

# НАДЕЖНОСТЬ И РЕСУРСНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ МАШИН

---

УДК 629.114.2

О.В. Берестнев, Ю.Л. Солитерман, А.М. Гоман, К.К. Кузьмич

## ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ИСПЫТАНИЙ НА НАДЕЖНОСТЬ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ТРАКТОРОВ

*Институт механики и надежности машин НАН Республики Беларусь  
Минск, Беларусь*

Вопросы обеспечения надежности сельскохозяйственных машин, и сельскохозяйственных тракторов, в частности, являются весьма актуальными для машиностроения Республики. Оценка достигнутого уровня надежности должна определяться, главным образом, по результатам эксплуатационных испытаний на надежность и анализу данных эксплуатации серийных машин аналогичных моделей. При этом определенные трудности возникают в связи с ограниченностью числа испытываемых образцов и временем испытаний.

Настоящая работа посвящена методам прогнозирования надежности по результатам эксплуатационных испытаний тракторов. Контролируемыми показателями при оценке надежности сельскохозяйственных тракторов, согласно ГОСТ 4.40-84 [1], являются наработка на отказ II и III групп сложности и ресурс трактора. Контроль нормируемых показателей надежности, согласно ГОСТ 27.410-87 [2], предусматривает математическую обработку результатов испытаний, включающую определение закона и параметров распределения наработки между отказами, и принятие решения о соответствии или несоответствии изделий установленным требованиям надежности. При прогнозировании ресурса трактора используются данные незавершенных испытаний. Согласно рекомендациям ГОСТ 7057-2001 [3], время контрольных испытаний на надежность должно составлять не менее 4000 моточасов, в то время как ресурс современного колесного трактора устанавливается порядка 10000 моточасов. По результатам ресурсных испытаний на надежность прогнозируется вероятность безотказной работы за заданный ресурс трактора. При этом предполагается, что статистическая модель распределения наработки между отказами, полученная при обработке экспериментальных данных незавершенных испытаний, сохраняется до исчерпания установленного ресурса. При определении наработки на отказ трактор рассматривается как система с восстанавливаемыми отказами, которые происходят в случайные моменты времени. При этом определяется один из наиболее распространенных законов распределения случайных величин: нормальный,

логарифмически нормальный, Вейбулла или экспоненциальный, аппроксимирующий экспериментальные данные наилучшим образом. Для проверки выбранных гипотез о законе распределения рекомендуется использовать критерий согласия Пирсона. Определение закона распределения наработки на отказ осуществляется в следующей последовательности: строятся интервальный ряд и гистограмма распределения времени наработки на отказ; по виду гистограммы распределения производится отбор возможных теоретических законов распределения, аппроксимирующих экспериментальные данные; Определяются значения критерия Пирсона для каждого из выбранных теоретических законов распределения. Чем меньше значение критерия Пирсона, тем больше достоверность аппроксимации экспериментальных данных выбранным теоретическим законом.

Распределение Вейбулла получило широкое распространение при оценке надежности сложных технических изделий в эксплуатационных условиях. Для определения параметров распределения Вейбулла наработки на отказ  $\lambda$  и  $\beta$  с плотностью вероятности

$$f(t) = \lambda\beta t^{\beta-1} \exp(-\lambda t^\beta) \quad (1)$$

воспользуемся рекомендациями стандарта ИЕС- 61649 [4].

Точечная оценка параметра формы  $\bar{\beta}$  определяется численным решением уравнения:

$$\left[ \frac{\sum_{i=1}^r t_i^\beta \ln t_i + (n-r)T^\beta \ln(T)}{\sum_{i=1}^r t_i^\beta + (n-r)T^\beta} - \frac{1}{\beta} \right] - \frac{1}{r} \sum_{i=1}^r \ln t_i = 0, \quad (2)$$

где  $n$  - общее число испытаний;  $r$  - число отказов;  $t_i$  - время наработки на  $i$ -ый отказ;  $T$  - время прекращения испытаний.

Точечная оценка параметра масштаба  $\bar{\lambda}$  определяется выражением

$$\bar{\lambda} = \left\{ \frac{1}{r} \left[ \sum_{i=1}^r t_i^{\bar{\beta}} + (n-r)T^{\bar{\beta}} \right] \right\}^{\frac{1}{\bar{\beta}}}. \quad (3)$$

$$\text{Среднее время до отказа } \bar{T}_m = \bar{\lambda} \Gamma(1 + 1/\bar{\beta}), \quad (4)$$

где  $\Gamma(z)$  - гамма-функция.

Точечная оценка ожидаемого времени безотказной работы изделия

$$\bar{B}_{10} = \bar{\lambda} \left[ \ln \left( \frac{1}{\gamma} \right) \right]^{1/\bar{\beta}}. \quad (5)$$

Точечная оценка вероятности безотказной работы за время  $t$

$$\bar{P}(t) = \exp \left[ - \left( t / \bar{\lambda} \right)^{\bar{\beta}} \right]. \quad (6)$$

Для определения параметров экспоненциального распределения результатов испытаний используем рекомендации стандарта ИЕС- 60605-4 [5].

Точечная оценка средней наработки на отказ

$$\bar{T}_m = T' / r \text{ при } r \geq 10 \text{ и } \bar{T}_m = T' / (r-1) \text{ при } r < 10. \quad (7)$$

где  $T'$  суммарное время испытаний.

Нижний предел доверительной оценки средней наработки на отказ

$$T_{mL} = \frac{2T'}{\chi_{1-\alpha/2}^2(2r+2)}. \quad (8)$$

Верхний предел доверительной оценки средней наработки на отказ

$$T_{mU} = \frac{2T'}{\chi_{\alpha/2}^2(2r)}, \quad (9)$$

где  $\alpha$  - доверительный уровень значимости,  $\chi_{\alpha/2}^2(2r)$  - квантиль  $\chi^2$  распределения.

Для определения значений функции распределения  $F(a_i)$  нормального закона вычислим выборочные характеристики:

$$\text{Среднее значение} \quad \bar{t} = \frac{1}{r} \sum_{i=1}^r t_i \quad (10)$$

$$\text{Дисперсия} \quad S^2 = (t^2) - (\bar{t})^2 = \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^r t_i^2 \right) - (\bar{t})^2. \quad (11)$$

Вероятность наработки на отказ за время  $T$  определяется по функции Лапласа

$$\Phi(T) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^T \exp(-0,5z^2) dz, \quad \text{где} \quad z = \frac{t - \bar{t}}{S}. \quad (12)$$

Определение параметров логарифмически нормального закона распределения осуществляется по данным распределения натуральных логарифмов наработки на отказ аналогично нормальному закону распределения.

При определении вероятностной оценки ресурса по результатам незавершенных эксплуатационных испытаний тракторов в соответствии с рекомендациями РД10.28-92 [6] принимаем значение коэффициента вариации ресурса  $\nu_R = 0,4$ , что позволяет на основании общих положений теории надежности технических систем аппроксимировать распределение ресурса тракторов распределением Вейбулла. Для определения параметров двухпараметрического распределения Вейбулла  $\lambda$  и  $\beta$  воспользуемся принципом максимума функции правдоподобия

$$L(\lambda, \beta) = \lambda^n \beta^n (t_1 t_2 \dots t_m)^{\beta-1} \exp\{-\lambda (t_1^\beta + \dots + t_m^\beta + (N-m)T^\beta)\}, \quad (13)$$

где  $N$  - число испытываемых тракторов;  $m$  - число тракторов, имеющих невосстанавливаемые отказы;  $t_i$  - время наработки до невосстанавливаемого отказа;  $T$  - продолжительность ресурсных испытаний.

Это условие можно заменить условием максимума функция

$$L_1(\lambda, \beta) = \ln L(\lambda, \beta) = m \ln(\lambda \beta) + (\beta - 1) \ln(t_1 \dots t_m) - \lambda (t_1^\beta + \dots + t_m^\beta + (N-m)T^\beta) \quad (14)$$

Для нахождения максимума функции  $L_1(\lambda, \beta)$  вычислим ее частные производные по  $\lambda$  и  $\beta$  и приравняем их нулю.

$$\text{Откуда} \quad \lambda = \frac{m}{t_1^\beta + \dots + t_m^\beta + (N-m)T^\beta}. \quad (15)$$

Подставляя выражение  $\lambda$  в (14) получим нелинейное уравнение с одним неизвестным  $\beta$

$$m + \beta \ln(t_1 \dots t_m) - \frac{m^\beta \{t_1^\beta \ln t_1 + \dots + t_m^\beta \ln t_m + (N-m)T^\beta \ln T\}}{t_1^\beta + \dots + t_m^\beta + (N-m)T^\beta} = 0. \quad (16)$$

После численного определения величины  $\beta$  вычисляем значение  $\lambda$  из выражения (15). Вероятность наработки на отказ за время установленной величины ресурса  $T^*$  по формуле

$$P(T^*) = \exp\{-\lambda (T^*)^\beta\}. \quad (17)$$

Результаты расчета вероятности сохранения работоспособности тракторов при наработке назначенного ресурса в зависимости от числа испытываемых тракторов, относительного времени наработки в процессе испытаний  $T/T^* = 0,4$ , числа невосстанавливаемых отказов и принятой наработке отказавших тракторов до невосстанавливаемых отказов приведены в таблице 1.

Таблица 1

Вероятность сохранения работоспособности тракторов при наработке назначенного ресурса

Число испытываемых тракторов $N$	3	4	5
Число невосстанавливаемых отказов $m$	Вероятность наработки ресурса $P(T^*)$		
0	>0,643	>0,739	>0,791
1	0,643	0,739	0,791
2	-	0,473	0,595
3	-	-	0,003

В качестве примера использования разработанных методов оценки наработки на отказ оценим надежность одной из модификаций колесного трактора МТЗ. В результате эксперимента были получены следующие данные (моменты отказов): 1070, 1515, 624, 1150, 782, 820, 204, 781, 852, 1204, 1426, 393, 939, 255 моточасов. Построим вариационный ряд эмпирического закона распределения наработки на отказ (Таблица 2)

Таблица 2

Вариационный ряд эмпирического закона распределения наработки на отказ

$x_1$	200-529	529-858	858-1187	1187-1516
$n_1$	3	5	3	3

По виду гистограммы заключаем, что случайная величина  $x$  может иметь распределение по одному из следующих законов: нормальный, логарифмически нормальный или Вейбулла. Проверим каждый из этих законов на соответствие эмпирическим данным.

Для определения значений функции распределения  $F(a_i)$  нормального закона вначале вычислим выборочные характеристики  $\bar{x}, S^2$  по выражениям (10 и 11)

$$\bar{x} = 835,79, \quad S^2 = 117100,36, \quad S = 342,2$$

Заменяя теоретические значения выборочными, получим нормальное распределение с параметрами  $a = 836, \sigma = 342$ .

Тогда 
$$F(a_i) = \Phi\left(\frac{a_i - a}{\sigma}\right) = \Phi\left(\frac{a_i - 836}{342}\right).$$

Для численных значений  $a_i$  по таблицам функции Лапласа определим

значения  $F(a_i)$  и находим величину 
$$\chi^2 = \sum_{i=1}^m \left\langle \frac{n_i - np_i}{np_i} \right\rangle^2 = 0,964.$$

Если величины  $x_i$  распределены по логарифмически нормальному закону, то их логарифмы  $y_i = \ln x_i$  будут распределены по нормальному закону. Вычисляя логарифмы, получим ряд значений  $y_i$ . Вариационный ряд наработки на отказ строится по аналогии с нормальным законом распределения. Результаты приведены в таблице 3.

Таблица 3

Вариационный ряд логарифмически нормального закона распределения наработки на отказ

$y_i$	4,12-4,92	4,92- 5,72	5,72 –6,52	6,52-7,32
$n_i$	1	2	1	10

Построенная по результатам вычислений, приведенным в таблице 3, гистограмма свидетельствует, что случайная величина  $x$  не может быть распределенной по логарифмически нормальному закону.

Функция распределения закона Вейбулла имеет вид  $F(x) = 1 - \exp(-\lambda x^\beta)$ ,

где  $\lambda$  и  $\beta$  - параметры масштаба и формы распределения. Плотность вероятности распределения определяется выражением (1). Параметры  $\lambda, \beta$  находим методом максимального правдоподобия по (13)...(16)  $\lambda=1,084$ ;  $\beta=2,392$ . Выполняя

вычисления находим величину  $\chi^2 = \sum_{i=1}^m \left( \frac{n_i - np_i}{np_i} \right)^2 = 0,038$ .

Полученное значение намного меньше  $\chi^2$ , вычисленного для нормального распределения. Поэтому принимаем гипотезу о соответствии экспериментальных данных закону Вейбулла. По таблицам распределения  $\chi_{m-2}^2 = \chi_2^2$  (с 2 степенями свободы) находим, что распределение Вейбулла подтверждается с вероятностью, превышающей 0.98. Установив, что наилучшим теоретическим законом, аппроксимирующим экспериментальные данные наработки на отказ, является распределение Вейбулла, и определив его параметры  $\lambda=1,084$ ;  $\beta=2,392$ , находим среднюю наработку на отказ II и III группы сложности по выражению (5)  $T_0 = 857$  моточасов.  $\gamma$ -процентная наработка на отказ определяется выражением (6). При  $\gamma=80\%$  имеем  $T_\gamma = 590$  моточасов.

Рассмотренные методы и разработанные программы позволяют не только осуществлять прогнозирование надежности по результатам эксплуатационных испытаний, но и разрабатывать эффективные планы проведения таких испытаний.

## ЛИТЕРАТУРА

- ГОСТ 4.40-84. С Изм. 2003г. Система показателей качества продукции. Тракторы сельскохозяйственные. Номенклатура показателей; 2. ГОСТ 27.410-87. Надежность в технике. Методы контроля показателей надежности и планы контрольных испытаний на надежность; 3. ГОСТ 4.40-84. С Изм. 2003г. Система показателей качества продукции. Тракторы сельскохозяйственные. Номенклатура показателей; 4. IEC 61649:1997. Goodness-of-fit tests confidence intervals and lower confidence limits for Weibull distributed data; 5. EC 60605-4:2001. Equipment reliability testing. Part 4: Statistical procedures for exponential distribution-Point estimates, confidence

intervals, prediction intervals and tolerance intervals; 6. РД 10.2.8-92. Испытания сельскохозяйственной техники. Надежность. Сбор и обработка информации.

УДК 669.621.785

В.А. Гуринович, П.С. Гурченко, А.И. Михлюк

## РЕГУЛИРУЕМОЕ ОХЛАЖДЕНИЕ ЗАГОТОВОК В ПРОЦЕССЕ ГОРЯЧЕГО ФОРМООБРАЗОВАНИЯ – КАК МЕТОД ПОЛУЧЕНИЯ ЗАДАННЫХ СВОЙСТВ ДЕТАЛЕЙ АВТОМОБИЛЯ.

*РУП «Минский автомобильный завод»  
Минск Беларусь*

Получение заданных свойств деталей автомобиля, адекватных условиям её эксплуатации, всегда было актуально, так как решение данной задачи позволяло получить равнопрочную конструкцию автомобиля, что является оптимальным как с технической, так и экономической стороны. Для деталей, которые в процессе изготовления подвергаются различным видам технологических операций, связанных с многократным нагревом, прогнозирование заданных свойств конечной детали следует начинать на самых первых стадиях её изготовления. Это касается в первую очередь процессов регулирования скоростей термического воздействия (нагрева, выдержки и охлаждения) на операции горячего формообразования: ковке, штамповке. Известно, что в процессе горячей штамповки иликовки детали предварительно подвергают нагреву до интервала ковочных температур 1100 – 1250 °С. Для достижения равномерного температурного поля по сечению заготовки, в первую очередь массивной заготовки, требуется длительная выдержка в интервале высоких температур, что приводит к росту зерна и формированию грубой структуры металла с 1-2 баллом зерна по ГОСТ 5639-82. Для исправления этого применяют объёмную термическую обработку: нормализацию, отжиг или закалку с отпуском.

Вместе с тем есть ряд сталей, для которых получение мелкой структуры особенно важно при формировании конечного комплекса прочностных свойств. В первую очередь это относится к сталям пониженной прокаливаемости типа 60ПП и 80ПП, детали из которых после упрочнения по методу объёмно-поверхностной закалки в последнее время успешно применяются как альтернатива сталям типа 12ХНЗА, 20ХНЗА, 18ХГТ и др. подвергаемым химико-термической обработке.

Метод объёмно-поверхностной закалки (далее ОПЗ), предложенный в середине 60-х годов прошлого столетия К.З.Шепеляковским, нашел широкое применение в практике упрочнения деталей машиностроения на многих предприятиях как Республики Беларусь, так и ряда стран СНГ. Метод основан на закалке специально разработанных углеродистых сталей с регламентированным содержанием химических элементов быстродвижущимся потоком воды. Этот метод по сравнению с другими видами термической обработки имеет целый ряд преимуществ.

1. По сравнению с термическим улучшением – наряду с упрочненной сердцевиной получается прочный и твердый поверхностный слой. Кроме того, возникающие сжимающие напряжения повышают усталостную прочность.

2. По сравнению с цементацией – твердости поверхностного слоя и сердцевины получаются одинаковыми, но при глубинном нагреве обеспечивается большая глубина слоя с высокой твердостью и большая твердость сердцевины.