



Кафедра
«ЛОКОМОТИВЫ»

TRIBO-
FATIGUE

ОСНОВЫ ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ КУРС ЛЕКЦИЙ

НАДЕЖНОСТЬ
TRIBO-
ФАТИГА

Л. А. Сосновский
В. В. Комиссаров
Е. С. Таранова

WEAR

Литература: Надежность. Риск. Качество / Л. А. Сосновский [и др.] ; науч. ред. Л. А. Сосновский. – Гомель : БелГУТ, 2012. – 358 с.

Гомель • 2019



Основная:

1. **Сосновский, Л.А.** Элементы теории вероятностей, математической статистики и теории надёжности / Л.А. Сосновский. – Гомель; БелГУТ, 1994. – 146 с. (в НТБ БелГУТа).
2. **Шевченко Д.Н.** Основы теории надежности : учеб.-методич. пособие для студ. техн. спец./ Д. Н. Шевченко; под ред. Л.А. Сосновского. – Гомель: БелГУТ, 2010. – 250 с. (в НТБ БелГУТа)
3. **Богданович А.В.** Оценка основных показателей надежности и риска невозстанавливаемых изделий / А.В. Богданович, О.М. Еловой, Л.А. Сосновский. – Гомель : БелГУТ, 1995 г. – 95 с. (в НТБ БелГУТа)

Дополнительная:

- Надежность. Риск. Качество / Л. А. Сосновский [и др.] ; науч. ред. Л. А. Сосновский. – Гомель : БелГУТ, 2012. – 358 с.
1. **Сосновский, Л.А.** Вероятностные методы расчета на прочность при линейном и сложном напряженных состояниях в 2-х частях: Метод. указания по изучению курса «Сопротивление материалов»/ Л.А. Сосновский. – Гомель: БелИИЖТ, 1984. – 74с. (в НТБ БелГУТа).
 2. **Сосновский, Л.А.** L-риск (механотермодинамика необратимых повреждений) / Л.А. Сосновский. – Гомель: БелГУТ, 2004. – 317 с.
 3. **Сосновский, Л.А.** Комплексная оценка надежности силовых систем по критериям сопротивления усталости и износостойкости (основы трибофатики): Метод. указания по изучению курса «Надежность транспортных систем, машин и сооружений» для студентов транспортных вузов / Л.А. Сосновский. – Гомель: БелИИЖТ, 1988. –56 с. (в НТБ БелГУТа).
 4. **Богданович, А.В.** Оценка надежности простого коленчатого вала. Надежность по критериям трибофатики: Пособие по курсу «Основы теории надежности» / А.В. Богданович, О.М. Еловой, Л.А. Сосновский. – Гомель: БелГУТ, 2002. – Ч.2.–30 с. (в методическом кабинете кафедры – 5 экз.).
 5. **Сосновский, Л.А.** Показатель безопасности и оперативная характеристика риска / Л.А. Сосновский. – Гомель, БелИИЖТ, 1991. (в НТБ БелГУТа).




ПЛАН ЛЕКЦИЙ

3

Лекция 1. Надежность в технике. Основные понятия

Отказы и их причины. Статистический анализ

Лекция 2. Концепция риска. Оценка безопасности



НАДЕЖНОСТЬ В ТЕХНИКЕ
(основные понятия).

ОТКАЗЫ И ИХ ПРИЧИНЫ.
СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ



Надежность – свойство объекта сохранять во времени и в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, ремонтов, хранения и транспортирования

Объект – техническое изделие определенного целевого назначения, рассматриваемое в периоды проектирования, производства, испытаний и эксплуатации.

Объектами могут быть различные системы и их элементы.

Система – совокупность совместно действующих элементов, предназначенная для самостоятельного выполнения заданных функций.

Элемент – простейшая составная часть изделия, в задачах надежности может состоять из многих деталей.



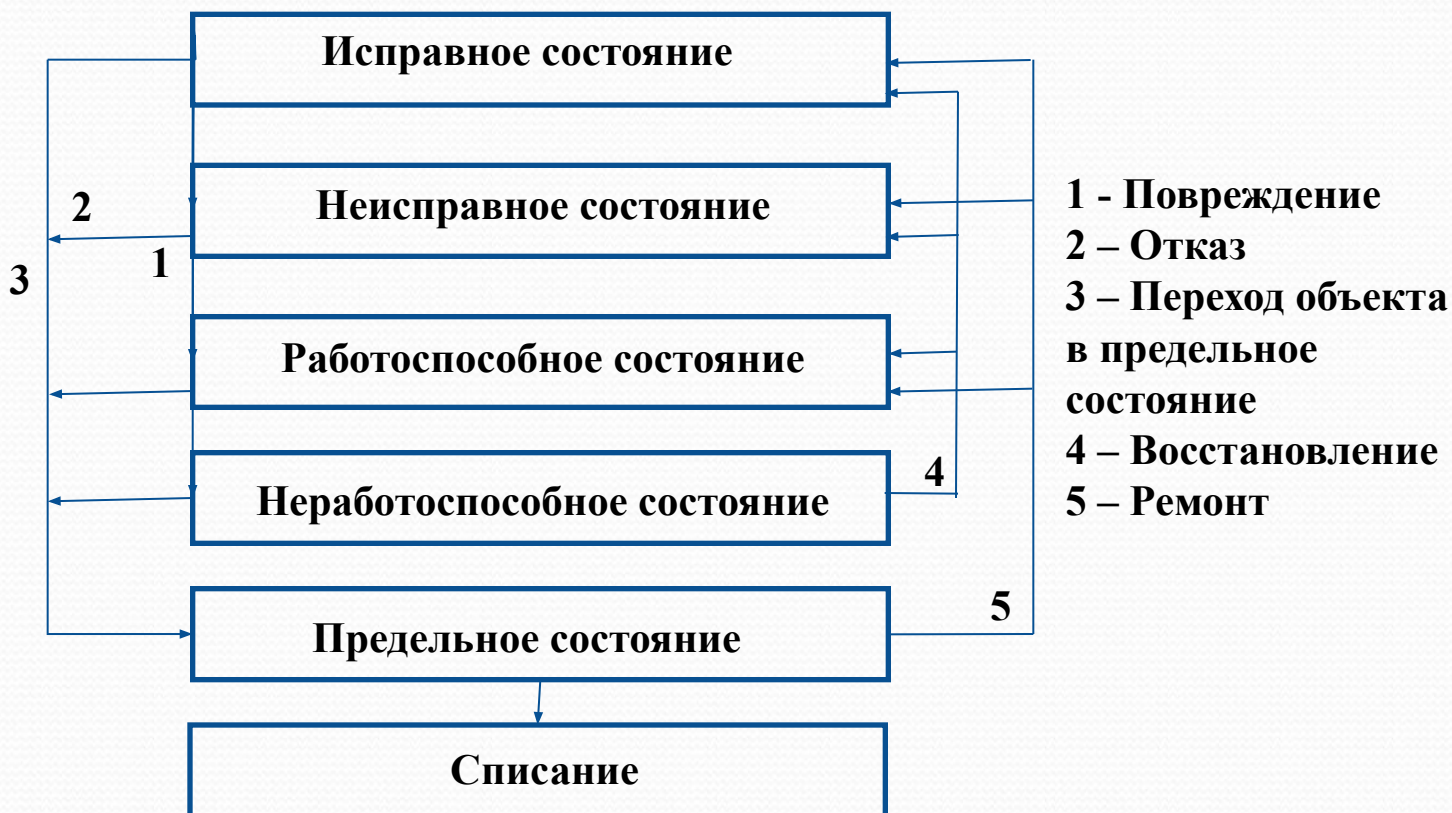
СОСТОЯНИЯ ОБЪЕКТОВ



Понятие	Определение
Исправное состояние	Состояние объекта, при котором он соответствует всем требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации
Неисправное состояние	Состояние объекта, при котором он не соответствует хотя бы одному из требований нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации
Работоспособное состояние	Состояние объекта, при котором значения всех параметров, характеризующих способность выполнять заданные функции, соответствуют требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации
Неработоспособное состояние	Состояние объекта, при котором значение хотя бы одного параметра, характеризующего способность выполнять заданные функции, не соответствует требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации
Предельное состояние	Состояние объекта, при котором его дальнейшее применение по назначению недопустимо или нецелесообразно, либо восстановление его исправного или работоспособного состояния невозможно или нецелесообразно
Критерий предельного состояния	Признак или совокупность признаков предельного состояния объекта, установленные нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документацией



ВЗАИМОСВЯЗЬ ОСНОВНЫХ СОСТОЯНИЙ ОБЪЕКТА



ВОПРОСЫ:

1. Может ли быть объект исправным, но неработоспособным?
2. Может ли быть объект работоспособным, но неисправным?



Понятие	Определение
Повреждение	Событие, заключающееся в нарушении исправного состояния объекта при сохранении работоспособного состояния
Отказ	Событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния объекта

Надежность – наука об отказах

Безотказность	Свойство объекта непрерывно сохранять работоспособность (т. е. не иметь отказов) в течение некоторого времени или некоторой наработки
Долговечность	Свойство объекта сохранять работоспособное состояние до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания
Ремонтопригодность	Свойство объекта, заключающееся в приспособленности к предупреждению и обнаружению причин возникновения отказов, повреждений и поддержанию и восстановлению работоспособного состояния путем проведения технического обслуживания и ремонта
Сохраняемость	Свойство объекта сохранять значение показателей безотказности, долговечности и ремонтпригодности в течение и после хранения и (или) транспортирования
Показатели надежности	Количественная характеристика одного или нескольких свойств надежности



ИНТЕГРАЛЬНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ



<i>Понятие</i>	<i>Определение</i>
Наработка	Продолжительность или объем работы объекта
Наработка до отказа	Наработка объекта от начала его эксплуатации до возникновения первого отказа
Технический ресурс	Наработка объекта от начала его эксплуатации или ее возобновления после ремонта определенного вида до перехода в предельное состояние
Срок службы	Календарная продолжительность от начала эксплуатации объекта или ее возобновления после ремонта определенного вида до перехода в предельное состояние

ВОПРОС:

Что больше – технический ресурс или срок службы?



ПОКАЗАТЕЛИ БЕЗОТКАЗНОСТИ



Понятие	Определение
Вероятность безотказной работы	Вероятность того, что в пределах заданной наработки отказ объекта не возникает
Средняя наработка до отказа	Математическое ожидание наработки объекта до первого отказа
Гамма-процентная наработка до отказа	Наработка, в течение которой отказ объекта не возникает, с вероятностью γ , выраженной в процентах
Средняя наработка на отказ	Отношение наработки восстанавливаемого объекта к математическому ожиданию числа его отказов в течение этой наработки
Интенсивность отказов	Условная плотность вероятности возникновения отказа невосстанавливаемого объекта, определяемая для рассматриваемого момента времени при условии, что до того момента отказ не возник
Параметр потока отказов	Показатель надежности восстанавливаемых изделий, равный отношению среднего числа отказов восстанавливаемого объекта за произвольную малую его наработку к значению этой наработки (соответствует интенсивности отказов для неремонтируемых изделий, но включает повторные отказы)



<i>Понятие</i>	<i>Определение</i>
Средний ресурс	Математическое ожидание ресурса
Гамма-процентный ресурс	Наработка, в течение которой объект не достигнет предельного состояния, с заданной вероятностью γ , выраженной в процентах
Назначенный ресурс	Суммарная наработка объекта, при достижении которой применение по назначению должно быть прекращено
Средний срок службы	Математическое ожидание срока службы
Гамма-процентный срок службы	Календарная продолжительность от начала эксплуатации объекта, в течение которой он не достиг предельного состояния с заданной вероятностью γ , выраженной в процентах
Назначенный срок службы	Календарная продолжительность эксплуатации объекта, при достижении которой применение по назначению должно быть прекращено



ПОКАЗАТЕЛИ РЕМОНТОПРИГОДНОСТИ И СОХРАНЯЕМОСТИ



Понятие

Определение

ПОКАЗАТЕЛИ РЕМОНТОПРИГОДНОСТИ

Вероятность восстановления работоспособного состояния	Вероятность того, что время восстановления работоспособного состояния объекта не превысит заданного
Среднее время восстановления работоспособного состояния	Математическое ожидание времени восстановления работоспособного состояния

Понятие

Определение

ПОКАЗАТЕЛИ СОХРАНЯЕМОСТИ

Средний срок сохраняемости	Математическое ожидание срока сохраняемости
Гамма-процентный срок сохраняемости	Срок сохраняемости, достигаемый объектом с заданной вероятностью γ , выраженной в процентах



КОМПЛЕКСНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ

13

Понятие	Определение
Коэффициент Готовности	Вероятность того, что объект окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени, кроме планируемых периодов, в течение которых применение объекта по назначению не предусматривается
Коэффициент оперативной Готовности	Вероятность того, что объект окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени, кроме планируемых периодов, в течение которых применение объекта по назначению не предусматривается, и, начиная с этого момента, будет работать безотказно в течение заданного интервала времени
Коэффициент технического использования	Отношение математического ожидания интервалов времени пребывания объекта в работоспособном состоянии за некоторый период эксплуатации к сумме математических ожиданий интервалов времени пребывания объекта в работоспособном состоянии, простоев, обусловленный техническим обслуживанием, и ремонтов за тот же период эксплуатации
Коэффициент планируемого применения	Доля периода эксплуатации, в течение которой объект не должен находиться в плановом техническом обслуживании и ремонте
Коэффициент сохранения эффективности	Отношение значения показателя эффективности за определенную продолжительность эксплуатации к номинальному значению этого показателя, вычисленного при условии, что отказы объекта в течении того же периода эксплуатации не возникают



ОТКАЗЫ И ИХ ПРИЧИНЫ. СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ



КЛАССИФИКАЦИЯ ОТКАЗОВ



Признак классификации	Вид отказа	Примеры
по характеру развития и проявления	а) внезапные	поломки от перегрузки, заедания; сгорание предохранителя; поломка рельса
	б) постепенные	износ, старение, коррозия, залипание
	в) постепенные по развитию и внезапные по появлению	усталостное разрушение, перегорание ламп, короткие замыкания из-за старения изоляции
по последствиям	а) легкие	легко устранимые
	б) средние	не вызывают отказ других узлов
	в) тяжелые	тяжелые вторичные разрушения, в том числе и с человеческими жертвами
по возможности дальнейшего использования	а) полный отказ	исключает возможность работы изделия до устранения отказа
	б) частичный	изделие может частично использоваться, например, с неполной мощностью, или на пониженных оборотах
по времени возникновения	а) приработочные	обусловленные, например, деформациями при изготовлении
	б) при нормальной (штатной) эксплуатации	обусловленные, например, накоплением повреждений



КЛАССИФИКАЦИЯ ОТКАЗОВ



Признак классификации	Вид отказа	Примеры
по причине возникновения	а) конструкционные	обусловленные ошибками при конструировании
	б) производственные	условия изготовления, сварки, технического обслуживания
	в) эксплуатационные	обусловлены нарушением установленных правил эксплуатации и текущего содержания
по закономерностям возникновения	а) случайные	непредусмотренные перегрузки, дефекты материала и погрешности изготовления, не обнаруженные контролем; ошибки обслуживающего персонала или сбои системы управления
	б) систематические	закономерные явления, вызывающие постепенное накопление повреждений: влияние среды, времени, температуры, облучения, коррозия, старение, нагрузки и работа трения, усталость, ползучесть, износ, засорения, залипания, утечки



ОСНОВНЫЕ ПРИЧИНЫ ОТКАЗОВ



Виды разрушений	Характерные признаки предельного состояния	Наименование деталей машин, подвергающихся данному разрушению
1. Статическое разрушение	Хрупкое разрушение, хрупкий излом	Сварные соединения, фасонные детали, болты, валики, пальцы, чугунные отливки
2. Малоцикловая усталость	Вязкий излом, достижение допустимой величины пластической деформации	Корпусные детали, зубчатые колеса, валы, оси, пружины, бандажи, рельсы, сосуды, подшипники скольжения
3. Многоцикловая усталость	Усталостная трещина, усталостный излом, критическая глубина или плотность ямок выкрашивания	Корпусные детали, зубчатые колеса, подшипники качения, валы, оси, пружины, шатуны, болты, сварные соединения, рельсы, бандажи колес
4. Ползучесть	Достижение допустимой величины пластической деформации	Детали энергетического оборудования, работающие в условиях повышенных температур
5. Износ	Достижение износом нормативной величины, нарушение условий смазки, схватывание	Резьбовые соединения, зубчатые колеса, подшипники скольжения, валы, оси, направляющие, кулисы, цепные и зубчатые передачи, поршневые кольца, втулки, лемехи, лапы культиваторов, гусеницы, пескометы, фрикционы, шпоночные соединения и другие детали машин
6. Коррозия, эрозия	Превышение допустимого изменения массы, толщины металла; образование критической плотности каверн, язв; превышение допустимой глубины коррозионного повреждения	Направляющие и лопатки газотурбинных установок, трубы паровых котлов, элементы трубопроводов, гребные винты, рабочие камеры гидротурбин, кабины, кузова, котельные установки, детали насосов, латунные, дюралюминиевые, магниевые сплавы и др.
7. Старение	Недопустимое необратимое изменение физико-механических свойств материалов деталей (потеря прочности, твердости, пластичности, эластичности и др.)	Элементы и детали из полимеров, резинотехнические изделия, уплотнения, полупроводники



КЛАССИФИКАЦИЯ ОБЪЕКТОВ ПО ПОСЛЕДСТВИЯМ ОТКАЗА



Отказ	Последствия отказа	Допустимая вероятность безотказной работы	Тип изделий
Тяжелые (катастрофические)	Авария Катастрофа Невыполнение ответственного задания	$Q(t) \rightarrow 1$	Летательные аппараты Подъемно-транспортные машины Военная техника Машины химического производства Медицинское оборудование
Средние (экономический ущерб)	Повышенные простои в ремонте Работа на пониженных режимах Работа с ухудшенными параметрами	Значительный ущерб $Q(t) \geq 0,99$ Незначительный ущерб $Q(t) \geq 0,9$	Технологическое оборудование Сельскохозяйственные Бытовые
Легкие (затраты на ремонт в пределах нормы)	Без последствий	$Q(t) \ll 0,9$	Отдельные узлы и элементы машин

Вероятность отказов $P(t) = 1 - Q(t)$



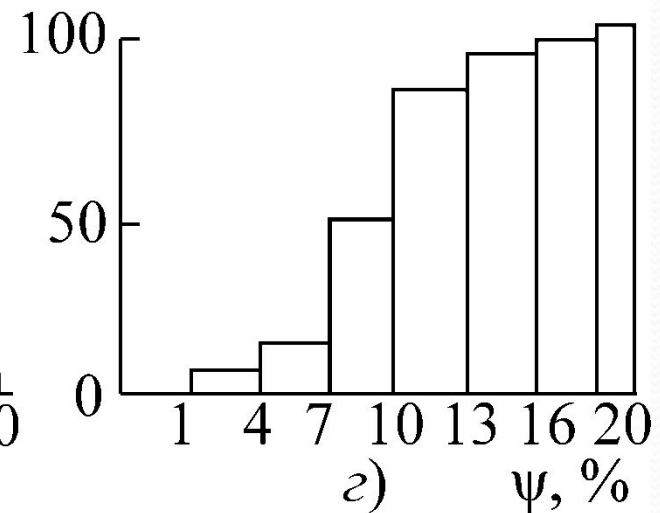
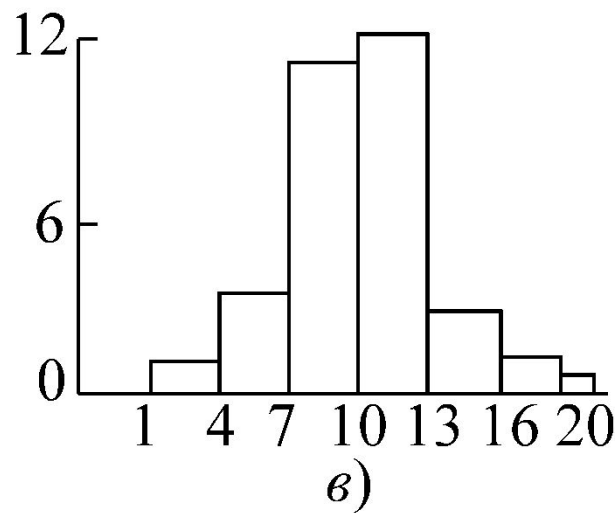
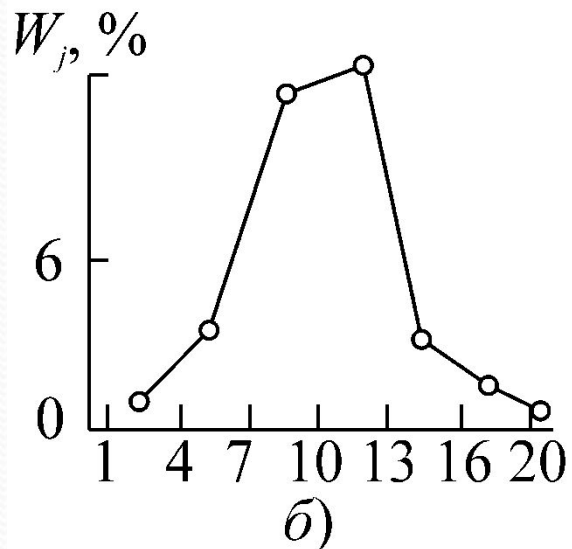
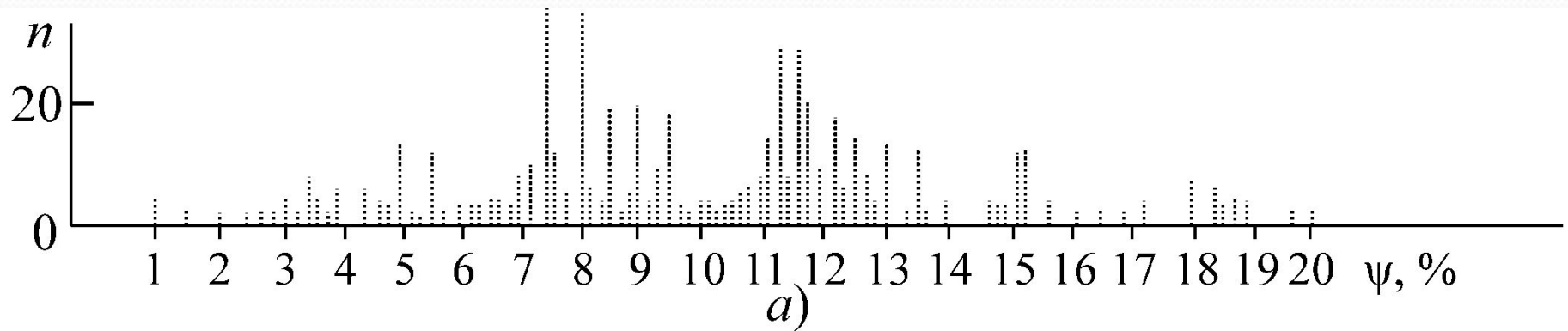
СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ: СОДЕРЖАНИЕ



1. Планирование эксперимента, в частности, установление метода получения выборок и определения их требуемого объема
2. Оценка выборочных параметров распределения и числовых характеристик случайной величины
3. Выбор математико-статистической модели для описания рассеяния результатов испытания. Проверка гипотез
4. Построение предварительных интервалов для оцениваемых параметров
5. Анализ статистических связей
 - ковариация;
 - коэффициент корреляции Пирсона;
 - ранговый коэффициент корреляции Спирмена;
 - регрессионный анализ;
 - дисперсионный анализ;
 - проверка научных гипотез



ГРАФИЧЕСКОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ СТАТИСТИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ





ЧИСЛОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СЛУЧАЙНОЙ ВЕЛИЧИНЫ



Наименование	Формулы	
	$n < 50$	$n > 50$
Среднее значение	$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$	$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^m x_j n_j$
Дисперсия	$D(x) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_i)^2$	$D(x) = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^m n_j (x_j - \bar{x}_j)^2$
Среднее квадратическое отклонение	$S_x = k \sqrt{D(x)}$	$S_x = \sqrt{D(x)}$
Коэффициент вариации	$v_x = S_x / \bar{x}$	$v_x = S_x / \bar{x}$
Размах распределения	$R_x = x_n - x_1$	$R_x = x_{\max} - x_{\min}$
Начальные моменты распределения	$\left. \begin{aligned} h_1 &= \bar{x}, & h_2 &= \frac{1}{n} \sum_{j=1}^m x_j^2 n_j, \\ h_3 &= \frac{1}{n} \sum_{j=1}^m x_j^3 n_j, & h_4 &= \frac{1}{n} \sum_{j=1}^m x_j^4 n_j \end{aligned} \right\}$	
Центральные моменты	$\left. \begin{aligned} m_3 &= h_3 - 3h_2 h_1 + 2h_1^3, \\ m_4 &= h_4 - 4h_3 h_1 + 6h_2 h_1^2 - 3h_1^4 \end{aligned} \right\}$	
Показатель асимметрии	$a_k = m_3 / S_x^3$	
Показатель эксцесса	$E_k = \frac{m_4}{S_x^4} - 3$	



ОСНОВНЫЕ ЗАКОНЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ

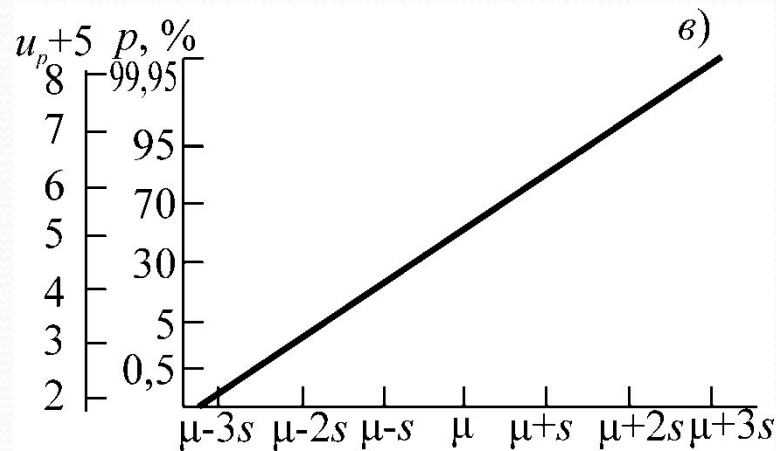
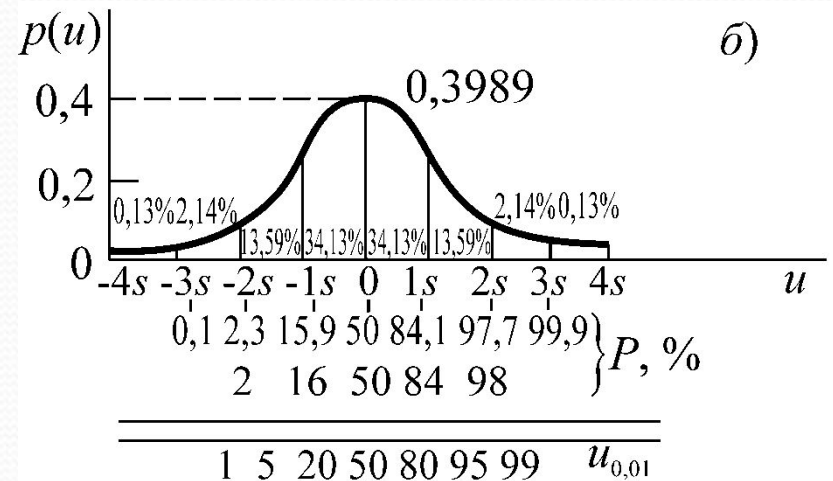
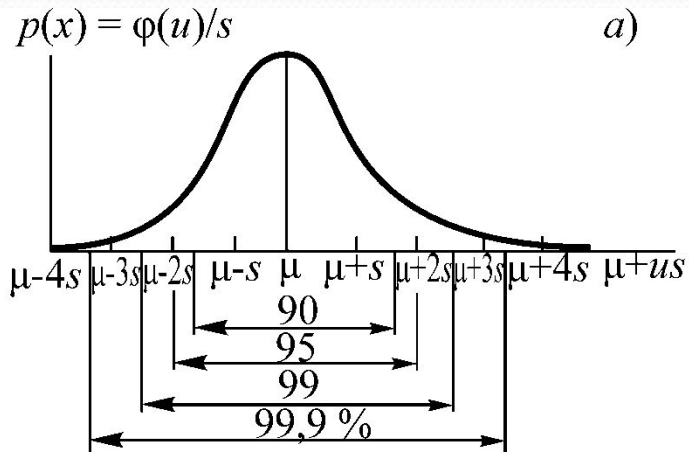


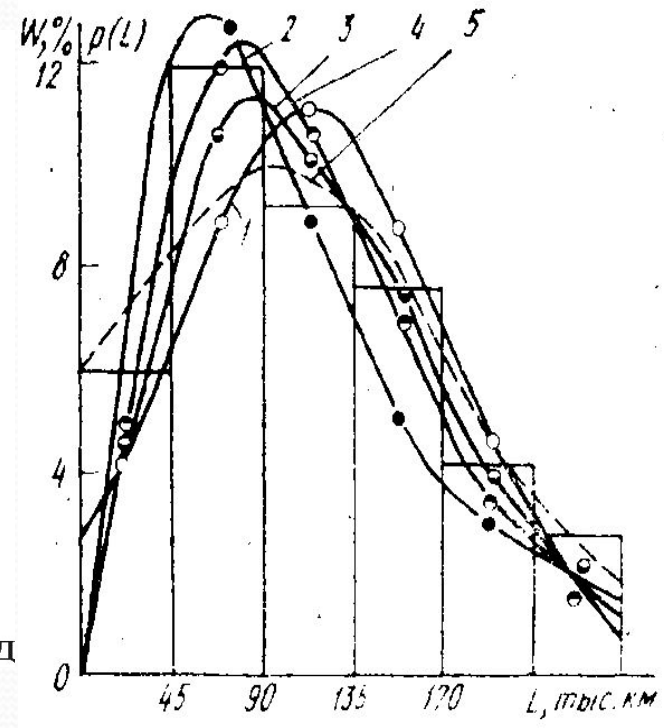
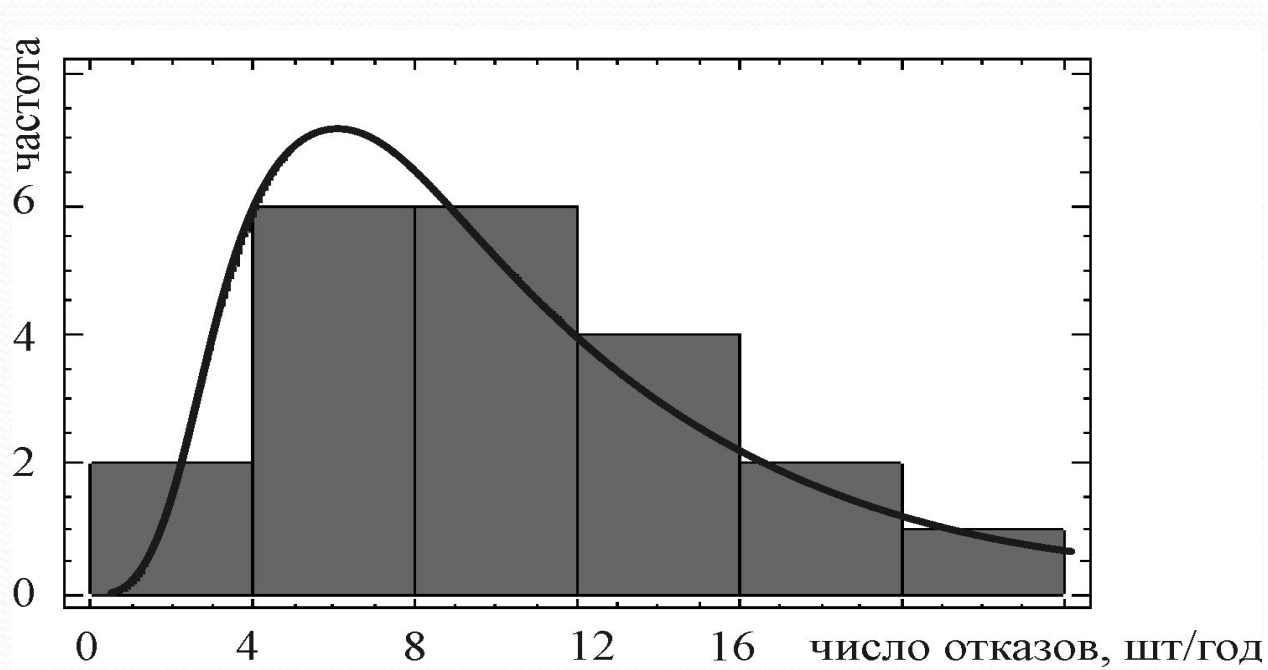
Наименование распределения	Плотность распределения	Параметры
Нормальное	$p(x) = \frac{1}{S_x \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x - \mu}{S_x} \right)^2 \right],$ $-\infty \leq x \leq +\infty$	$\mu, S_x > 0$ – среднее значение и среднее квадратическое отклонение
Усеченное нормальное	$p(x) = \frac{1}{S_x \sqrt{2\pi} (1-C)} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x - \mu}{S_x} \right)^2 \right],$ $x \geq a, \quad C = \int_{-\infty}^a f(x) dx$	$\mu, S_x > 0$
Логарифмически нормальное	$p(\ln x) = \frac{1}{S_{\ln x} \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln x - \mu}{S_{\ln x}} \right)^2 \right],$ $-\infty \leq x \leq +\infty$	$\mu = \overline{\ln x},$ $S_{\ln x} > 0$
Вейбулла	$p(x) = \frac{\eta}{\lambda} \left(\frac{x-C}{\lambda} \right)^{\eta-1} \exp \left[-\left(\frac{x-C}{\lambda} \right)^\eta \right], \quad x \geq C$	$\lambda > 0$ – параметр масштаба; $\eta > 0$ – параметр формы; $C > 0$
Гамма	$p(x) = \frac{\lambda^\eta}{\Gamma(\eta)} x^{\eta-1} \exp(-\lambda x), \quad x \geq 0,$ $\Gamma(\eta)$ – гамма-функция	$\eta > 0;$ $\lambda > 0$
Экспоненциальное	$p(x) = \lambda \exp(-\lambda x), \quad x \geq 0$	$\lambda > 0$



НОРМАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ

$$P(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2S^2}} dx = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\frac{x-\mu}{S}} e^{-u^2/2} du = \Phi\left(\frac{x-\mu}{S}\right),$$





**Отказы рельсов Минского метро:
общее количество 2000 шт.**



ДОПОЛНЕНИЯ



ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ И ОСОБЕННОСТИ ТИПИЧНЫХ ОДНОМЕРНЫХ РАСРЕДЕЛЕНИЙ

Распределение	Применение	Примеры	Примечание
Нормальное распределение	Основное распределение математической статистики. Многие применения обусловлены центральной предельной теоремой (распределение среднего n независимых случайных величин, распределенных по любому закону или даже имеющих до n различных распределений с конечными математическим ожиданием и дисперсией, при $n \rightarrow \infty$ приближается к нормальному). Вследствие этого нормальное распределение является приемлемой моделью для многих (но не для всех) физических явлений. Многие методы статистического анализа основаны на допущении о нормальном распределении. Распределение случайных величин, появляющихся как результат не большого воздействия многих независимых факторов. Область изменения нормально распределенной случайной величины ($-\infty \leq x \leq +\infty$)	Распределение пределов текучести, прочности, выносливости, твердости; размеров изделия; циклической долговечности при относительно высоких напряжениях. Распределение инструментальных ошибок. Используется для генерирования случайных чисел, распределенных по нормальному закону	Имеются таблицы интегральной функции распределения и нормированной плотности вероятностей
Усеченное нормальное распределение	Модель применима к выборке из нормальной совокупности, из которой первоначально были изъяты все элементы, меньшие некоторых заданных предельных значений	Распределение логарифма циклической долговечности, предельных напряжений, если выборка производится с отбрасыванием значений, меньших, чем требуется нормативным документом	Частный случай нормального распределения



ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ И ОСОБЕННОСТИ ТИПИЧНЫХ ОДНОМЕРНЫХ РАСРЕДЕЛЕНИЙ

27

Распределение	Применение	Примеры	Примечание
Логарифмическое и нормальное распределение	Позволяет описать случайные величины, логарифм которых распределен по нормальному закону. Модель для процесса, появляющегося в результате большого числа небольших мультипликативных ошибок. Применимо, когда наблюдаемое значение случайной величины составляет случайную долю ранее наблюдаемого явления	Распределение циклической долговечности, распределение времени безотказной работы некоторых изделий	
Экспоненциальное распределение	Распределение времени между независимыми событиями, появляющимися с постоянной интенсивностью. Распределение времени безотказной работы при постоянной интенсивности отказов. Вследствие этого широко применяется во многих (но не во всех) задачах теории надежности	Распределение времени безотказной работы сложных нерезервированных систем и времени использования некоторых компонентов, когда они, в частности, подвергаются начальной приработке, а профилактическое обслуживание позволяет заменять детали до полного износа	Частный случай распределения Вейбулла, гамма-распределения
Распределение Вейбулла	Общее распределение времени безотказной работы при разнообразных интенсивностях отказов. Распределение экстремальных значений для минимальных элементов, взятых из n значений, имеющих распределение, ограниченное слева	Распределение времени безотказной работы для ряда деталей, шариковых подшипников и др.	Частными случаями являются экспоненциальное распределение, рэлеевское распределение. Имеются таблицы интегральной функции распределения и плотности вероятностей
Гамма-распределение	Основное распределение математической статистики для случайных величин, ограниченных с одной стороны, например, $0 \leq x < \infty$. Описывает время, необходимое для появления ровно η , независимых событий при условии появления событий с постоянной интенсивностью λ . Часто используется в теории надежности, теории массового обслуживания	Распределение времени безотказной работы системы с резервными элементами; распределение времени между повторными калибровками прибора, требующего повторной калибровки после пользования им η раз. Распределение времени безотказной работы, если система выходит из строя, когда в ней произойдет η независимых частичных отказов, имеющих постоянную интенсивность λ	Имеются таблицы интегральной функции распределения. Частными случаями являются: распределения экспоненциальное, хи-квадрат, Эрланга



ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ И ОСОБЕННОСТИ ТИПИЧНЫХ ОДНОМЕРНЫХ РАСРЕДЕЛЕНИЙ

28

Распределение	Применение	Примеры	Примечание
Бета-распределение	Основное распределение математической статистики для случайных величин, ограниченных с обеих сторон ($0 \leq x \leq 1$), например, распределение доли совокупности, заключенной между наименьшим и наибольшим значениями выборки. Применяется во многих областях при решении как теоретических, так и практических задач	Распределение доли совокупности, заключенной между наименьшим и наибольшим значениями выборки. Распределение суточного производства продукции на промышленном предприятии. Распределение времени до завершения работы	Имеются таблицы интегральной функции распределения. Частными случаями являются: равномерное, треугольное, параболическое распределения
Равномерное распределение	Дает вероятность того, что наблюдение будет лежать в определенном интервале, когда вероятность того, что наблюдение принадлежит данному интервалу, прямо пропорциональна его длине	Используется для генерирования случайных чисел	Частный случай бета-распределения
Рэлеевское распределение	Распределение радиальной ошибки, когда ошибки по двум взаимно перпендикулярным осям взаимно независимы и нормально распределены относительно нуля с одинаковыми дисперсиями	Задачи прицеливания при бомбометании. Амплитуда огибающей шума при использовании линейного детектора	Частный случай распределения Вейбулла
Распределение Коши	Распределение отношения двух независимых нормированных нормальных случайных величин	Распределение отношения нормированных отсчетов шума	Распределение не имеет конечных моментов
Распределение экстремальных значений	Распределение минимального или максимального значения в выборке, взятой из совокупности, имеющей некоторое исходное распределение	Распределение предела прочности для некоторых материалов. Распределение силы порывов ветра, встречаемые самолетами. Модель для времени безотказной работы цепи, состоящей из большого числа последовательно соединенных элементов, при условии, что длительности их работы – независимые случайные величины, распределенные по нормальному закону с одинаковыми параметрами	Имеются таблицы интегральной функции распределения



ТАБЛИЦА НОРМИРОВАННОЙ ФУНКЦИИ НОРМАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ



$$\Phi(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^u e^{-u^2/2}$$

	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09
.0	.5000	.5040	.5080	.5120	.5160	.5199	.5239	.5279	.5319	.5359
.1	.5398	.5438	.5478	.5517	.5557	.5596	.5636	.5675	.5714	.5753
.2	.5793	.5832	.5871	.5910	.5948	.5987	.6026	.6064	.6103	.6141
.3	.6179	.6217	.6255	.6293	.6331	.6368	.6406	.6443	.6480	.6517
.4	.6554	.6591	.6628	.6664	.6700	.6736	.6772	.6808	.6844	.6879
.5	.8915	.6950	.6985	.7019	.7054	.7088	.7123	.7157	.7190	.7224
.6	.7257	.7291	.7324	.7357	.7389	.7422	.7454	.7486	.7517	.7549
.7	.7560	.7611	.7642	.7673	.7703	.7734	.7764	.7794	.7823	.7852
.8	.7881	.7910	.7939	.7967	.7995	.8023	.8051	.8078	.8106	.8133
.9	.8159	.8186	.8212	.8238	.8264	.8289	.8315	.8340	.8365	.8389
1.0	.8413	.8438	.8461	.8485	.8508	.8531	.8554	.8577	.8599	.8621
1.1	.8643	.8665	.8686	.8708	.8729	.8749	.8770	.8790	.8810	.8830
1.2	.8849	.8869	.8888	.8907	.8925	.8944	.8962	.8980	.8997	.90147
1.3	.90320	.90490	.90658	.90824	.90988	.91149	.91309	.91466	.91621	.91774
1.4	.91924	.92073	.92220	.92364	.92507	.92647	.92785	.92922	.93056	.93189
1.5	.93319	.93448	.93574	.93699	.93822	.93943	.94062	.94179	.94295	.94408
1.6	.94520	.94630	.94738	.94845	.94950	.95053	.95154	.95254	.95352	.95449
1.7	.95543	.95637	.95728	.95818	.95907	.95994	.96080	.96164	.96246	.96327
1.8	.96407	.96485	.96562	.96638	.96712	.96784	.96856	.96926	.96995	.97062
1.9	.97128	.97193	.97257	.97320	.97381	.97441	.97500	.97558	.97615	.97670
2.0	.97725	.97778	.97831	.97882	.97932	.97982	.98030	.98077	.98124	.98169
2.1	.98214	.98257	.98300	.98341	.98382	.98422	.98461	.98500	.98537	.98574
2.2	.98610	.98645	.98679	.98713	.98745	.98778	.98809	.98840	.98870	.98899
2.3	.98928	.98956	.98983	.920097	.920358	.920613	.920863	.921106	.921344	.921576
2.4	.921802	.922024	.922240	.922451	.922656	.922857	.923053	.923244	.923431	.923613
2.5	.923790	.923963	.924132	.924297	.924457	.924614	.924766	.924915	.925060	.925201
2.6	.925339	.925473	.925604	.925731	.925855	.925975	.926093	.926207	.926319	.926427



ТАБЛИЦА НОРМИРОВАННОЙ ФУНКЦИИ НОРМАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ



	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09
2.7	.926533	.926636	.926736	.926833	.926928	.927020	.927110	.927197	.927282	.927365
2.8	.927445	.927523	.927599	.927673	.927744	.927814	.927882	.927948	.928012	.928074
2.9	.928134	.928193	.928250	.928305	.928359	.928411	.928462	.928511	.928559	.928605
3.0	.928650	.928694	.928736	.928777	.928817	.928856	.928893	.928930	.928965	.928999
3.1	.930324	.930646	.930957	.931260	.931553	.931836	.932112	.932378	.932636	.932868
3.2	.933129	.933363	.933590	.933810	.934024	.934230	.934429	.934623	.934810	.934991
3.3	.935166	.935335	.935499	.935658	.935811	.935959	.936103	.936242	.936376	.936505
3.4	.936631	.936752	.936869	.936982	.937091	.937197	.937299	.937398	.937493	.937585
3.5	.937674	.937759	.937842	.937922	.937999	.938074	.938146	.938215	.938282	.938347
3.6	.938409	.938469	.938527	.938583	.938637	.938689	.938739	.938787	.938834	.938879
3.7	.938922	.938964	.940039	.940426	.940799	.941158	.941504	.941838	.942159	.942568
3.8	.9 ⁴ 2765	.9 ⁴ 3052	.9 ⁴ 3327	.9 ⁴ 3593	.9 ⁴ 3848	.9 ⁴ 4094	.9 ⁴ 4331	.9 ⁴ 4558	.9 ⁴ 4777	.9 ⁴ 4988
3.9	.9 ⁴ 5190	.9 ⁴ 5385	.9 ⁴ 5573	.9 ⁴ 5753	.9 ⁴ 5926	.9 ⁴ 6092	.9 ⁴ 6253	.9 ⁴ 6406	.9 ⁴ 6554	.9 ⁴ 6696
4.0	.9 ⁴ 6833	.9 ⁴ 6964	.9 ⁴ 7090	.9 ⁴ 7211	.9 ⁴ 7327	.9 ⁴ 7439	.9 ⁴ 7546	.9 ⁴ 7649	.9 ⁴ 7748	.9 ⁴ 7843
4.1	.9 ⁴ 7934	.9 ⁴ 8022	.9 ⁴ 8106	.9 ⁴ 6186	.9 ⁴ 8263	.9 ⁴ 8338	.9 ⁴ 8409	.9 ⁴ 8477	.9 ⁴ 8542	.9 ⁴ 8605
4.2	.9 ⁴ 8665	.9 ⁴ 8723	.9 ⁴ 8778	.9 ⁴ 8832	.9 ⁴ 8882	.9 ⁴ 8931	.9 ⁴ 8978	.9 ⁵ 0226	.9 ⁵ 0655	.9 ⁵ 1066
4.3	.9 ⁵ 1460	.9 ⁵ 1837	.9 ⁵ 2199	.9 ⁵ 2545	.9 ⁵ 2876	.9 ⁵ 3193	.9 ⁵ 3497	.9 ⁵ 3788	.9 ⁵ 4066	.9 ⁵ 4332
4.4	.9 ⁵ 4587	.9 ⁵ 4831	.9 ⁵ 5065	.9 ⁵ 5288	.9 ⁵ 5502	.9 ⁵ 5706	.9 ⁵ 5902	.9 ⁵ 6089	.9 ⁵ 6268	.9 ⁵ 6439
4.5	.9 ⁵ 6602	.9 ⁵ 6759	.9 ⁵ 6908	.9 ⁵ 7051	.9 ⁵ 7187	.9 ⁵ 7318	.9 ⁵ 7442	.9 ⁵ 7561	.9 ⁵ 7675	.9 ⁵ 7784
4.6	.9 ⁵ 7888	.9 ⁵ 7987	.9 ⁵ 8081	.9 ⁵ 8172	.9 ⁵ 8258	.9 ⁵ 8340	.9 ⁵ 8419	.9 ⁵ 8494	.9 ⁵ 8566	.9 ⁵ 8634
4.7	.9 ⁵ 8699	.9 ⁵ 8761	.9 ⁵ 8821	.9 ⁵ 8877	.9 ⁵ 8931	.9 ⁵ 8983	.9 ⁵ 0320	.9 ⁶ 0789	.9 ⁶ 1235	.9 ⁶ 1661
4.8	.9 ⁶ 2067	.9 ⁶ 2453	.9 ⁶ 2822	.9 ⁶ 3173	.9 ⁶ 3508	.9 ⁶ 3827	.9 ⁶ 4131	.9 ⁶ 4420	.9 ⁶ 4696	.9 ⁶ 4958
4.9	.9 ⁶ 5208	.9 ⁶ 5446	.9 ⁶ 5673	.9 ⁶ 5889	.9 ⁶ 6094	.9 ⁶ 6289	.9 ⁶ 6475	.9 ⁶ 6652	.9 ⁶ 6821	.9 ⁶ 6981

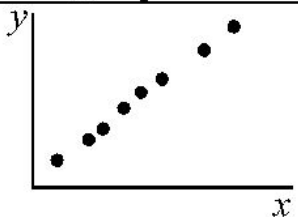
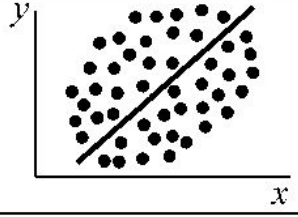
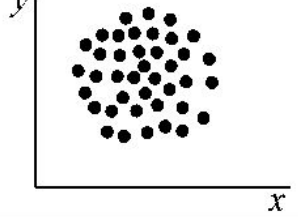
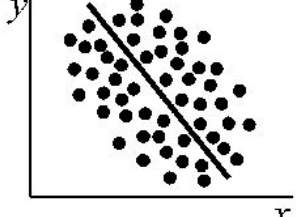
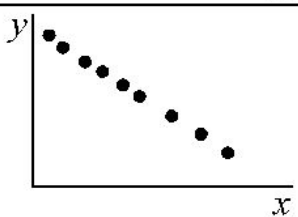
Пример:

$$\Phi(3,39) = 0,9996505; \Phi(0,98) = 0,8365.$$



ИНТЕРПРЕТАЦИЯ СВЯЗИ МЕЖДУ ДВУМЯ ПЕРЕМЕННЫМИ ФУНКЦИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ



Диаграмма	Описание линейной связи	Величина r_{xy}
	Функциональная (прямая)	+1,00
	Случайная (прямая)	Около +0,50
	Нет связи (ковариация x и y $\text{cov}_{xy} = 0$)	0,00
	Случайная (обратная)	Около -0,50
	Функциональная (обратная)	-1,00



ПАРАМЕТРЫ ЭМПИРИЧЕСКОЙ ФУНКЦИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ



Параметры эмпирических функций распределения характеристик сопротивления усталости и механических свойств крупных поковок нормализованной стали 40

Параметр	Численное значение	Параметр	Численное значение	Параметр	Численное значение
$\bar{\sigma}_0$, МПа	358	$\bar{\sigma}_{0,2}$, МПа	396	σ_b , МПа	657
$S_{\bar{\sigma}_0}$, МПа	15,4	$S_{\bar{\sigma}_{0,2}}$, МПа	41,5	$S_{\bar{\sigma}_b}$, МПа	36,8
$\sigma_{0\min}$, МПа	300	$\sigma_{0,2\min}$, МПа	310	$\sigma_{b\min}$, МПа	573
$\sigma_{0\max}$, МПа	419	$\sigma_{0,2\max}$, МПа	484	$\sigma_{b\max}$, МПа	751
R_{σ_0} , МПа	119	$R_{\sigma_{0,2}}$, МПа	174	$R_{\bar{\sigma}_b}$, МПа	178
V_{σ_0} , %	4,28	$V_{\sigma_{0,2}}$, %	10,24	V_{σ_b} , %	5,59
$\bar{\delta}$, %	23,7	$\bar{\psi}$, %	55,2	\bar{a}_H , МДж/м ²	0,795
$S_{\bar{\delta}}$, %	2,07	$S_{\bar{\psi}}$, %	6,14	$S_{\bar{a}_H}$, МДж/м ²	0,107
δ_{\min} , %	16,4	ψ_{\min} , %	38,0	$a_{H\min}$, МДж/м ²	0,565
δ_{\max} , %	31,0	ψ_{\max} , %	64,0	$a_{H\max}$, МДж/м ²	1,075
R_{δ} , %	14,6	R_{ψ} , %	26,0	R_{a_H} , МДж/м ²	0,515
V_{δ} , %	8,74	V_{ψ} , %	11,11	V_{a_H} , %	13,46

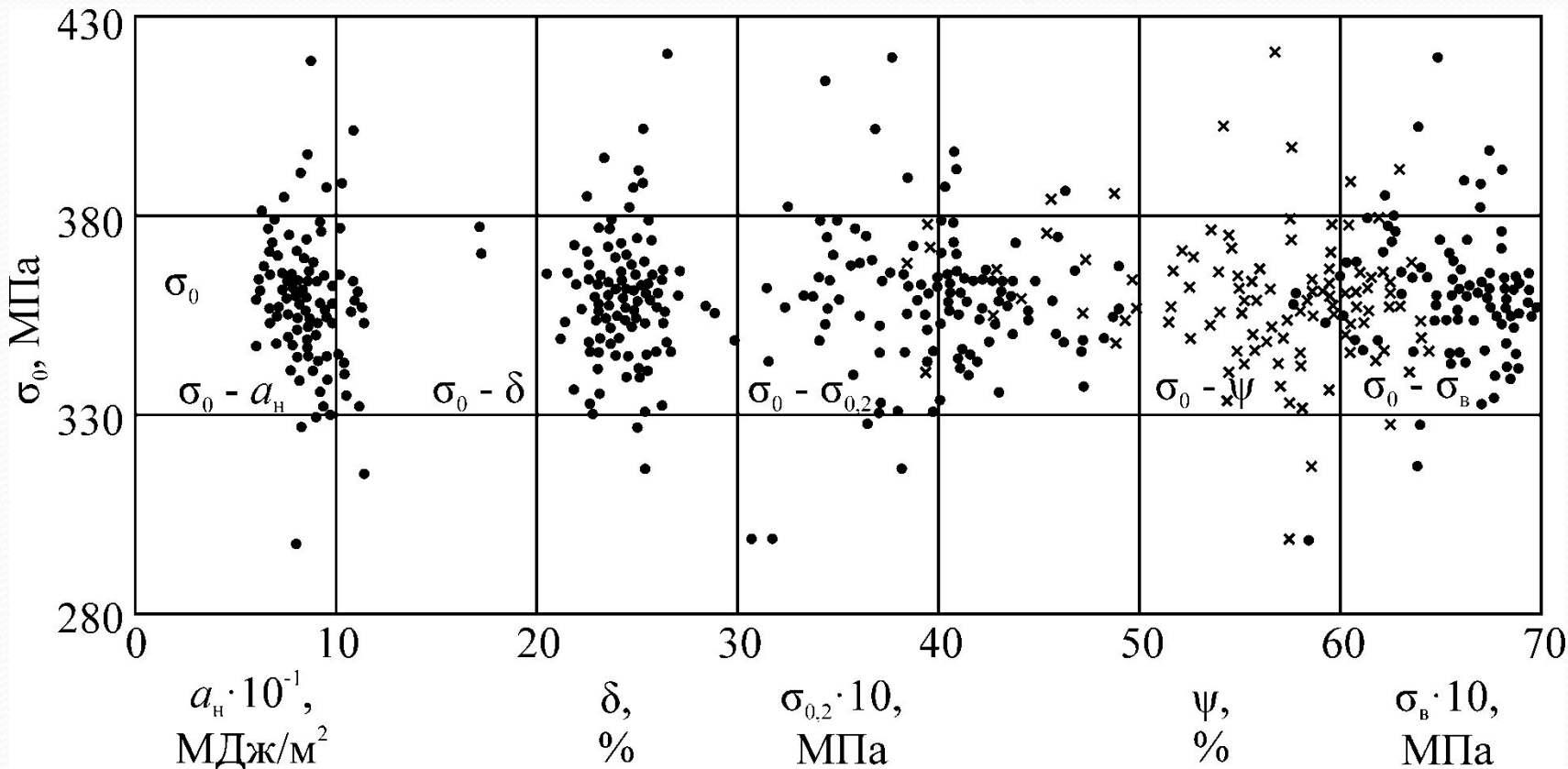


Оценка силы корреляционных связей между пределом выносливости и характеристиками механических свойств стали 40

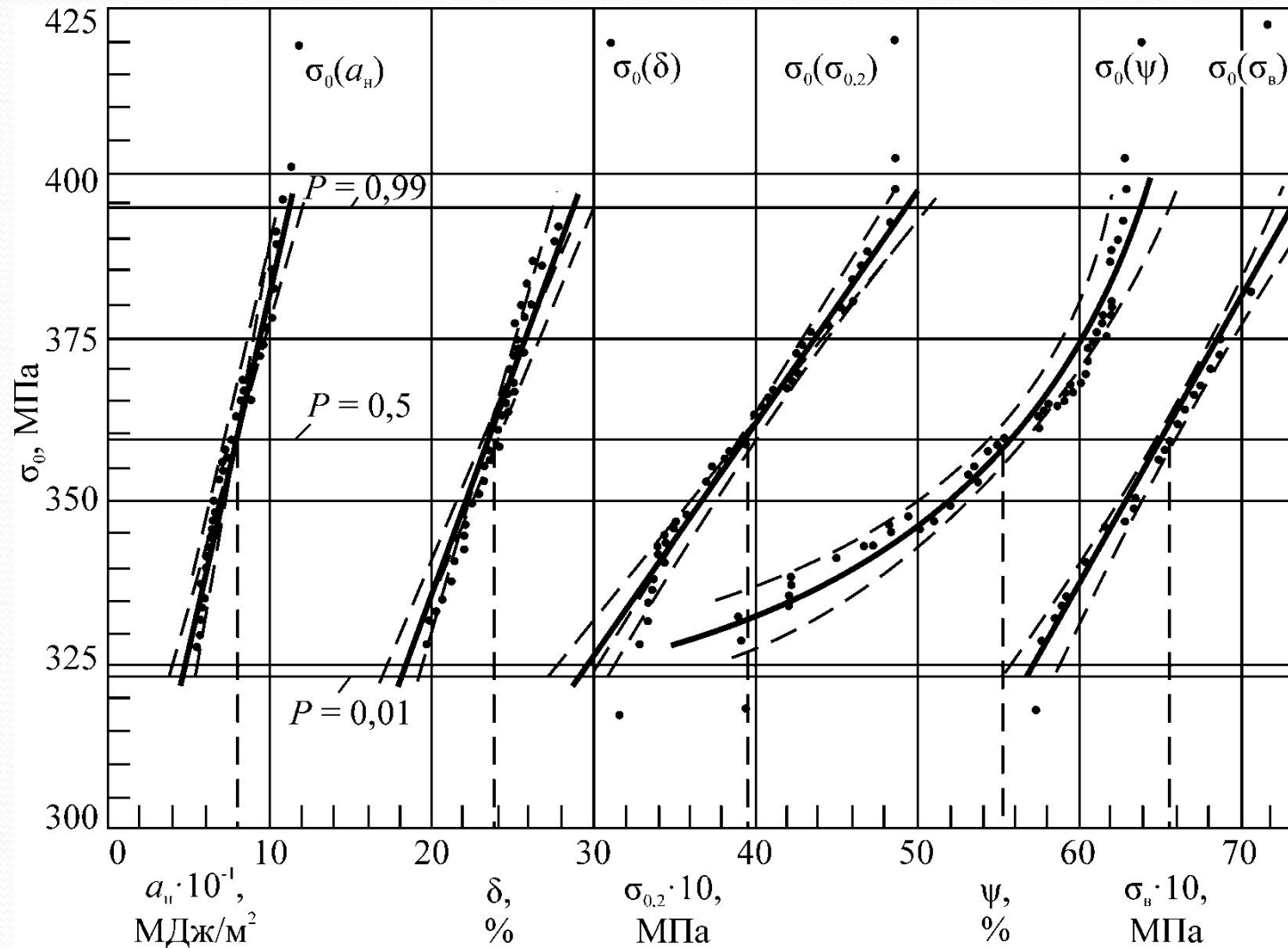
Материал	Связь	Значение коэффициента корреляции	Уравнение линии регрессии
Сталь 40	$\sigma_0(a_H)$	0,9994	$\bar{\sigma}_0 = 266,3 + 112,4a_H$
	$\sigma_0(\sigma_{0,2})$	0,9996	$\bar{\sigma}_0 = 224,7 + 0,338\sigma_{0,2}$
	$\sigma_0(\sigma_b)$	0,9995	$\bar{\sigma}_0 = 78,5 + 0,426\sigma_b$
	$\sigma_0(\sigma_\delta)$	0,9989	$\bar{\sigma}_0 = 202 + 6,587\delta$
	$\sigma_0(\sigma_\psi)$	0,9991	$\bar{\sigma}_0 = 425 - \sqrt{9604 - (2,3\psi - 60)^2}$

Вероятностные соотношения между пределом выносливости и другими характеристиками механических свойств стали 40

Вероятность P	$\frac{\sigma_0}{\sigma_b}$	$\frac{\sigma_0}{\sigma_{0,2}}$	$\frac{\sigma_0}{\delta}$, %	$\frac{\sigma_0}{\psi}$, %	$\frac{\sigma_0}{a_H}$, МДж/м ²
0,01	0,557	1,009	17,9	8,28	537
0,50	0,543	0,906	14,9	6,40	448
0,99	0,540	0,805	13,6	6,26	359



Стохастические зависимости между пределом выносливости σ_0 и характеристиками механических свойств a_n , δ , ψ , $\sigma_{0.2}$, σ_b для стали 40 (штриховые линии – значения характеристик механических свойств при вероятности $P = 0,5$)



Корреляционные связи между пределом выносливости σ_0 и характеристиками механических свойств a_n , δ , ψ , $\sigma_{0.2}$, σ_b для стали 40, построенные по вариационным рядам