

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ ВОДОЗАЩИТНОЙ СПОРТИВНОЙ ЭКИПИРОВКИ

Панкевич Дарья Константиновна

кандидат технических наук, доцент

Буркин Александр Николаевич

доктор технических наук, профессор

Витебский государственный технологический университет

Аннотация. В статье представлены результаты прогнозирования надежности водозащитной спортивной экипировки, выполненной из водозащитных композиционных слоистых материалов, содержащих полиэфируретановую мембрану. Подробно описана методика расчета ресурса водозащитной спортивной экипировки. Определен средний срок носки изделий и выявлен тип материала, обеспечивающий более длительный ресурс водозащитной функции.

Ключевые слова. Спортивная экипировка, композиционные материалы, водонепроницаемость, надежность, ресурс, срок носки.

Свойства композиционных материалов обусловлены их структурой, взаимным расположением элементов и характером связей между элементами. Такие сложные системы, как ткань, трикотажное полотно, полимерные пленки различной структуры, являясь составляющими композиционных слоистых материалов, обуславливают своеобразие их поведения в эксплуатации, которое невозможно прогнозировать, используя лишь данные о каждой составляющей в отдельности. Поэтому для оценки надежности композиционных материалов большую значимость приобретают исследования изменчивости свойств в процессе эксплуатации.

Надежность является комплексным свойством, которое в зависимости от назначения объекта и условий его применения может включать безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость или определенные сочетания этих свойств [1]. Применительно к текстильным материалам набор показателей свойств, характеризующих надежность комплексно, может быть различным в зависимости от области использования материала. При анализе пригодности материалов для изготовления одежды различного назначения наибольшую значимость приобретает показатель безотказности

как свойства объекта непрерывно сохранять работоспособное состояние в течение некоторого времени или наработки.

Поскольку водонепроницаемость водозащитных композиционных слоистых материалов, содержащих полиэфируретановую мембрану, является тем свойством, высокий уровень которого отличает эти материалы от каких-либо других одежных материалов, логично будет рассматривать их безотказность как способность непрерывно сохранять первоначальное значение водонепроницаемости и использовать для характеристики надежности показатель изменения водонепроницаемости в динамике эксплуатации. В качестве объекта исследования выбрана водозащитная спортивная экипировка спортсмена-байдарочника.

Цель исследования - прогнозирование наиболее вероятного срока носки предмета одежды из водозащитного композиционного материала для установления периодичности замены экипировки и выбора наиболее подходящей структуры материала для изготовления водозащитной спортивной экипировки.

Повышение надежности конструкций современной одежды связано с приближением расчетных методов к реальным условиям ее носки. Расчетная схема элементов конструкции изделия должна учитывать как действительные условия ее эксплуатации, так и разброс механических свойств основных и вспомогательных материалов, используемых для его производства [2]. В расчетную практику оценки надежности изделий в последнее время стали активно внедряться статистические методы, учитывающие элемент случайности и дающие возможность прогнозировать надежность изделия при эксплуатации [3, 4].

Пусть эксплуатация объекта (одежды) выражается в единицах времени t , происходит непрерывно и начинается в момент времени $t = 0$. Появление отказа t считаем случайной величиной. Тогда вероятность безотказной работы за время $(0; \tau)$ будет определяться по формуле (1) [5]:

$$R(t) = R(t < \tau), \quad (1)$$

где $R(t)$ – вероятность безотказной работы одежды в период времени наработки t ;

$R(t < \tau)$ – вероятность того, что случайное время безотказной работы одежды будет больше значения t наработки.

Вероятность безотказной работы запишется в виде формулы (2) [5]:

$$R(t) = (N - \sum_{i=1}^t n_i) \frac{1}{N}, \quad (2)$$

где N – число изделий, находящихся в эксплуатации, ед.;

$\sum n_i$ – число изделий, отказавших за время t .

Оценка вероятности отказа определяется по формуле (3) [5]:

$$Q(t) = \sum_{i=1}^t n_i \cdot \frac{1}{N}, \quad (3)$$

где $Q(t)$ – оценка вероятности наступления отказа работы одежды в период времени наработки t ;

Пусть за время Δt_i число отказавших изделий увеличилось на Δn_i , тогда плотность вероятности отказов вычисляется по формуле (4) [5]:

$$f(t) = \lim_{\Delta t_i \rightarrow 0} \frac{1}{N} \cdot \frac{\Delta n_i}{\Delta t_i}, \quad (4)$$

где $f(t)$ – плотность вероятности наступления отказа работы одежды в период времени наработки t ;

Вероятность отказа одежды при наработке t , меньше требуемой t_1 , рассчитывается по формуле (5) [5]:

$$R(t \leq t_1) = \int_0^{t_1} f(t) dt, \quad (5)$$

где $R(t \leq t_1)$ – Вероятность отказа одежды при наработке t , меньше требуемой t_1 .

Тогда средняя наработка объекта (время реальной эксплуатации одежды) до первого отказа вычисляется по формуле (6) [5]:

$$t_{cp} = \sum_{i=1}^N \frac{t_i}{N}, \quad (6)$$

где t_i – время безотказной работы i -го объекта (изделия).

Интенсивность отказов рассчитывается по формуле (7) [5]:

$$\lambda(t) = \frac{1}{N_u} \cdot \frac{\Delta n_i}{\Delta t_i}, \quad (7)$$

где λ – интенсивность потока отказов;

N_u – число изделий, сохранивших работоспособность к моменту времени t .

Интенсивность отказов связана с плотностью вероятности отказов соотношением (8) [5]:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)}, \quad (8)$$

Для большинства объектов, в том числе и одежды, как инженерной конструкции, изменение интенсивности отказов по времени происходит в три этапа.

Первый этап, называемый периодом приработки, определяется временем $t_{пр}$ и характеризуется, как правило, повышенным значением интенсивности отказов. Второй период считают периодом нормальной эксплуатации, когда отказы носят случайный характер и происходят внезапно из-за усталостного разрушения. К концу второго этапа в результате появления постепенных отказов, изнашивания и других процессов интенсивность отказов увеличивается и начинается третий этап. Когда на третьем этапе интенсивность отказов достигает некоторого определенного уровня, эксплуатация одежды считается нецелесообразной.

Ресурс объекта (одежды) определяется продолжительностью от момента окончания приработки t_{np} до момента t_p – начала заметного возрастания интенсивности отказов в конце второго периода. Во втором периоде интенсивность отказов λ можно считать постоянной.

Вероятность безотказной работы описывается уравнением (9):

$$R(t) = \exp(-\lambda t) \quad (9)$$

Формула (8) выражает экспоненциальный закон надежности. Так как математическое ожидание эксплуатационного ресурса одежды t_c равно $1/\lambda$, то формулу (8) можно представить в виде (10):

$$R(t) = \exp\left(-\frac{t}{t_c}\right), \quad (10)$$

где t_c – математическое ожидание эксплуатационного ресурса одежды, часы.

Для расчета надежности водозащитной одежды необходимо определить перечень нормируемых показателей надежности и выбрать показатели свойств, выход за пределы допустимых значений которых можно использовать в качестве проявления отказа. Определение диапазона распределения ресурса ($T_{min} \div T_{max}$) помогает прогнозировать наиболее вероятный срок носки предмета одежды для установления периодичности замены специально снаряжения и экипировки.

Оценивать этот показатель можно по изменению водонепроницаемости, при этом нижний допустимый предел показателя может быть установлен по нормативно-справочной литературе в соответствии с назначением одежды.

Рассмотрим ресурс материалов верха спортивной экипировки байдарочника и каноиста, прошедшей экспериментальную носку, результаты которой описаны подробно в источнике [6].

Состояние материалов верха спортивной водозащитной экипировки должно обеспечивать отсутствие проникания воды в пространство под одеждой под действием брызг воды, образующихся в результате гребли, под действием волны при движении в кильватере соперника, при дожде и ветре средней интенсивности. Согласно источнику [7], водонепроницаемость одежды, защищающей от дождя средней интенсивности, должна быть не ниже 0,074 МПа, поэтому критерием оценки ресурса материалов верха было выбрано значение водонепроницаемости материалов верха не ниже 0,074 МПа.

Диапазон изменения ресурса экипировки рассчитывался по результатам экспериментальной носки. В течение 200 часов (100 тренировок) экспериментальной носки измерялась водонепроницаемость материалов верха примерно через каждые 40 часов носки. Для измерения водонепроницаемости применяли портативный прибор и методику, разработанные в УО «ВГТУ», позволяющие проводить измерение водонепроницаемости материала на участке готового изделия. Сущность методики и конструкция прибора представлены в источнике [8].

Исследовались материалы двух различных структурных типов – 3-слойный композиционный слоистый материал, содержащий полиэфируретановую мембрану, соединенную точечно с тканой текстильной полиэфирной основой с одной стороны и полиэфирным трикотажным полотном с изнаночной стороны (№1, обозначен желтым цветом на рисунке 1), и 2-слойный композиционный слоистый материал, содержащий полиэфируретановую мембрану, нанесенную на тканую текстильную полиэфирную основу (№2, обозначен синим цветом на рисунке 1). Из указанных материалов были изготовлены жилет и куртка, внешний вид которых представлен на рисунке 1. Водонепроницаемость образцов измеряли до изготовления изделия и трижды в процессе носки на готовых изделиях. Точки измерения водонепроницаемости отмечены на рисунке 1 в соответствии с порядковым номером измерения. Для обеспечения одинаковых условий эксплуатации материалов детали, изготовленные из одного материала, в изделиях располагали таким образом, чтобы исследуемые участки деталей получали примерно одинаковые эксплуатационные нагрузки.



Рисунок 1 – Внешний вид спортивной экипировки и точки измерения водонепроницаемости образцов

В эксперименте приняли участие 10 носчиков. Для каждого из 10 носчиков, эксплуатирующих жилет и куртку, была составлена карточка наблюдения. После статистической обработки результатов вычислялась скорость снижения водонепроницаемости материалов верха по формуле (11):

$$v_i = \frac{P_0 - P_i}{\Delta t_i} \quad (11)$$

где v_i – скорость снижения водонепроницаемости материала за время Δt_i , МПа/час;

P_0 – начальное значение водонепроницаемости при $\Delta t_i = 0$, МПа;

P_i – среднее значение водонепроницаемости по истечении времени Δt_i , МПа;

Δt_i – время от начала эксплуатации изделия до момента измерения P_i , часы.

Средняя скорость снижения водонепроницаемости материалов верха рассчитывалась по формуле (12):

$$v_c = \frac{\sum v_i}{i} \quad (12)$$

где v_c – средняя скорость снижения водонепроницаемости материала за время t , МПа/час;

i – количество измерений водонепроницаемости материалов верха в течение всего срока экспериментальной носки;

Определялось среднее квадратическое отклонение скорости снижения водонепроницаемости по формуле (13).

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^4 (v_i - v_c)^2}{4}} \quad (13)$$

где σ_v – среднее квадратическое отклонение скорости снижения водонепроницаемости материала, МПа/час;

Коэффициент вариации скорости – по формуле (14).

$$V = \frac{\sigma_v}{v_c} \quad (14)$$

где V – коэффициент вариации.

Результаты расчетов представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты расчета скорости снижения водонепроницаемости материалов верха экипировки

Время носки, Δt_i , часы		Средняя водонепроницаемость по образцам, P_i , МПа		Скорость снижения водонепроницаемости, v_i , МПа/час		Среднее квадратическое отклонение скорости, s	
		№1	№2	№1	№2	№1	№2
$i = 0$	0	0,108	0,120			0,00006	0,000055
$i = 1$	80	0,077	0,101	0,00040	0,00024		
$i = 2$	120	0,041	0,075	0,00056	0,00038		
$i = 3$	160	0,032	0,065	0,00048	0,00035		
$i = 4$	200	0,024	0,044	0,00042	0,00038		
Средняя скорость снижения водонепроницаемости, v_c , МПа/час				0,00048	0,00034		
Коэффициент вариации скорости снижения водонепроницаемости, V						0,125	0,162

Так как скорость снижения водонепроницаемости материалов верха экипировки распределена по нормальному закону, то закон распределения ресурса материалов верха экипировки также нормальный. Минимальное значение ресурса принимается при $R(T) = 0,025$, когда вероятность наступления отказа (снижения уровня водонепроницаемости до 0,074 МПа) превысит 2,5%. Максимальное значение – при $R(T) = 0,975$, когда вероятность наступления отказа достигнет 97,5 %. Диапазон возможных значений ресурса ($T_{\min} \div T_{\max}$) будет охватывать 95 % возможных значений ресурса материалов верха экипировки.

Закон распределения ресурса материалов верха экипировки определяется выражением(15):

$$R(T) = 1 - \Phi \left(\frac{\frac{H}{V} - T}{\frac{v_c}{V \cdot T}} \right) \quad (15)$$

где T – минимальное или максимальное значение ресурса, часы;

H – предельно допустимый уровень водонепроницаемости, МПа;

v_c – средняя скорость снижения водонепроницаемости, МПа/час;

V – коэффициент вариации скорости снижения водонепроницаемости;

Φ – функция плотности стандартного нормального распределения (интеграла от плотности вероятностей) в интервале $\pm 2 \sigma$.

H / v_c – средний ресурс материалов верха экипировки, часы.

При $R(T) = 0,025$ имеем минимальное значение ресурса. Значение аргумента функции находим из таблицы значений функции стандартного нормального распределения: $x=1,96$. При $R(T) = 0,975$ имеем максимальное значение ресурса, из таблицы находим $x = -1,96$ [5].

Средний ресурс материала №2 найден из равенства (16):

$$T_{cp} = \frac{H}{v_c} = \frac{0,074}{0,00034} = 217,6(\text{часов}) \quad (16)$$

Тогда минимальное значение ресурса находим из равенств (17) и (18):

$$0,025 = 1 - \Phi \left(\frac{217,6 - T_{\min}}{0,162 \cdot T_{\min}} \right) \quad (17)$$

$$\Phi \left(\frac{217,6 - T_{\min}}{0,162 \cdot T_{\min}} \right) = 0,975 = \Phi(x), \quad (18)$$

где $x=1,96$.

Максимальное значение ресурса находим из равенств(19) и (20):

$$0,975 = 1 - \Phi \left(\frac{217,6 - T_{\max}}{0,162 \cdot T_{\max}} \right), \quad (19)$$

$$\Phi \left(\frac{217,6 - T_{\max}}{0,162 \cdot T_{\max}} \right) = 0,025 = \Phi (x) \quad (20)$$

где $x = -1,96$.

Приравнивая выражение в скобках и значение x , находим значение ресурса.

С доверительной вероятностью 0,95 ресурс экипировки находится в диапазоне ($T_{\min} \div T_{\max}$).

Результаты расчета показали, что средний ресурс использованных для изготовления экипировки материалов $T_{cp}^1 = 154$ часа и $T_{cp}^2 = 217$ часов активной тренировочной деятельности байдарочника.

Таким образом, выявлено, что композиционный водозащитный материал двухслойной структуры (№2) проявляет более высокий уровень надежности в процессе эксплуатации, проявляющийся в более длительном по сравнению с трехслойным материалом ресурсом водонепроницаемости спортивной экипировки. Результаты исследования позволяют сделать предположение о предпочтительном использовании таких композиционных материалов для изготовления водозащитной спортивной экипировки и среднем ресурсе такой одежды 217 часов, что приблизительно соответствует 100 тренировкам на открытой воде.

Список источников

1. *Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения* : ГОСТ 27.002. – Введ. 01.07.1990. – М : ИПК Издательство стандартов, 1990. – 32 с.
2. *Мишин, В. М. Управление качеством : учебник* / В. М. Мишин. — 2-е изд. – М : ЮНИТИ-ДАНА, 2005. – 463 с.
3. *Материаловедение кожевенно-обувного производства : учеб. пособие* / А.Н. Буркин [и др.]. — Минск: Беларус. энцикл. им. П. Бровки, 2011. — 310 с.
4. *Вентцель, Е. С. Теория вероятностей : учеб. для вузов* / Е. С. Вентцель. — 6-е изд. — М. : Высш. шк., 1999. — 576 с.

5. Рыжкин, А. А. *Основы теории надежности : учеб. пособие / А. А. Рыжкин, Б. Н. Слюсарь, К. Г. Щучев. – Ростов н / Д : Издат. центр ДГТУ, 2002. – 182 с.*
6. *Водонепроницаемость мембранных текстильных материалов в условиях эксплуатации / Д. К. Панкевич, Е. И. Ивашико // Вестник УО «ВГТУ» №1(38), 2020. – С. 91 – 99.*
7. *Метелёва, О. В. Теоретико-технологическая разработка процессов герметизации швейных изделий для повышения водозащитных свойств: дис. ... докт. техн. наук : 05.19.04/ О. В. Метелёва. – Иваново, 2007. – 253 л.*
8. *Прибор для определения водонепроницаемости материалов методом гидростатического давления: полезная модель ВУ10690 / Д. К. Панкевич, А. Н. Буркин, Р. С. Петрова, В. Д. Борозна ; – дата публ. 30.06.2015.*