоненциальное распределение, что и представлено в данной задаче. Для экспоненциального закона распределения необходимо определить один параметр: интенсивность отказов λ .

По таблице 6 приложения:

$$\lambda = \frac{N}{\sum_{i=1}^N t_i} \cdot \lambda = \frac{8}{106 + 371 + 422 + 567 + 798 + 905 + 1020} = 0,00191 \text{ 1/ч.}$$

$$T_{cp} = \frac{1}{\lambda} \cdot T_{cp} = \frac{1}{0,00191} = 523,56 \text{ ч.}$$

Вероятность безотказной работы для экспоненциального распределения определяется выражением $P(t)=e^{-\lambda t}$ (таблица 1 Приложения).

$$P(100) = e^{-0,00191 \cdot 1000} = 0,1481$$

Верхняя и нижняя оценка параметра λ по формулам таблицы 7 Приложения для плана наблюдения [NUN]:

$$\lambda_H = \frac{\lambda * \chi_{\frac{1-\beta}{2}, 2N}^2}{2(N-1)} ; \quad \lambda_B = \frac{\lambda * \chi_{\frac{1+\beta}{2}, 2N}^2}{2(N-1)} .$$

Величина $\chi_{\frac{1+\beta}{2}, 2N}^2$ для $(1+\beta)/2=0,975$ и $2N=16$ равна 20,5; величина $\chi_{\frac{1-\beta}{2}, 2N}^2$ для $(1-\beta)/2=0,025$ и $2N=16$ равна 3,25 (таблица 2 Приложения).

$$\lambda_H = \frac{\lambda * \chi_{\frac{1-\beta}{2}, 2N}^2}{2(N-1)} = \frac{0,00191 * 3,25}{2(8-1)} = 0,000443 \text{ 1/ч};$$

$$\lambda_B = \frac{\lambda * \chi_{\frac{1+\beta}{2}, 2N}^2}{2(N-1)} = \frac{0,00191 * 20,5}{2(8-1)} = 0,0028 \text{ 1/ч}.$$

$$T_{срн} = 1/0,0028 = 357,55; \quad T_{срв} = 1/0,000443 = 2255,34.$$

Задача № 6. Для распределения наработки до отказа, подчиняющегося нормальному закону, известно, что при наработке $t_1=500$ часов вероятность безотказной работы была равна $P(t_1)=0,96$, а при наработке $t_2=6000$ часов – $P(t_2)=0,87$. Найти вероятность безотказной работы для наработки 15000 часов.

Решение.

Для нахождения параметров закона распределения необходимо воспользоваться формулами метода разделяющих разбиений. Для нормального закона распределения вероятность отказа $Q(t)=\Phi(Z)$ (таблица 1 Приложения), где z – квантиль стандартного нормального распределения: $Z=(t-m_t)/\sigma_t$:

$$Q(t) = 1 - P(t) = \Phi((t - m_t) / \sigma_t).$$

По таблице 1 Приложения для $Q(t_1)=1-P(t_1)=0,04$ и $Q(t_2)=1-P(t_2)=0,13$ находим квантили $Z_1=-1,75$ и $Z_2=-1,13$.

Составляем уравнения:

$$\begin{cases} z_1 = \frac{t_1 - m_t}{\sigma_t}; \\ z_2 = \frac{t_2 - m_t}{\sigma_t}. \end{cases}$$

Отсюда получаем:

$$m_t = \frac{t_1 Z_2 - t_2 Z_1}{Z_2 - Z_1}.$$

$$\sigma_t = \frac{t_2 - t_1}{Z_2 - Z_1}.$$

$$m_t = \frac{500 * (-1,13) - 6000 * (-1,75)}{-1,13 + 1,75} = 16024,19 \text{ ч.}$$

$$\sigma_t = \frac{6000 - 500}{-1,13 + 1,75} = 8870,97 \text{ ч.}$$

Вероятность безотказной работы для $t=15000$ часов:

$$P(15000) = 1 - Q(15000) = 1 - \Phi(Z = (15000 - m_t) / \sigma_t).$$

$$Z = (15000 - 16024,19) / 8870,97 = -0,115.$$

По таблице 1 Приложения находим $\Phi(-0,115) = 0,4542$.

Вероятность безотказной работы:

$$P(15000) = 1 - 0,4542 = 0,5458.$$

Задача № 7. Наблюдение велось над двадцатью пятью объектами и в течение 700 часов отказали 8 объектов, причем 3 из них отказали через 300 часов с начала испытания. Определить сколько объектов откажет через 1500 часов, если известно, что отказы вызваны износом.

Решение.

Определяем закон распределения наработки до отказа. Наработка до отказа, связанного с износом, хорошо описывается нормальным законом распределения.

Определяем вероятность отказа для наработок 700 и 300 часов соответственно:

$$Q(t) = \frac{n(t)}{N}. \quad Q(700) = \frac{8}{25} = 0,32. \quad Q(300) = \frac{3}{25} = 0,12.$$

Далее решение сводится к задаче № 6.

Для $\Phi(Z) = 0,12$ $Z_1 = -1,175$; для $\Phi(Z) = 0,32$ $Z_2 = -0,468$.

$$m_t = \frac{t_1 Z_2 - t_2 Z_1}{Z_2 - Z_1} = \frac{300 * (-0,468) - 700 * (-1,175)}{-0,468 + 1,175} = 964,78 \text{ ч.}$$

$$\sigma_t = \frac{t_2 - t_1}{Z_2 - Z_1} = \frac{700 - 300}{-0,468 + 1,175} = 565,77 \text{ ч.}$$

$$Q(1500) = \Phi(Z = (15000 - m_t) / \sigma_t).$$

$$Z=(1500-964,78)/565,77=0,946.$$

Так как $\Phi(Z)=1-\Phi(-Z)$, то по таблице 1 Приложения находим $\Phi(-0,946)=0,1723$ и вычисляем $Q(Z)=1-0,1723=0,8277$.

Число отказавших объектов определяется по формуле $n(t)=N*Q(t)$:

$$n(1500) = 25 * 0,8277 = 20,69 .$$

Через 1500 часов с начала испытания откажет двадцать объектов.

4. ВАРИАНТЫ ЗАДАЧ

1. Для распределения наработки до отказа, вызванного усталостным разрушением, известно, что при наработке $t_1=900$ часов вероятность безотказной работы была равна $P(t_1)=0,71$, а при наработке $t_2=8600$ часов – $P(t_2)=0,47$. Найти вероятность безотказной работы для наработки 12000 часов.

2. Наблюдение велось над восемью невосстанавливаемыми объектами. За время наблюдения все объекты отказали при следующей наработке (в часах): 74; 196; 298; 532; 717; 811; 922; 1001. Известно, что отказы вызваны накоплением усталостных повреждений. Найти вероятность безотказной работы объектов при наработке 400 часов.

3. Нарботка до появления внезапных отказов у невосстанавливаемых объектов образует ряд: 100, 200, 300, 400, 500 и 600 часов. Под наблюдением находилось 100 объектов. Найти наработку, при которой откажет 50% объектов.

4. Распределение наработки до отказа подчиняется модели «слабого звена». Известно, что при наработке $t_1=1000$ часов вероятность безотказной работы была равна $P(t_1)=0,95$, а при наработке $t_2=5000$ часов – $P(t_2)=0,8$. Найти вероятность отказа при наработке 10000 часов.

5. Наблюдение велось над двадцатью невосстанавливаемыми объектами и в течение 100 часов отказали 4 объекта, далее еще через 300 часов отказали еще 6 объектов. Определить сколько объектов откажет через 1000 часов, если известно, что отказы вызваны усталостным разрушением.

6. Наблюдение велось над 100 невосстанавливаемыми объектами и в течение 1000 часов отказали 25 объектов. Найти вероятность безотказной работы при наработке 2000 часов, если известно, что наработка до отказа подчиняется закону распределения с равномерной плотностью.

7. Наблюдение велось над 12 невосстанавливаемыми. Нарботка до отказа объектов подчиняется модели «слабого звена». Отказы произошли при следующей наработке (в часах): 16; 37; 42; 67; 74; 98; 105; 120. Найти вероятность безотказной работы при наработке 200 часов. Определить доверительные интервалы для среднего времени наработки до отказа для доверительной вероятности $\beta=0,95$, если известно, что параметр распределения $m=1$.

8. Для распределения наработки до отказа, вызванного износом, известно, что при наработке $t_1=1000$ часов вероятность безотказной работы была равна $P(t_1)=0,8$, а средняя наработка до отказа равна 3000 часов. Найти вероятность безотказной работы для наработки 4000 часов.

9. Наблюдение велось над 5 невосстанавливаемыми объектами. Отказы, вызванные усталостью материала, зафиксированы при следующей наработке (в часах): 100; 200; 300; 400; 500. Найти вероятность безотказной работы при наработке 50 часов. Определить доверительные интервалы вероятности безотказной работы для доверительной вероятности $\beta=0,95$.

10. Наблюдение велось над 10 объектами и в течение 100 часов отказали 2 объектов, через 300 часов с начала испытания отказов было уже 5. Определить сколько объектов откажет через 500 часов, если известно, что отказы вызваны износом.

11. Наблюдение велось над 5 невосстанавливаемыми объектами. Отказы, вызванные износом, зафиксированы при следующей наработке (в часах): 100; 200; 300; 400; 500. Найти вероятность безотказной работы при наработке 50 часов. Определить доверительные интервалы для среднего времени наработки до отказа для доверительной вероятности $\beta=0,95$.

12. Нарботка до появления отказов, вызванных интенсивным износом и старением, у невосстанавливаемых объектов образует ряд: 100, 200, 300, 400, 500 и 600 часов. Под наблюдением находилось 10 объектов. Найти вероятность безотказной работы при наработке 800 часов и доверительный интервал для нее для доверительной вероятности $\beta=0,9$.

13. Наблюдение велось над 40 невосстанавливаемыми объектами и в диапазоне от 100 до 200 часов отказали 8 объектов. Найти вероятность безотказной работы при наработке 300 часов, если известно, что наработка до отказа подчиняется закону распределения с равномерной плотностью.

14. Наблюдение велось над 20 невосстанавливаемыми объектами. За время наблюдения 6 объектов отказали при следующей наработке (в часах): 226; 378; 511; 697; 814; 901. Известно, что отказы вызваны износом. Найти вероятность отказа объектов при наработке 1000 часов при условии, что известен коэффициент «к», равный 0,4.

15. Для распределения наработки до отказа, вызванного износом, известно, что при наработке $t_1=500$ часов вероятность безотказной работы была равна $P(t_1)=0,9$, а при наработке $t_2=1000$ часов – $P(t_2)=0,6$. Найти вероятность безотказной работы для наработки 2000 часов и доверительный интервал для нее для доверительной вероятности $\beta=0,9$.

16. Нарботка до появления отказов, вызванных интенсивным износом и старением, у невосстанавливаемых объектов образует ряд: 100, 200, 300, 400, 500 и 600 часов. Под наблюдением находилось 6 объектов. Найти вероятность безотказной работы при наработке 50 часов и доверительный интервал для нее для доверительной вероятности $\beta=0,95$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Косточкин В.В. «Надежность авиационных двигателей и силовых установок» / Москва, «Машиностроение», 1976 г. 248 стр.
2. Жуков К.А., Милов Е.А., Епишев Н.И. «Эксплуатационная надежность авиационной техники». Учебное пособие / Куйбышев, Куйбышевский авиационный институт, 1987 г. 107 стр.
3. Милов Е.А. «Анализ эксплуатационной надежности авиационной техники». Метод. указания / Куйбышев, Куйбышевский авиационный институт, 1992 г. 38 стр.
4. Кочуров В. А., Новиков Г. А. «Примеры расчета характеристик надежности авиационной техники». Метод. указания / Самарский государственный аэрокосмический университет. Самара, 2001 г. 40 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица 1 – Аналитический вид характеристик законов распределения

Наименование распределения	Плотность распределения	Интенсивность отказов	Вероятность безотказной работы
Равномерное	0 при $t=0, t>a$ $\frac{1}{a}$ при $0 \leq t \leq a$	$\frac{1}{a-t}$ при $0 \leq t \leq a$	0 при $t>a$ $1 - \frac{t}{a}$ при $0 \leq t \leq a$ 1 при $t=0$
Экспоненциальное	$\lambda * e^{-\lambda t}$	λ	$e^{-\lambda t}$
Нормальное	$\frac{1}{\sigma_t} f\left(\frac{t - m_t}{\sigma_t}\right)$	$\frac{1}{\sigma_t} \frac{f\left(\frac{t - m_t}{\sigma_t}\right)}{1 - \Phi\left(\frac{t - m_t}{\sigma_t}\right)}$	$1 - \Phi\left(\frac{t - m_t}{\sigma_t}\right)$
Логарифмически нормальное	$f\left(\frac{\ln t - m_l}{\sigma_l}\right)$	$\frac{f\left(\frac{\ln t - m_l}{\sigma_l}\right)}{1 - \Phi\left(\frac{\ln t - m_l}{\sigma_l}\right)}$	$1 - \Phi\left(\frac{\ln t - m_l}{\sigma_l}\right)$
Распределение Вейбулла	$\frac{m}{t_0} t^{m-1} e^{-\frac{t^m}{t_0}}$	$\frac{m}{t_0} t^{m-1}$	$e^{-\frac{t^m}{t_0}}$
Распределение Релея	$\frac{t}{\sigma^2} e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}}$	$\frac{t}{\sigma^2}$	$e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}}$

Таблица 2 - Значения стандартной нормальной функции распределения

x	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
-0,00	0,5000	0,4960	0,4920	0,4880	0,4840	0,4601	0,4761	0,4721	0,4681	0,4641
-0,10	0,4602	0,4562	0,4522	0,4483	0,4443	0,4404	0,4364	0,4325	0,4286	0,4247
-0,20	0,4207	0,4168	0,4129	0,4090	0,4052	0,4013	0,3974	0,3936	0,3897	0,3859
-0,30	0,3821	0,3783	0,3745	0,3707	0,3669	0,3632	0,3594	0,3557	0,3520	0,3483
-0,40	0,3446	0,3409	0,3372	0,3336	0,3300	0,3264	0,3228	0,3192	0,3156	0,3121
-0,50	0,3085	0,3050	0,3015	0,2981	0,2946	0,2912	0,2877	0,2843	0,2810	0,2776
-0,60	0,2743	0,2709	0,2676	0,2643	0,2611	0,2578	0,2546	0,2514	0,2483	0,2551
-0,70	0,2420	0,2389	0,2358	0,2327	0,2297	0,2266	0,2236	0,2206	0,2177	0,2148
-0,80	0,2119	0,2090	0,2061	0,2033	0,2005	0,1977	0,1949	0,1922	0,1894	0,1867
-0,90	0,1841	0,1814	0,1788	0,1762	0,1736	0,1711	0,1685	0,1660	0,1635	0,1611
-1,00	0,1587	0,1563	0,1539	0,1515	0,1492	0,1469	0,1446	0,1423	0,1401	0,1379
-1,10	0,1357	0,1335	0,1314	0,1292	0,1271	0,1251	0,1230	0,1210	0,1190	0,1170
-1,20	0,1151	0,1131	0,1112	0,1093	0,1075	0,1056	0,1039	0,1020	0,1003	0,0985
-1,30	0,0968	0,0951	0,0934	0,918	0,0901	0,0885	0,0869	0,0853	0,0838	0,0823
-1,40	0,0808	0,0793	0,0778	0,0764	0,0749	0,0735	0,0721	0,0708	0,0694	0,0681
-1,50	0,0668	0,0655	0,0643	0,0630	0,0618	0,0606	0,0594	0,0582	0,0571	0,0559
-1,60	0,0548	0,0537	0,0526	0,0516	0,0505	0,0495	0,0485	0,0475	0,0465	0,0455
-1,70	0,0446	0,0436	0,0427	0,0418	0,0409	0,0401	0,0392	0,0384	0,0375	0,0334
-1,80	0,0359	0,0351	0,0344	0,0336	0,0329	0,0322	0,0314	0,0307	0,0301	0,0294
-1,90	0,0288	0,0281	0,0274	0,0268	0,0262	0,0256	0,0250	0,0244	0,0239	0,0233
-2,00	0,0228	0,0179	0,0139	0,0107	0,0082	0,0062	0,0047	0,0035	0,0026	0,0019
-3,00	0,0014	0,0010	0,0007	0,0005	0,0003	0,0002	0,0002	0,0001	0,0001	0,0000

Таблица 3 - Значения функции распределения χ^2

Число степеней свободы	Доверительная вероятность											
	0,005	0,01	0,025	0,05	0,1	0,2	0,8	0,9	0,95	0,975	0,99	0,995
1	0,3 *10 ⁻⁴	0,16 *10 ⁻³	0,98 *10 ⁻³	0,39 *10 ⁻²	0,016	0,064	1,64	2,71	3,84	5,02	6,63	7,88
2	0,010	0,020	0,051	0,103	0,211	0,446	3,22	4,61	5,98	7,38	9,21	10,60
3	0,072	0,115	0,216	0,352	0,584	1,000	4,64	6,25	7,81	9,35	11,30	12,80
4	0,207	0,297	0,484	0,711	1,060	1,650	5,99	7,78	9,49	11,10	13,30	14,90
5	0,412	0,554	0,831	1,150	1,610	2,340	7,29	9,24	11,10	12,80	15,10	16,70
6	0,676	0,872	1,240	1,640	2,200	3,070	8,56	10,60	12,60	14,40	16,80	18,50
7	0,989	1,240	1,690	2,170	2,830	3,820	9,80	12,00	14,10	16,00	18,50	20,30
8	1,340	1,650	2,180	2,730	3,490	4,590	11,00	13,40	15,50	17,50	20,10	22,00
9	1,730	2,090	2,700	3,330	4,170	5,380	12,20	14,70	16,90	19,00	21,70	23,60
10	2,160	2,560	3,250	3,940	4,870	6,180	13,40	16,00	18,30	20,50	23,20	25,20
11	2,600	3,050	3,820	4,570	5,580	6,990	14,60	17,30	19,70	21,90	24,70	26,80
12	3,070	3,570	4,400	5,230	6,300	7,810	15,80	18,50	21,00	23,30	26,20	28,30
13	3,570	4,110	5,010	5,890	7,040	8,630	17,00	19,80	22,40	24,70	27,70	29,80
14	4,070	4,660	5,630	6,570	7,790	9,470	18,20	21,10	23,70	26,10	29,10	31,30
15	4,600	5,230	6,260	7,260	8,560	10,300	19,30	22,30	25,00	27,50	30,60	32,80
16	5,140	5,810	6,910	7,960	9,310	11,200	20,50	23,50	26,30	28,80	32,00	34,30
18	6,260	7,010	8,230	9,390	10,900	12,900	22,80	26,00	28,90	31,50	34,80	37,20
20	7,430	8,260	9,590	10,900	12,400	14,600	25,00	28,40	31,40	34,20	37,60	40,00
22	8,640	9,540	11,000	12,300	14,000	16,300	27,30	30,30	33,90	36,80	40,30	42,80
24	9,890	10,900	12,400	13,800	15,700	18,100	29,60	33,20	36,40	39,40	43,00	45,60
26	11,20	12,20	13,80	15,40	17,30	19,80	31,80	35,60	38,90	41,90	45,60	48,30
28	12,50	13,60	15,30	16,90	18,90	21,60	34,00	37,90	41,30	44,50	48,30	51,00
30	13,80	15,00	16,80	18,50	20,60	23,40	36,30	40,30	43,80	47,00	50,90	53,70
35	17,20	17,50	20,60	22,50	24,80	27,80	41,80	46,10	49,90	53,20	57,30	60,30
40	20,70	22,20	24,40	26,50	29,10	32,30	47,30	51,80	55,80	59,30	63,70	66,80
45	24,30	25,90	28,40	30,60	33,40	36,90	52,70	57,50	61,70	65,40	70,00	73,20
50	28,00	29,70	32,40	34,80	37,70	41,80	58,20	63,20	67,50	71,40	76,20	79,50
55	31,70	33,60	36,40	39,00	42,10	46,00	63,60	68,80	73,30	77,40	82,30	85,70
60	35,50	37,50	40,50	43,20	46,50	50,60	69,00	74,40	79,10	83,40	88,40	92,00
65	39,40	41,40	44,60	47,40	50,90	55,30	74,40	80,00	84,80	89,20	94,40	98,10
70	43,30	45,40	48,80	51,70	55,30	59,90	79,70	85,50	90,50	95,00	100,40	104,2
75	47,20	49,50	52,90	56,10	59,80	64,50	85,10	91,10	96,20	100,80	106,40	110,3
80	51,20	53,50	57,20	60,40	64,30	69,20	90,40	96,60	101,90	106,60	112,30	116,3
85	55,20	57,60	61,40	64,70	68,80	73,90	95,70	102,10	107,50	112,4	118,20	122,3
90	59,90	61,80	65,60	69,10	73,30	78,60	101,10	107,60	112,10	118,1	124,10	128,3
95	63,20	65,90	69,90	73,50	77,80	83,20	106,40	113,00	118,80	123,90	130,00	134,2
100	67,30	70,10	74,20	77,90	82,40	87,90	111,70	118,50	124,30	129,60	135,80	140,2

Таблица 4 - Квантили нормального распределения

β	Z_β	β	Z_β
0,50	0,674	0,82	1,341
0,51	0,690	0,63	1,372
0,52	0,706	0,84	1,405
0,53	0,722	0,85	1,440
0,54	0,739	0,86	1,476
0,55	0,755	0,87	1,514
0,56	0,772	0,88	1,555
0,57	0,789	0,89	1,598
0,58	0,806	0,90	1,645
0,59	0,824	0,91	1,625
0,60	0,842	0,92	1,751
0,61	0,860	0,925	1,780
0,62	0,878	0,93	1,812
0,63	0,896	0,94	1,881
0,64	0,915	0,95	1,960
0,65	0,935	0,96	2,054
0,66	0,954	0,97	2,170
0,67	0,974	0,975	2,241
0,68	0,994	0,980	2,326
0,69	1,015	0,990	2,576
0,68	0,994	0,980	2,326
0,69	1,015	0,990	2,576
0,70	1,036	0,991	2,612
0,71	1,080	0,993	2,697
0,72	1,103	0,994	2,748
0,73	1,126	0,995	2,807
0,74	1,150	0,996	2,878
0,75	1,175	0,997	2,968
0,76	1,200	0,9975	3,024
0,77	1,227	0,9980	3,040
0,78	1,254	0,9990	3,291
0,79	1,282	0,9995	3,480
0,80	1,311	0,9999	3,885
0,81	1,000		

Таблица 5 - Квантили распределения Стьюдента

N-1	P								
	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,95	0,98	0,99	0,999
1	1,000	1,376	1,963	3,078	6,314	12,706	31,821	63,657	636,619
2	0,816	1,061	1,336	1,886	2,920	4,303	6,965	9,965	31,598
3	0,765	0,978	1,250	1,638	2,353	3,181	4,541	5,841	12,941
4	0,741	0,941	1,190	1,533	2,132	2,776	3,747	4,604	8,610
5	0,727	0,920	1,156	1,476	2,015	2,571	3,365	4,032	6,869
6	0,718	0,906	1,134	1,440	1,943	2,447	3,143	3,707	5,959
7	0,711	0,896	1,119	1,415	1,895	2,365	2,998	3,499	5,405
8	0,706	0,889	1,108	1,397	1,860	2,306	2,896	3,355	5,041
9	0,703	0,883	1,100	1,383	1,833	2,262	2,821	3,250	4,781
10	0,700	0,879	1,093	1,372	1,812	2,228	2,704	3,169	4,587
12	0,695	0,873	1,083	1,356	1,782	2,179	2,681	3,056	4,318
14	0,692	0,868	1,076	1,345	1,761	2,145	2,624	2,977	4,140
16	0,690	0,865	1,071	1,337	1,746	2,120	2,583	2,921	4,015
18	0,688	0,862	1,067	1,330	1,734	2,101	2,552	2,878	3,922
20	0,687	0,860	1,064	1,325	1,725	2,086	2,528	2,845	3,850
25	0,684	0,856	1,058	1,316	1,708	2,060	2,485	2,787	3,725
30	0,683	0,854	1,055	1,310	1,697	2,042	2,457	2,750	3,646
60	0,679	0,848	1,046	1,296	1,671	2,000	2,390	2,660	3,460
∞	0,674	0,842	1,036	1,282	1,645	1,960	2,326	2,576	3,291

Таблица 6 – Оценка параметров экспоненциального распределения

План наблюдения	Формулы для определения оценки λ^*
[NUN]	$\frac{N}{\sum_{i=1}^N t_i}$
[NUT]	$\frac{n}{\sum_{i=1}^N t_i + (N - n)T_a}$
[Nur]	$\frac{r - 1}{\sum_{i=1}^N t_i + (N - r)t_r}$

Таблица 7 – Доверительные границы для параметров экспоненциального закона распределения

Планы наблюдений	Формулы для определения двусторонних границ параметра λ с доверительной вероятностью β	
	Нижняя граница	Верхняя граница
[NUN]	$\frac{\lambda * \chi_{\frac{1-\beta}{2}, 2n}^2}{2(N-1)}$	$\frac{\lambda * \chi_{\frac{1+\beta}{2}, 2n}^2}{2(N-1)}$
[NUT]	$\frac{\lambda * N * \chi_{\frac{1-\beta}{2}, 2n}^2}{n \left(2N - n + \frac{1}{2} \chi_{\frac{1-\beta}{2}, 2n}^2 \right)}$	$\frac{\lambda * N * \chi_{\frac{1+\beta}{2}, 2n}^2}{n \left(2N - n + \frac{1}{2} \chi_{\frac{1+\beta}{2}, 2n+2}^2 \right)}$
[NUr]	$\frac{\lambda * \chi_{\frac{1-\beta}{2}, 2r}^2}{2(r-1)}$	$\frac{\lambda * \chi_{\frac{1+\beta}{2}, 2r}^2}{2(r-1)}$

Таблица 8 – Оценка параметров распределения Вейбулла

План наблюдения	Формулы для определения оценок $\lambda^* = \frac{1}{t_0}$ и m^*
[NUN]	$\lambda^* = \frac{N}{\sum_{i=1}^N t_i^{m^*}}$ $\left(\frac{N}{m^*} + \sum_{i=1}^N \ln t_i \right) \sum_{i=1}^N t_i^{m^*} - N \sum_{i=1}^N t_i^{m^*} \ln t_i = 0$
[NUT]	$\lambda^* = \frac{n}{\sum_{i=1}^n t_i^{m^*} + (N-n)T_a^{m^*}}$ $\left(\frac{n}{m^*} + \sum_{i=1}^n \ln t_i \right) \left[\sum_{i=1}^n t_i^{m^*} + (N-n)T_a^{m^*} \right] - n \left[\sum_{i=1}^n t_i^{m^*} \ln t_i + (N-n)T_a^{m^*} \ln T_a \right] = 0$
[NUr]	$\lambda^* = \frac{r}{\sum_{i=1}^r t_i^{m^*} + (N-r)t_r^{m^*}}$ $\left(\frac{r}{m^*} + \sum_{i=1}^r \ln t_i \right) \left[\sum_{i=1}^r t_i^{m^*} + (N-r)t_r^{m^*} \right] - r \left[\sum_{i=1}^r t_i^{m^*} \ln t_i + (N-r)t_r^{m^*} \ln t_r \right] = 0$

Таблица 9 – Доверительные границы для параметров распределения Вейбулла

Планы наблюдений	Формулы для определения двусторонних границ параметров λ и m с доверительной вероятностью β			
	Нижняя граница λ_H	Верхняя граница λ_B	Нижняя граница m_H	Верхняя граница m_B
[NUN] [NUT] [Nur]	$\lambda^* - Z_\beta \sqrt{D(\lambda^*)}$	$\lambda^* + Z_\beta \sqrt{D(\lambda^*)}$	$m^* - Z_\beta \sqrt{D(m^*)}$	$m^* + Z_\beta \sqrt{D(m^*)}$

Таблица 10 – Дисперсия оценок параметров λ и m распределения Вейбулла

Планы наблюдений	Дисперсии оценок	Формулы для определения дисперсий оценок параметров λ и m
[NUN]	$D(\lambda^*)$	$\frac{\frac{N}{m^{*2}} + \lambda^* \sum_{i=1}^N t_i^{m^*} \ln^2 t_i}{\lambda^{*2} \left(\frac{N}{m^{*2}} + \lambda^* \sum_{i=1}^N t_i^{m^*} \ln^2 t_i \right) - \left(\sum_{i=1}^N t_i^{m^*} \ln t_i \right)^2}$
	$D(m^*)$	$\frac{\frac{N}{m^{*2}}}{\lambda^{*2} \left(\frac{N}{m^{*2}} + \lambda^* \sum_{i=1}^N t_i^{m^*} \ln^2 t_i \right) - \left(\sum_{i=1}^N t_i^{m^*} \ln t_i \right)^2}$
[NUT]	$D(\lambda^*)$	$\frac{\frac{n}{m^{*2}} + \lambda^* \left[\sum_{i=1}^n t_i^{m^*} \ln^2 t_i + (N-n) T_a^{m^*} \ln^2 T_a \right]}{\lambda^{*2} \left\{ \frac{n}{m^{*2}} + \lambda^* \left[\sum_{i=1}^n t_i^{m^*} \ln^2 t_i + (N-n) T_a^{m^*} \ln^2 T_a \right] \right\} - \left[\sum_{i=1}^n t_i^{m^*} \ln t_i + (N-n) T_a^{m^*} \ln T_a \right]^2}$
	$D(m^*)$	$\frac{\frac{n}{\lambda^{*2}}}{\lambda^{*2} \left\{ \frac{n}{m^{*2}} + \lambda^* \left[\sum_{i=1}^n t_i^{m^*} \ln^2 t_i + (N-n) T_a^{m^*} \ln^2 T_a \right] \right\} - \left[\sum_{i=1}^n t_i^{m^*} \ln t_i + (N-n) T_a^{m^*} \ln T_a \right]^2}$
[Nur]	$D(\lambda^*)$	$\frac{\frac{r}{m^{*2}} + \lambda^* \left[\sum_{i=1}^r t_i^{m^*} \ln^2 t_i + (N-r) t_r^{m^*} \ln^2 t_r \right]}{\lambda^{*2} \left\{ \frac{r}{m^{*2}} + \lambda^* \left[\sum_{i=1}^r t_i^{m^*} \ln^2 t_i + (N-r) t_r^{m^*} \ln^2 t_r \right] \right\} - \left[\sum_{i=1}^r t_i^{m^*} \ln t_i + (N-r) t_r^{m^*} \ln t_r \right]^2}$
	$D(m^*)$	$\frac{\frac{r}{\lambda^{*2}}}{\lambda^{*2} \left\{ \frac{r}{m^{*2}} + \lambda^* \left[\sum_{i=1}^r t_i^{m^*} \ln^2 t_i + (N-r) t_r^{m^*} \ln^2 t_r \right] \right\} - \left[\sum_{i=1}^r t_i^{m^*} \ln t_i + (N-r) t_r^{m^*} \ln t_r \right]^2}$

Таблица 11 – Оценка параметров распределения Релея

План наблюдения	Формулы для определения оценок $\lambda^* = \frac{1}{t_0} = \frac{1}{2\sigma^2}$ и $m^* = \sigma \cdot \sqrt{2}$
[NUN]	$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^N t_i^2}{2N} = \frac{t_0}{2}$
[NUT]	$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n t_i^2 + (N-n) \cdot T_a^2}{2n} = \frac{t_0}{2}$
[NUr]	$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^r t_i^2 + (N-r) \cdot T_r^2}{2r} = \frac{t_0}{2}$

Таблица 12 – Доверительные границы для параметров распределения Релея

Планы наблюдений	Формулы для определения двусторонних границ параметра λ с доверительной вероятностью β	
	Нижняя граница λ_H	Верхняя граница λ_B
[NUN] [NUT] [Nur]	$\lambda^* - Z_\beta \sqrt{D(\lambda^*)}$	$\lambda^* + Z_\beta \sqrt{D(\lambda^*)}$

Таблица 13 – Дисперсия оценок параметра λ распределения Релея

Планы наблюдений	Дисперсии оценок	Формулы для определения дисперсий оценки параметра λ
[NUN]	$D(\lambda^*)$	$\frac{1}{\lambda^{*2} \left[\frac{N}{4} + \lambda \cdot \sum_{i=1}^N t_i^2 \cdot \ln^2 t_i \right]} - \frac{\left(\sum_{i=1}^N t_i^2 \cdot \ln t_i \right)^2}{N}$
[NUT]	$D(\lambda^*)$	$\frac{1}{\lambda^{*2} \left[\frac{n}{4} + \lambda \cdot \left\{ \sum_{i=1}^n t_i^2 \cdot \ln^2 t_i + [N-n] \cdot T_a^2 \cdot \ln^2 T_a \right\} \right]} - \frac{\left(\sum_{i=1}^n t_i^2 \cdot \ln t_i + [N-n] \cdot T_a^2 \cdot \ln T_a \right)^2}{n}$

Окончание таблицы 13.

[Nur]	$D(\lambda^*)$	$\frac{r}{\lambda^{*2}} - \frac{1}{\frac{r}{4} + \lambda \cdot \left\{ \sum_{i=1}^r t_i^2 \cdot \ln^2 t_i + [N-r] \cdot t_r^2 \cdot \ln^2 t_r \right\}}$
-------	----------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Таблица 14 – Оценка параметров нормального распределения

План наблюдений	Расчетные формулы
[NUN]	$m_t^* = \frac{\sum_{i=1}^N t_i}{N}; \quad \sigma_t^* = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (t_i - m_t^*)^2}{N-1}}$
[NUT]	$\sum_{i=1}^n \left(\frac{t_i - m_t^*}{\sigma_t^*} \right) + (N-n) \frac{f\left(\frac{m_t^* - t_n}{\sigma_t^*}\right)}{\Phi\left(\frac{m_t^* - t_n}{\sigma_t^*}\right)} = 0$ $m_t = k * \sigma_t + T; \quad \sigma_t = \frac{T - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i}{\frac{N-n}{n} f_1(k) - k}$
[NUr]	$r - \sum_{i=1}^r \left(\frac{t_i - m_t^*}{\sigma_t^*} \right) + (N-r) \frac{m_t^* - t_r}{\sigma_t^*} \frac{f\left(\frac{m_t^* - t_r}{\sigma_t^*}\right)}{\Phi\left(\frac{m_t^* - t_r}{\sigma_t^*}\right)} = 0$ $m_t = k * \sigma_t + t_r; \quad \sigma_t = \frac{t_r - \frac{1}{r} \sum_{i=1}^r t_i}{\frac{N-r}{r} f_1(k) - k}$

Таблица 15 – Доверительные границы для параметров нормального распределения

Планы наблюдений	Формулы для определения двусторонних границ параметров m_i и σ_i с доверительной вероятностью β			
	Нижняя граница m_{tH}	Верхняя граница m_{tB}	Нижняя граница σ_{tH}	Верхняя граница σ_{tB}
[NUN]	$m_i^* - t_{\beta, N-1} \frac{\sigma_i^*}{\sqrt{N}}$	$m_i^* + t_{\beta, N-1} \frac{\sigma_i^*}{\sqrt{N}}$	$\sigma_i^* \sqrt{\frac{N-1}{\chi_{\frac{1-\beta}{2}, N-1}^2}}$	$\sigma_i^* \sqrt{\frac{N-1}{\chi_{\frac{1+\beta}{2}, N-1}^2}}$
[NUT] [Nur]	$m_i^* - Z_{\beta} \frac{\sigma_i^*}{\sqrt{N}} \sqrt{f_2(K)}$	$m_i^* + Z_{\beta} \frac{\sigma_i^*}{\sqrt{N}} \sqrt{f_2(K)}$	$\sigma_i^* - Z_{\beta} \frac{\sigma_i^*}{\sqrt{N}} \sqrt{f_3(K)}$	$\sigma_i^* + Z_{\beta} \frac{\sigma_i^*}{\sqrt{N}} \sqrt{f_3(K)}$

Таблица 16 – Оценка параметров логарифмически нормального распределения

План Наблюдений	Расчетные формулы
[NUN]	$m_l^* = \frac{\sum_{i=1}^N \ln t_i}{N}; \quad \sigma_l^* = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\ln t_i - m_l^*)^2}{N-1}}$
[NUT]	$\sum_{i=1}^n \left(\frac{\ln t_i - m_l^*}{\sigma_l^*} \right) + (N-n) \frac{f\left(\frac{m_l^* - \ln T_a}{\sigma_l^*}\right)}{\Phi\left(\frac{m_l^* - \ln T_a}{\sigma_l^*}\right)} = 0$ $m_l = k * \sigma_l + T; \quad \sigma_l = \frac{T - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i}{\frac{N-n}{n} f_1(k) - k}$
[Nur]	$r - \sum_{i=1}^r \left(\frac{\ln t_i - m_l^*}{\sigma_l^*} \right) + (N-r) \frac{m_l^* - \ln t_r}{\sigma_l^*} \frac{f\left(\frac{m_l^* - \ln t_r}{\sigma_l^*}\right)}{\Phi\left(\frac{m_l^* - \ln t_r}{\sigma_l^*}\right)} = 0$ $m_l = k * \sigma_l + \ln t_r; \quad \sigma_l = \frac{\ln t_r - \frac{1}{r} \sum_{i=1}^r \ln t_i}{\frac{N-r}{r} f_1(k) - k}$

Таблица 17 – Доверительные границы для параметров логарифмически нормального закона распределения

Планы наблюдений	Формулы для определения двусторонних границ параметров m_l и σ_l с доверительной вероятностью β			
	Нижняя граница m_{lH}	Верхняя граница m_{lB}	Нижняя граница σ_{lH}	Верхняя граница σ_{lB}
[NUN]	$m_l^* - t_{\beta, N-1} \frac{\sigma_l^*}{\sqrt{N}}$	$m_l^* + t_{\beta, N-1} \frac{\sigma_l^*}{\sqrt{N}}$	$\sigma_l^* \sqrt{\frac{N-1}{\chi_{\frac{1-\beta}{2}, N-1}^2}}$	$\sigma_l^* \sqrt{\frac{N-1}{\chi_{\frac{1+\beta}{2}, N-1}^2}}$
[NUT] [Nur]	$m_l^* - Z_{\beta} \frac{\sigma_l^*}{\sqrt{N}} \sqrt{f_2(K)}$	$\sigma_l^* \sqrt{\frac{N-1}{\chi_{\frac{1+\beta}{2}, N-1}^2}}$	$\sigma_l^* - Z_{\beta} \frac{\sigma_l^*}{\sqrt{N}} \sqrt{f_3(K)}$	$\sigma_l^* + Z_{\beta} \frac{\sigma_l^*}{\sqrt{N}} \sqrt{f_3(K)}$

Таблица 18 - Значения коэффициентов K ; $f_1(K)$; $f_2(K)$; $f_3(K)$

K	$f_1(K)$	$f_2(K)$	$f_3(K)$
-2,0	2,373	1,003	0,519
-1,9	2,285	1,004	0,524
-1,8	2,197	1,005	0,530
-1,7	2,110	1,006	0,537
-1,6	2,024	1,009	0,546
-1,5	1,939	1,011	0,556
-1,4	1,854	1,015	0,568
-1,3	1,770	1,019	0,583
-1,2	1,688	1,025	0,600
-1,1	1,606	1,032	0,620
-1,0	1,525	1,042	0,643
-0,9	1,446	1,054	0,671
-0,8	1,376	1,069	0,702
-0,7	1,290	1,089	0,740
-0,6	1,215	1,114	0,783
-0,5	1,141	1,147	0,833
-0,4	1,069	1,189	0,891
-0,3	0,998	1,243	0,959
-0,2	0,929	1,312	1,039
-0,1	0,868	1,401	1,132
0,0	0,790	1,517	1,241
0,1	0,735	1,667	1,370
0,2	0,675	1,863	1,523
0,3	0,617	2,119	1,704
0,4	0,562	2,458	1,919
0,5	0,509	2,898	2,178
0,6	0,459	3,473	2,488
0,7	0,412	4,241	2,863
0,8	0,368	5,261	3,319
0,9	0,326	6,623	3,876
1,0	0,288	8,448	4,561
1,1	0,252	10,900	5,408
1,2	0,219	14,220	6,462
1,3	0,190	18,730	7,780
1,4	0,163	24,890	9,442
1,5	0,139	33,340	11,550
1,6	0,117	44,590	14,240
1,7	0,098	51,130	17,240
1,8	0,082	83,640	22,190
1,9	0,068	115,200	28,050
2,0	0,055	159,700	35,740

Таблица 19 – Значения Гамма-функции $\Gamma(x)$

x	$\Gamma(x)$	x	$\Gamma(x)$	x	$\Gamma(x)$	x	$\Gamma(x)$	x	$\Gamma(x)$	x	$\Gamma(x)$
0,30	2,992	0,32	2,796	0,34	2,624	0,36	2,473	0,38	2,338	0,40	2,218
0,42	2,110	0,44	2,013	0,46	1,925	0,48	1,845	0,50	1,772	0,52	1,706
0,54	1,645	0,56	1,589	0,58	1,537	0,60	1,489	0,62	1,445	0,64	1,404
0,66	1,366	0,68	1,331	0,70	1,298	0,72	1,267	0,74	1,239	0,76	1,212
0,78	1,187	0,80	1,164	0,82	1,142	0,84	1,122	0,86	1,103	0,88	1,085
0,90	1,069	0,92	1,053	0,94	1,038	0,96	1,025	0,98	1,012	1,00	1,000
1,02	0,989	1,04	0,978	1,06	0,969	1,08	0,960	1,10	0,951	1,12	0,944
1,14	0,936	1,16	0,930	1,18	0,924	1,20	0,918	1,22	0,913	1,24	0,909
1,26	0,904	1,28	0,901	1,30	0,897	1,32	0,895	1,34	0,892	1,36	0,890
1,38	0,889	1,40	0,887	1,42	0,886	1,44	0,886	1,46	0,886	1,48	0,886
1,50	0,886	1,52	0,887	1,54	0,888	1,56	0,890	1,58	0,891	1,60	0,894
1,62	0,896	1,64	0,899	1,66	0,902	1,68	0,905	1,70	0,909	1,72	0,913
1,74	0,917	1,76	0,921	1,78	0,926	1,80	0,931	1,82	0,937	1,84	0,943
1,86	0,949	1,88	0,955	1,90	0,962	1,92	0,969	1,94	0,976	1,96	0,984
1,98	0,992	2,00	1,000	2,02	1,009	2,04	1,018	2,06	1,027	2,08	1,037
2,10	1,046	2,12	1,057	2,14	1,068	2,16	1,079	2,18	1,090	2,20	1,102
2,22	1,114	2,24	1,127	2,26	1,140	2,28	1,153	2,30	1,167	2,32	1,181
2,34	1,196	2,36	1,211	2,38	1,226	2,40	1,242	2,42	1,259	2,44	1,276
2,46	1,293	2,48	1,311	2,50	1,329	2,52	1,348	2,54	1,368	2,56	1,388
2,58	1,408	2,60	1,430	2,62	1,451	2,64	1,474	2,66	1,497	2,68	1,520
2,70	1,545	2,72	1,570	2,74	1,595	2,76	1,622	2,78	1,649	2,80	1,676
2,82	1,705	2,84	1,734	2,86	1,765	2,88	1,796	2,90	1,827	2,92	1,860
2,94	1,894	2,96	1,928	2,98	1,964	3,00	2,000				

Учебное издание

**РАСЧЕТ БЕЗОТКАЗНОСТИ ИЗДЕЛИЙ
АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ**

Методические указания

Составитель
Кочуров Валерий Алексеевич

В авторской редакции

Подписано в печать 23.11.03. Формат 60 × 84 1/16.

Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 1,8. Усл. кр.-отт. 1,9. Уч.-изд. л. 2,0.

Тираж 50 экз. Заказ .

Самарский государственный аэрокосмический
университет имени академика С.П. Королёва.
443086 г. Самара, Московское шоссе, 34.

РИО Самарского государственного аэрокосмического
университета. 443001, Самара, ул. Молодогвардейская, 151.

