

ОРГАНИЗАЦИЯ СОТРУДНИЧЕСТВА ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ (ОСЖД)

I издание

Разработано совещанием экспертов Комиссии ОСЖД по инфраструктуре и подвижному составу с 16 по 18 мая 2006 г., г.Барановичи, Республика Беларусь

Согласовано совещанием Комиссии ОСЖД по инфраструктуре и подвижному составу с 6 по 9 ноября 2006 г., Комитет ОСЖД, г.Варшава

Утверждено на заседании Конференции Генеральных директоров (ответственных представителей) железных дорог ОСЖД 23-27 апреля 2007 г., г.Тбилиси, Грузия

Дата вступления в силу: 27 апреля 2007 г.

O+P
756/5

ВЛИЯНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ФАКТОРОВ НА ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ ОСНОВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СТРЕЛОЧНЫХ ПЕРЕВОДОВ

1. ЦЕЛЬ МЕТОДИКИ

Целью методики является определение показателей надежности и ресурса стрелочных переводов различных конструкций в различных условиях эксплуатации.

Помимо этого, в задачу методики входит возможность оценивать остаточный ресурс старогодных элементов стрелочных переводов, что позволяет, в свою очередь, определять целесообразность и сферы их применения, а также регламентировать систему их обслуживания.

Ресурс элементов стрелочных переводов определяется с учетом всех факторов, вызывающих их отказы, как по износу, так и по дефектам того или иного вида, в результате возникновения которых элемент теряет свою работоспособность.

2. ЗАДАЧИ, РЕШАЕМЫЕ МЕТОДИКОЙ

Методика решает следующие задачи:

определение показателей надежности элементов стрелочных переводов по результатам их эксплуатационной работы;

прогнозирование показателей надежности элементов при изменении их конструкции или свойств материалов, из которых они изготавливаются;

определение показателей надежности элементов при изменении условий эксплуатации;

определение остаточного ресурса элементов, планируемых для использования, как старогодные.

Каждая из четырех вышеперечисленных задач использует свой расчетно-аналитический аппарат. Общей основой для аппаратов решения конкретных задач являются исследования расчетов ресурса элементов по показателям прочности и износостойкости, апробированные РЖД.

3. ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ ДЛЯ ОЦЕНКИ РАБОТЫ ОСНОВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СТРЕЛОЧНЫХ ПЕРЕВОДОВ

Для определения показателей надёжности основных элементов стрелочных переводов используются следующие показатели надёжности:

$L(t)$ - интенсивность отказов элементов в течение всего срока эксплуатации;

$R(t)$ - вероятность безотказной работы элементов, в каждый момент эксплуатации;

$F(t)$ - распределение отказов элемента по наработке;

$f(t)$ - плотность распределения отказов элементов по наработке;

$E(t)$ - средняя наработка элементов до отказа.

4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕСУРСА ОСНОВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СТРЕЛОЧНЫХ ПЕРЕВОДОВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИХ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ РАБОТЫ (МОНИТОРИНГ СОСТОЯНИЯ НАДЕЖНОСТИ ПЕРЕВОДОВ НА СЕТИ ДОРОГ)

Показатели надежности и ресурса элементов определяются исходя из статистических данных по их отказам, получаемым в результате эксплуатации следующим образом.

Исходные данные собираются в массивы отдельно по элементам и другим разграничивающим характеристикам (износ, дефекты и т.д.).

Показатели надежности и ресурса определяются в соответствии с теорией надежности. Рассматривается схема работы элементов в пути, состоящая из трех этапов:

начальный период – период приработки (его может не быть);

основной период (со стабильными или монотонно изменяющимися показателями надежности);

период резкого увеличения интенсивности отказов.

Вначале, используя статистические данные, строятся зависимости интенсивности отказов от наработки через заданные промежутки объема пропущенного груза, или времени Δt .

$$L(t) = \frac{P(T + \Delta t) - P(T)}{\Delta t (1 - P(T))} , \quad (1)$$

где $P(T)$ – вероятность отказа элемента за период его работы от 0 до T .

Затем производится аналитическая аппроксимация зависимости $L(t)$ с помощью универсального выражения:

$$L(t) = at + b - k_{11} \exp [-k_{12}(t - t_1)] + k_{01} \exp [k_{02}(t - t_0)] , \quad (2)$$

Коэффициенты зависимости для интенсивности отказов $L(t)$ имеют физический смысл, они, в свою очередь, являются дополнительными характеристиками надежности рассматриваемого элемента. Это:

a - скорость изменения интенсивности отказов на основном этапе эксплуатации;

b - условная интенсивность отказов на начальном этапе эксплуатации;

t_1 и t_0 - точки перехода между этапами работы элементов;

k_{01} и k_{02} - показатели скорости изменения интенсивности отказов в начальный период эксплуатации;

k_{11} и k_{12} - показатели скорости изменения интенсивности отказов в завершающий период эксплуатации.

Все эти характеристики, полученные объективно, могут служить для анализа влияния условий работы элементов или конструкции на показатели надежности, для прогностических исследований и для предпроектных расчетов.

В случае необходимости дополнительно могут быть определены дисперсия распределения отказов элементов и коэффициент вариации.

Затем определяются – $R(t)$, $f(t)$.

Затем получают аналитические зависимости для остальных показателей надёжности по формулам (3)

$$\left\{ \begin{array}{l} L(t) = at + b - k_{11}e^{-k_{12}(t-t_1)} + k_{01}e^{k_{02}(t-t_0)}, \\ R(t) = \exp\left[-\int_0^t L(\tau)d\tau\right], \\ f(t) = L(t)R(t), \\ F(t) = \int_0^t f(\tau)d\tau, t \geq 0, \\ E(t) = \int_0^t R(\tau)d\tau, t \geq 0, \end{array} \right. \quad (3)$$

Ввиду того, что соотношения (3) интерпретируют практически любой вид зависимости интенсивности отказов от наработки на каждом из этапов работы, они пригодны для определения показателей надежности не только всех элементов стрелочных переводов, но и всех других элементов верхнего строения пути.

5. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РЕСУРСА ЭЛЕМЕНТОВ СТРЕЛОЧНЫХ ПЕРЕВОДОВ ПО ОТКАЗАМ, СВЯЗАННЫМ С ИХ ИЗНОСОМ

При получении зависимости износа элемента стрелочного перевода от наработки следует использовать выражение вида

$$h(t) = at + b[1 - \exp(-ct)] , \quad (4)$$

где:

h - износ элемента;

t - наработка (текущее значение);

a - интенсивности износа на стадии, когда зависимость износа от наработки линейна (или близка к линейной);

c - коэффициент, характеризующий интенсивность износа на стадии приработки (начальная стадия износа);

b - коэффициент, характеризующий величину “регламентируемого износа” на стадии приработки.

Обобщенная зависимость характеризует износ элементов на всех стадиях износа.

Показатели, характеризующие износостойкость могут быть получены из зависимости (4).

Интенсивность износа элемента получается дифференцированием зависимости (4):

$$\frac{dh}{dt} = a + bc[\exp(-ct)], \quad (5)$$

Эта зависимость характерна для периода приработки.

После приработки, на основной стадии износа элемента интенсивность износа равна:

$$\frac{dh}{dt} = a, \quad (6)$$

Учитывая, что практическая точность измерения износа составляет 0,1 мм, длительность периода приработки равна:

$$T_{pr} = \frac{\ln 10b}{c}, \quad (7)$$

С учетом практической точности измерений в пути равной 0,1 мм износ на момент окончания приработки составит:

$$h_{pr} = b + \frac{a}{c} \ln 10b, \quad (8)$$

Наработка элемента до отказа определяется из (4), подстановкой в это выражение допускаемой (нормативной) величины износа элемента

$$T = \frac{[h] - b}{a}, \quad (9)$$

где $[h]$ – нормируемая величина предельно допустимого износа.

6. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Изменение условий эксплуатации (скоростей движения, осевых нагрузок и т.д.) вызывает изменение сил, действующих на элемент стрелочного перевода, и напряжений в них, что предопределяет изменение их наработки до отказа.

Если данные по изменению напряженно-деформированного состояния элементов стрелочного перевода отсутствуют, то для расчета наработки элементов стрелочных переводов до отказа при изменении условий эксплуатации может быть использована методика, основанная на коэффициентах, полученных на основе статистических методов.

6.1. Влияние скоростей движения на ресурс основных элементов стрелочных переводов

Влияние скоростей движения на ресурс элементов стрелочного перевода учитывается с помощью коэффициентов к величине наработки до отказа элемента, ресурс которого условно принят за единицу.

$$T_v = \kappa_v T_{ed} , \quad (10)$$

где:

T_v - наработка элемента до отказа при скорости V ;

T_{ed} - наработка до отказа элемента, ресурс которого при заданной скорости принят за единицу;

κ_v - переходный коэффициент, учитывающий разницу ресурса конкретного и принятого за единичный элемент и определяющийся скоростью движения поездов по стрелочному переводу, получаемый на основании анализа статистических данных.

6.2. Влияние осевых нагрузок на ресурс основных элементов стрелочных переводов

Так же как и влияние скоростей движения на ресурс элементов стрелочных переводов влияние осевых нагрузок подвижного состава на ресурс элементов стрелок и крестовин может учитываться с помощью коэффициентов:

$$T_p = \kappa_{ip} T_{ed} , \quad (11)$$

где:

T_p - наработка элемента до отказа по износу при осевой нагрузке P ;

T_{ed} - наработка до отказа по износу элемента при средней для данной дороги осевой нагрузке;

κ_{ip} - переходный коэффициент.

Коэффициенты κ_p могут быть получены на основе обработки статистической информации о работе элементов, взятой с дорог и результатов расчетов динамики взаимодействия подвижного состава и пути по методике, принятой на дороге.

7. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ЭЛЕМЕНТОВ, ПЛАНИРУЕМЫХ ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ, КАК СТАРОГОДНЫЕ

Пригодными для использования элементы стрелочных переводов являются элементы, снимаемые с пути при сплошной замене металлических частей, элементы, снимаемые по достижению предельного для данной категории путей износа, или дефектные элементы, которые могут быть отремонтированы различными видами ремонтов.

Старогодные элементы укладываются на пути низких категорий, где динамические нагрузки на них существенно ниже, чем на путях, где они использовались в первый период своей работы.

Под остаточным ресурсом старогодных элементов следует понимать наработку в течение которой вероятность безотказной работы элемента не ниже заданной, а интенсивность отказов не имеет резких или скачкообразных изменений в сторону увеличения.

Прямая оценка остаточного ресурса по дефектам может быть проведена с использованием принципа суммирования повреждений

$$T_{ост.} = \left[1 - N_0 \int_{\sigma_{min}}^{\sigma_{max}} \frac{f(\sigma)}{N(\sigma)} d\sigma \right] P_{ос}, \quad (12)$$

где:

$T_{ост.}$ - остаточный ресурс;

$f(\sigma)$ - плотность распределения параметра (например, напряжений), вызывающего отказ элемента;

N_0 и $N(\sigma)$ - предельное и соответствующее напряжениям;

σ - число циклов нагружения до отказа;

$P_{ос}$ - средняя статическая нагрузка на ось.

Для практических целей можно также воспользоваться зависимостями вероятности безотказной работы и интенсивности отказа от наработки.

Перекладкой элемента в другие условия эксплуатации осуществляется переход из одной зависимости вероятности безотказной работы от наработки к другой. При заданной и неизменной системе обслуживания элемент может продолжать использоваться в более легких условиях эксплуатации пока вероятность безотказной работы его не снизится вновь до значения, при котором он был изъят из пути.

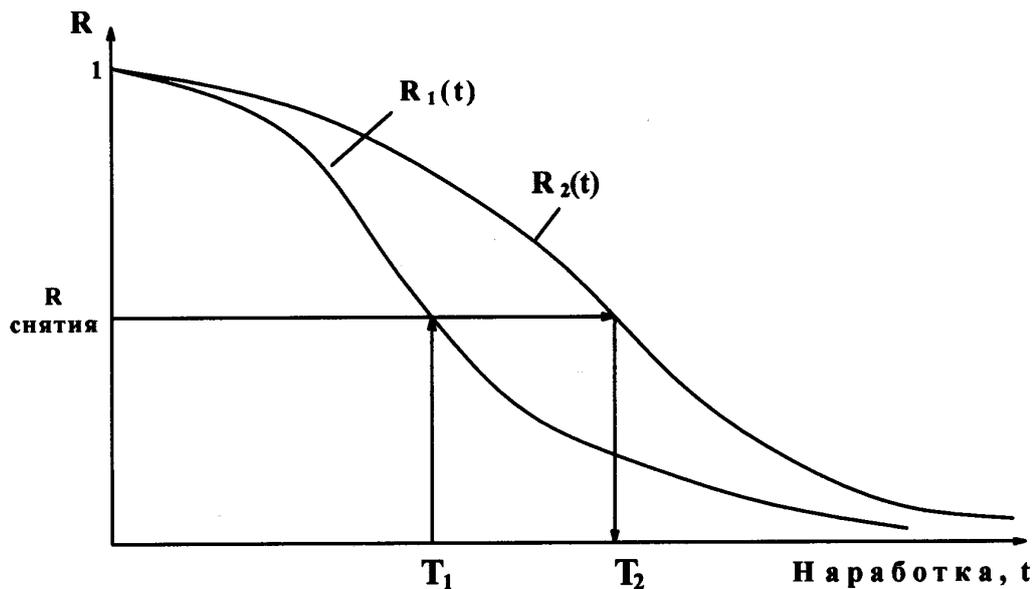


Рисунок - $R_1(t)$ и $R_2(t)$ – зависимости вероятности безотказной работы от наработки для первоначальных и новых условий работы.

Величина $T_2 - T_1$ будет остаточным ресурсом элемента, изъятого из пути с начальными условиями работы при его повторном использовании в пути с новыми условиями работы.

8. ПРИМЕРЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АЛГОРИТМОВ И МЕТОДИК ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ

Пример 1 (раздел 4 методики)

Получение зависимостей изменения показателей надежности основных элементов стрелочных переводов от наработки по статистическим данным об их отказах.

Рассмотрим алгоритм получения таких зависимостей на примере данных об отказах крестовин на одной из дорог ОАО «РЖД».

Статистические данные об отказах крестовин группируются по заданным промежуткам периодов работы \mathcal{T}_i . После чего определяются частоты (или при достаточном объеме данных – вероятности) отказов по формуле:

$$P(\mathcal{T}_i) = \frac{n_i}{N},$$

где:

n_i – число отказов крестовин за период \mathcal{T}_i ;

N – общее число крестовин, работа которых исследуется.

Затем по формуле (1) раздела 4 определяются интенсивности отказов крестовин. В качестве примера, на рис. 1.1 нанесены точки, соответствующие интенсивностям отказов крестовин, полученные из данных статистической отчетности.

Полученные значения интенсивностей отказов аппроксимируются аналитической зависимостью (2) (сплошная линия на рис. 1.1).

Затем по формулам (3) получают зависимости от наработки для остальных показателей надежности (рис. 1.2; 1.3; 1.4) и вычисляется значение $E(t)$.

Для оценки качества аналитических аппроксимаций на рис. 1.2; 1.3 и 1.4 нанесены точки, полученные прямым расчетом по натурным данным.

Как видно из рисунков, аналитические кривые достаточно точно интегрируют натурные данные.

Полученные аналитические зависимости для показателей надежности дают возможность решать большой круг практических и исследовательских задач стрелочного хозяйства.

Рассмотрим некоторые качественные и количественные результаты в нашем примере.

Из анализа зависимости $L(t)$ имеем:

1. Начальный период работы крестовин, рассматриваемой конструкции составляет $t = 71$ млн т. бр.

Ввиду того, что зависимость $L(t)$ не убывающая, качество изготовления крестовин позволяет в начальный период эксплуатировать их с обычным порядком осмотров и обмеров.

2. Период стабильной работы крестовин завершается к моменту наработки ими $t_0 = 202$ млн. т бр. Интенсивность отказов в период стабильной работы постоянная

($a = 0$), следовательно система осмотров и обслуживания крестовин может быть неизменной.

3. После завершения периода стабильной работы $t = 202$ млн. т бр. интенсивность отказов резко возрастает, поэтому требуется принять решение – либо об изъятии крестовин из пути, либо об изменении системы их обслуживания. Возможна также перекладка крестовин в пути с более легкими условиями работы (см. пример 4).

4. Нарботке $t_0 = 202$ млн. т бр. соответствует вероятность безотказной работы $R(202) = 0,17$, поэтому в рассматриваемых условиях она является предельной величиной, которую следует рассматривать, как нормативную минимальную, обеспечивающую безопасность.

5. Величине вероятности безотказной работы $R(t) = 0,5$ соответствует наработка $t = 106$ млн. т бр. Эта величина определяет нормативный срок службы крестовин в рассматриваемых условиях. Его можно использовать для планирования поставок крестовин данной дороге.

Приведенный выше анализ полученных показателей надежности является частью возможного и может быть продолжен и рассмотрен в зависимости от конкретно решаемых задач.

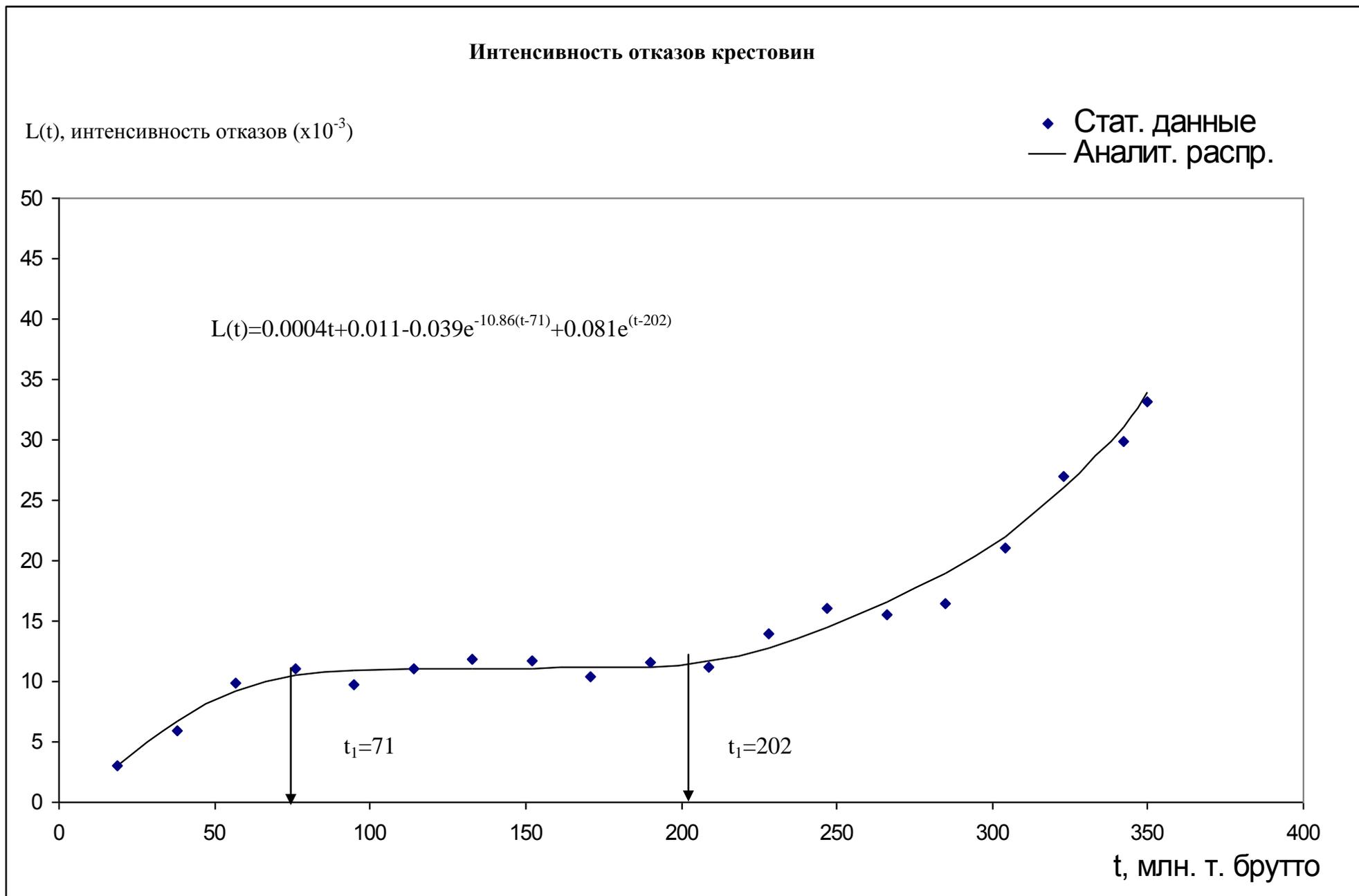


Рисунок 1.1 Интенсивность отказов крестовин

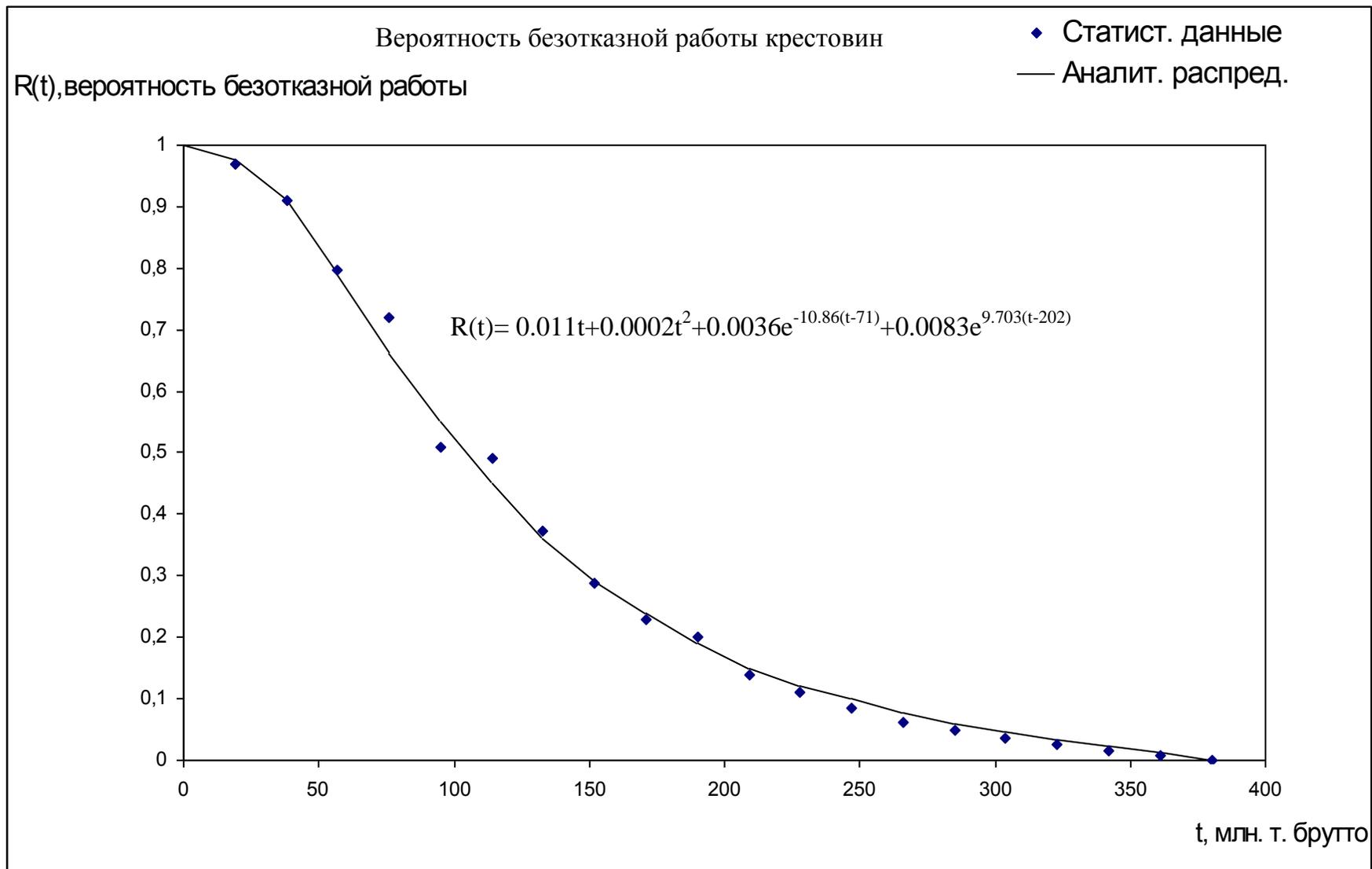


Рисунок 1.2 Вероятность безотказной работы крестовин

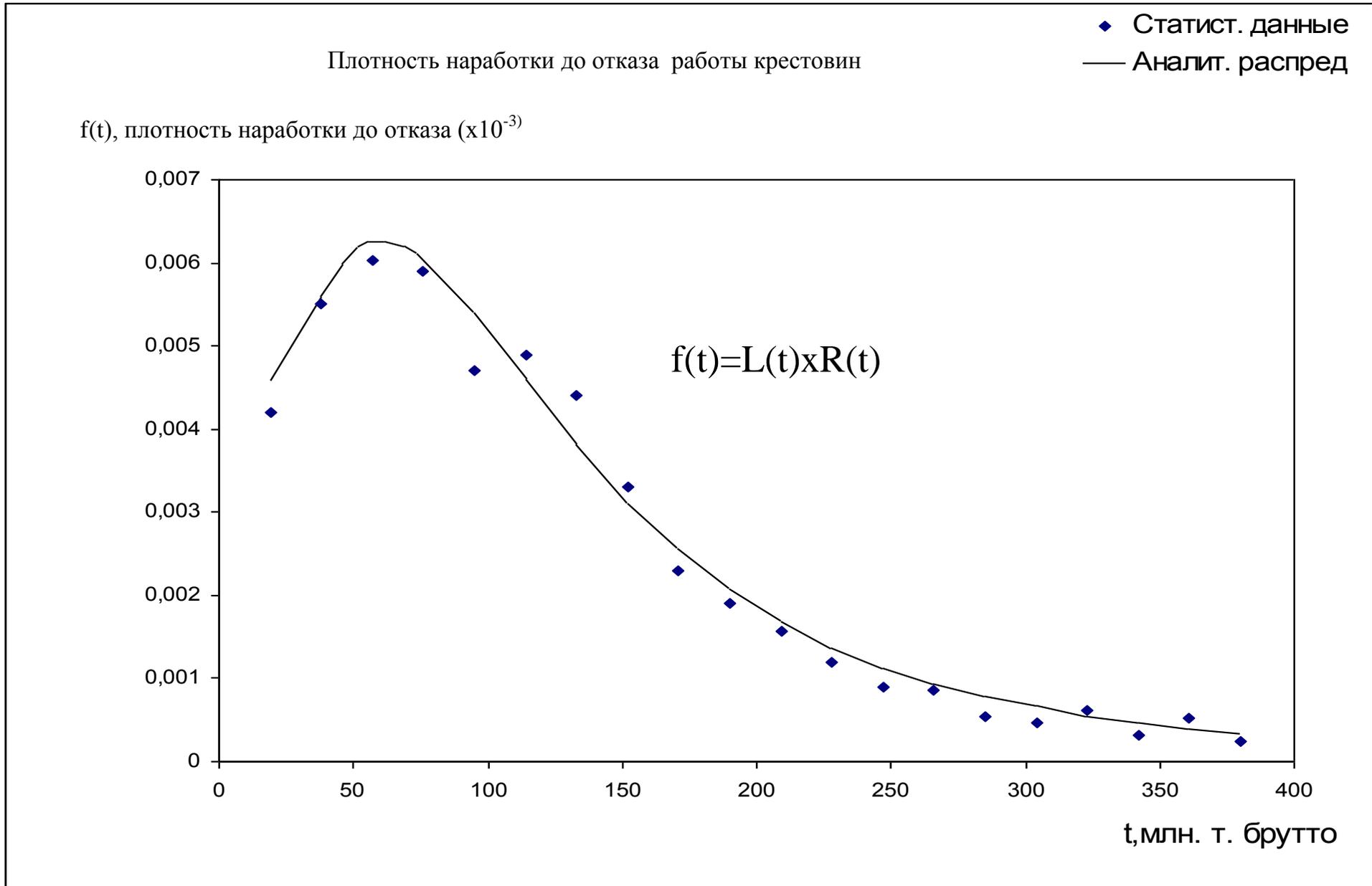


Рисунок 1.3 Плотность распределения отказов крестовин

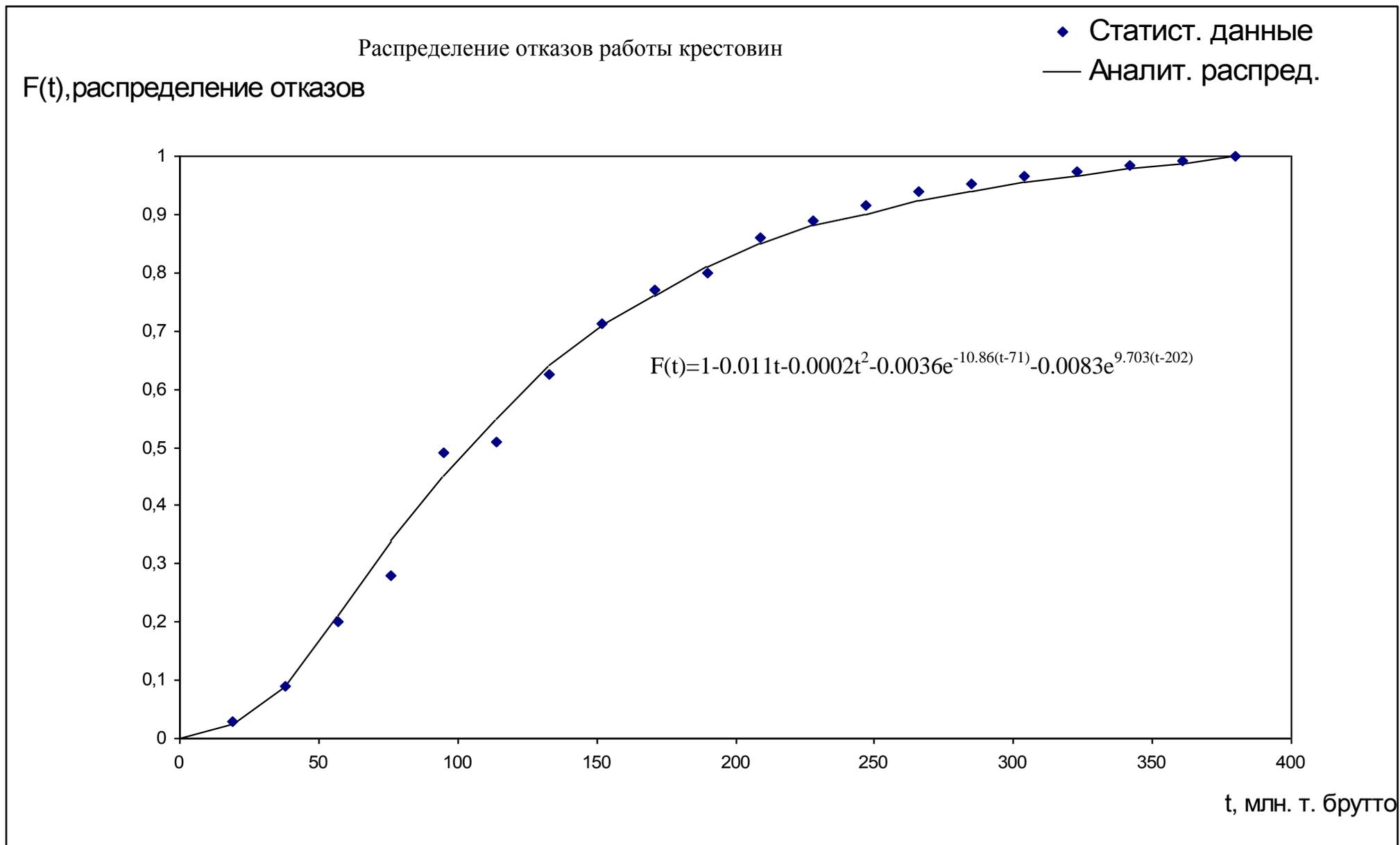


Рисунок 1.4 Распределение отказов крестовин

Пример 2 (раздел 5 методики)

Прогнозирование ресурса крестовины по износу на основании наблюдений за ее работой в пути.

В качестве примера рассмотрим результаты испытаний опытной крестовины. Крестовина новой конструкции № 004 в ходе испытаний вышла из строя из-за недостаточной изгибной прочности (трещина в подошве). Усиление подошвенной части крестовин позволит ликвидировать этот вид отказов.

Для решения вопроса о целесообразности продолжения работы над такими крестовинами необходим прогноз их ресурса после ликвидации причин, вызывающих трещины в подошве, а также данные об особенностях их работы на различных стадиях.

На рис. 2.1 в виде точек приведены замены износа элементов крестовины в ходе натурных испытаний. Аппроксимируя данные испытаний зависимостями (4) получаем характеристики работы сердечника и усовиков крестовины на износ (табл. 2.1.)

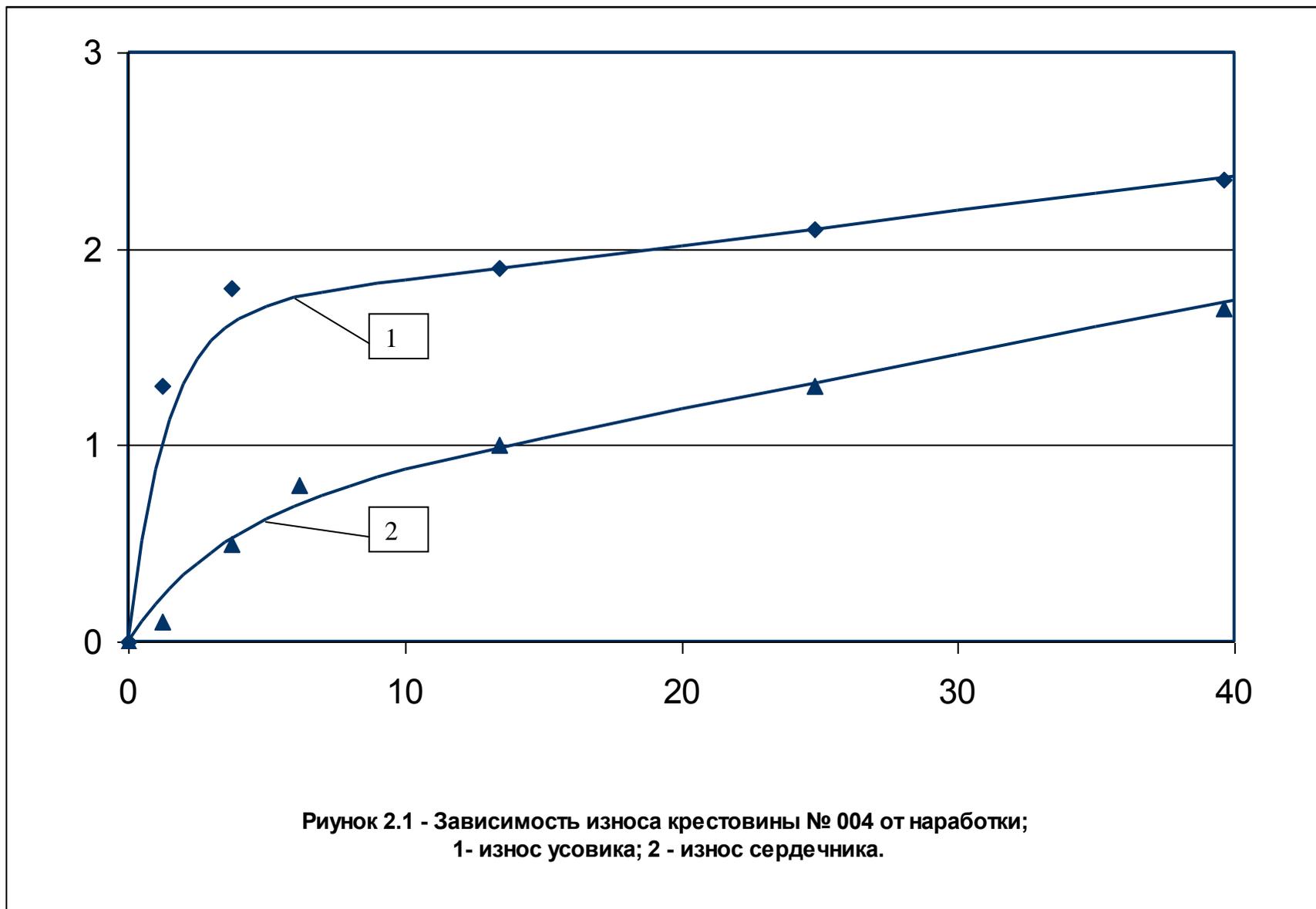


Таблица 2.1.
Характеристики износа крестовин № 004

Наименование элемента	Коэффициенты и зависимости (4) $h(t)$			h приработки, мм	Прогнози- руемый отказ по износу ($h_{\text{отк}} = 6$ мм), млн. т бр.
	a	B	c		
Сердечник	0,028	0,628	0,296	0,62	193
Усовик	0,018	1,665	0,775	1,71	247

Данные табл. 2.1 полностью характеризуют ресурсные показатели крестовины по износу:

Прогнозируемая наработка до отказа по износу – 193 млн. т бр.

Величина износа на момент окончания периода приработки:

по усовику – 1,71 мм;

по сердечнику – 0,62 мм.

Общая продолжительность периода приработки – 10,5 млн.т. бр.

Интенсивность износа в основной период работы:

усовика – 0,018 мм/млн. т бр.

сердечника – 0,028 мм/млн.т бр.

Аналогичным образом могут определяться ресурсные характеристики износа групп крестовин. Это позволяет решать исследовательские задачи по совершенствованию конструкции и материалов крестовин, а также ряд практических задач по рациональному использованию крестовин в различных условиях эксплуатации и по планированию их закупок для нужд железных дорог.

Пример 3 (раздел 6 методики)

Применение методики определения показателей надежности при изменении условий эксплуатации:

Исходными данными служат результаты расчетов показателей надежности, выполненных по пункту 4 методики.

Рассмотрим, например, определение влияния скоростей движения поездов на наработку до отказа крестовин.

Проведя расчеты, аналогичные показанным в примере 1, получим для крестовин, эксплуатирующихся на одной из российских железных дорог, наработку до отказа 50% крестовин ($R(t) = 0,5$).

Таблица 3.1.

Наработка до отказа 50% крестовин в зависимости от скоростей движения безотказной работы из зависимостей для вероятности

Скорость, км/ч	40	70	100
Наработка $R(t) = 0,5$, млн. т бр.	155	143	130

Принимая наработку крестовин до $R(t) = 0,5$ при скорости 100 км/ч за единицу и аппроксимируя данные табл. 3.1. линейной зависимостью, получим выражение для

$$K_v = 1,315 - 0,00320 V \quad (3.1),$$

где V – скорость, км/ч.

Окончательно по формуле (10) получаем выражение для наработки крестовин до отказа:

$$T_v = K_v T_{100} \quad (3.2),$$

где T_{100} - наработка до отказа 50% крестовин при скоростях движения подвижного состава 100 км/ч.

Зависимости (3.1 и 3.2) могут быть использованы для установления нормативных сроков службы крестовин, для расчета потребностей в ежегодной закупке крестовин и других целей.

Таким же образом можно получить зависимости при других вероятностях безотказной работы. Например, для целей отработки новых технологий или новых материалов представляют интерес зависимости для окончания периода приработки и завершения периода стабильной работы.

Пример 4 (раздел 7 методики)

Применение методики определения показателей надежности для расчета остаточного ресурса крестовин при перекладке их с путей 1 класса на пути 4 класса.

Условия работы крестовин до перекладки и после нее приведены в табл. 4.1.

Таблица 4.1
Условия работы крестовин

Показатель	До перекладки	После перекладки
Классификация пути	1Б1	4Д6
Скорость поездов, км/ч	100	40
Грузонапряженность, млн. т км бр на км в год	70	10

Рассмотрим предельный случай.

После наработки до перехода от периода стабильной работы к периоду резкого увеличения интенсивности отказов, определяемого как точка перехода t_0 на зависимости $L(t)$ (см. пример 1), крестовины перекадываются с путей 1 класса на путь более низкого 4 класса.

Для определения остаточного ресурса крестовин воспользуемся зависимостями вероятности безотказной работы для крестовин, работающих в путях соответствующего класса, получаемым по алгоритму, описанному в разделе 4 методики, который иллюстрирует пример 1. Полученные зависимости для крестовин, работающих на путях 1Б1 и 4Д3 приведены на рис. 4.1.

Из примера 1 имеем $t_0(1) = 202$ млн. т бр.

По зависимостям рис. 4.1 строим переход от кривой $R1(t)$ путей 1 класса к кривой $R2(t)$ для путей 4 класса. Получаем $t0(2) = 279$ млн. т бр.

Остаточный ресурс при перекладке крестовин составит:

$$\Delta t = t0(2) - t0(1) = 279 - 202 = 77 \text{ млн. т бр.}$$

При этом к моменту пропуска крестовинами 279 млн. т брутто груза вероятность безотказной работы будет не ниже 0,17.

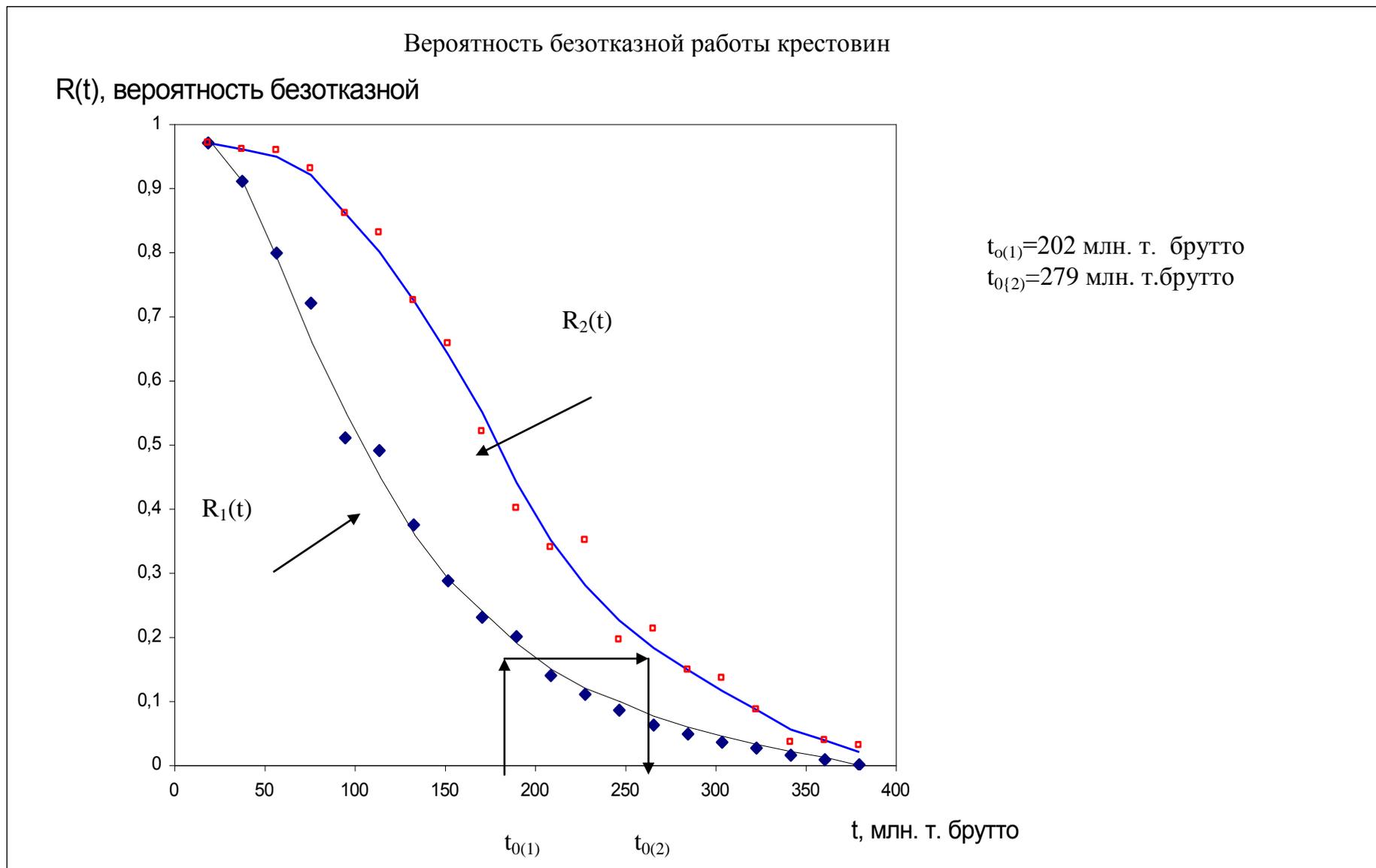


Рисунок 4.1 Вероятность безотказной работы крестовин для путей первого $R_1(t)$ и четвертого классов $R_2(t)$