

Научный журнал «Костюмология» / Journal of Clothing Science <https://kostumologiya.ru>

2023, Том 8, № 3 / 2023, Vol. 8, Iss. 3 <https://kostumologiya.ru/issue-3-2023.html>

URL статьи: <https://kostumologiya.ru/PDF/12TLKL323.pdf>

2.6.16. Технология производства изделий текстильной и легкой промышленности (технические науки)

Ссылка для цитирования этой статьи:

Котоменкова, О. Г. Прогнозирование износостойкости материалов специального назначения на основе теории подобия и анализа размерностей / О. Г. Котоменкова, А. В. Виноградова, С. В. Темоныкина, Н. В. Панкова // Костюмология. — 2023. — Т. 8. — № 3. — URL: <https://kostumologiya.ru/PDF/12TLKL323.pdf>

For citation:

Kotomenkova O.G., Vinogradova A.V., Temyakina S.V., Pankova N.V. Prediction of wear resistance of special-purpose materials based on similarity theory and dimensional analysis. *Journal of Clothing Science*. 2023; 8(3): 12TLKL323. Available at: <https://kostumologiya.ru/PDF/12TLKL323.pdf>. (In Russ., abstract in Eng.)

УДК 620.22; 677.017

ГРНТИ 64.29.81

Котоменкова Ольга Геннадьевна

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», Санкт-Петербург, Россия
Доцент Высшей школы сервиса и торговли
Кандидат технических наук, доцент
E-mail: kot-og@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0034-0315>

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=620741

Google Академия: <https://scholar.google.ru/citations?user=JrjiUnYAAAAJ>

SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57205389274>

Виноградова Анна Вячеславовна

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», Санкт-Петербург, Россия
Доцент Высшей школы сервиса и торговли
Кандидат технических наук, доцент
E-mail: ann-vin@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6039-429X>

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=288484

WoS: <https://www.webofscience.com/wos/author/rid/H-8802-2018>

SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57205391665>

Google Академия: https://scholar.google.ru/citations?user=fBWt_7gAAAAJ

Темоныкина Сабина Владимировна

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», Санкт-Петербург, Россия
E-mail: temonyakina98@gmail.com

Панкова Нина Владимировна

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», Санкт-Петербург, Россия
Советник при ректорате
Доктор экономических наук, профессор
E-mail: pankovnina@yandex.ru

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=403864

**Прогнозирование износостойкости
материалов специального назначения на основе
теории подобия и анализа размерностей**

Аннотация. В работе для разработки методики прогнозирования потребительских свойств материалов специального назначения была использована теория подобия и анализа размерностей.

Разработанная методика прогнозирования износостойкости материалов специального назначения после воздействия многократных стирок и циклов глажения, включающая этапы исследования, математической обработки результатов, моделирования и построения зависимостей через структурные элементы показателей, определяющих износоустойчивость в процессе воздействия исследуемых факторов.

С помощью теории подобия и анализа размерностей исходные параметры свойств и строения материалов специального назначения, предназначенных для изготовления военной одежды, объединены в несколько безразмерных показателей и их комплексов для моделирования значений показателей износостойкости тканей (изменения линейных размеров и разрывной нагрузки) после воздействия на них факторов износа (многократных стирок и циклов глажения).

Проведены исследования определения показателей износостойкости на основе стандартных методик оценки показателей качества материалов специального назначения.

Установлены условия подобия физических процессов, происходящих в модели и натурном объекте, и приведены результаты испытаний модели к условиям натурального объекта. Преобразованы функциональные зависимости между физическими параметрами в критериальные уравнения.

Определены модели прогнозирования (при $0 \leq N \leq 25$) площади тканей, изменившейся под воздействием многократных стирок, разрывной нагрузки по основе и утку материалов специального назначения после воздействия многократных стирок и циклов глажения.

Математические модели позволяют с помощью системы уравнений, описывающих изменение отдельных показателей после воздействия исследуемых факторов, прогнозировать износостойкость тканей для военной одежды с высокой точностью.

Ключевые слова: материалы специального назначения; военная одежда; износостойкость; прогнозирование; показатели износостойкости; теория подобия и анализа размерностей; факторы износа тканей

Введение

В процессе эксплуатации на военную одежду воздействуют различные факторы внешней среды, в результате чего она загрязняется и подвергается стирке и глажению, что в свою очередь оказывает негативное влияние на износостойкость материалов специального назначения. При этом к качеству материалов, предназначенных для изготовления военной одежды, предъявляются повышенные требования с учетом специфических условий эксплуатации изделий. Однако оценка износостойкости материалов специального назначения проводится при выпуске их в обращение и не учитывается изменение их потребительских свойств в процессе эксплуатации после воздействия на них факторов износа.

Исследования авторов [1] показывают, что износ текстильных материалов представляет собой сложный процесс, который зависит от различных факторов, таких как состав используемого при выработке ткани сырья, структуры пряжи и нитей, вида применяемой отделки, условий эксплуатации, технологии текстильного производства. Влияние данных факторов на различные материалы при отличных условиях эксплуатации сказывается по-разному.

Так как износ материалов происходит во времени, по данным А.Н. Соловьева [2] для оценки процесса изнашивания применяют кинетические характеристики свойств материалов.

Оценка и изучение износа текстильных материалов производится двумя способами [1]:

- лабораторный износ образцов при помощи оборудования (лампы дневного света, сушка, глажение, смятие, отдых, истирание);
- опытная носка, т. е. наблюдение за износом изделий в условиях реальной эксплуатации.

Вследствие того, что опытная носка имеет весьма длительный срок и требует больших затрат, ее меняют на быстрый процесс изнашивания в лабораторных условиях.

Изнашивание текстильных материалов представляет собой многофакторный процесс, именно поэтому его нельзя оценить только одним показателем. Для оценки данного показателя целесообразно использовать различные свойства и показатели ткани, в том числе, например, разрывную нагрузку, разрывное удлинение, устойчивость к многократному изгибу, растяжению и изменению линейных размеров после мокрых обработок и химических чисток и др.

В процессе эксплуатации текстильных изделий, выработанных из специальных материалов, а в особенности из тканей, предназначенных для изготовления изделий вещевого имущества военнослужащих (летняя форма одежды), ткань подвергается сильной загрязненности, что приводит к снижению надежности материала и снижению показателя гигиенических свойств, так как меняется показатель гигроскопичности материала, паропроницаемости, воздухопроницаемости, помимо этого происходит изменение окраски материала, вследствие чего снижается маскируемость военнослужащих, срок носки таких изделий существенно снижается, даже при условии, что прочностные свойства изделия достаточно высоки [3].

Следует отметить, что исследования [4] показывают, что наибольший износ материалов специального назначения происходит под влиянием многократных стирок и глажения, так как помимо механических воздействий на ткань воздействует высокая температура, действие моющих средств, которые порой содержат весьма агрессивные поверхностно-активные вещества и разрушают структуру ткани.

По А.Н. Соловьеву [2] следует, в первую очередь, учитывать следующие виды усадки:

- необратимая усадка, при такой усадке напряжения, которые создаются в пряже в процессе обработки, релаксирует, когда одежда находится в мокром состоянии;
- обратимая усадка, при которой величина усадка изменяется в соответствии с количеством влаги, содержащимся в ткани.

Для расчета усадки в основе формулы, предложенной группой авторов [5], лежит принцип расчета поверхностной и объемной усадки.

При увеличении количества стирок величина общей усадки материала возрастает, приближаясь к некоторому пределу, который является максимальной или полной усадкой материала. В исследованиях А.Н. Соловьева [2] предложен расчетно-экспериментальный метод для определения величины полной усадки.

По данным А.Н. Соловьева [6] изменение линейных размеров, а именно — их уменьшение происходит из-за отсутствия обратимой деформации материала или нитей, из которых состоит данный материал. От набухания увеличивается поперечное сечение нитей

утка и основы, их изогнутость повышается, нити одной системы распрямляются, что вызывает изгиб нитей другой системы и усадку.

Усадка материала, по мнению ряда авторов [7], в большей степени зависит от остаточной уработки пряжи. Уработка пряжи, в свою очередь, — от большого количества факторов, которые можно разделить на две группы:

- факторы, которые связаны с технологическими процессами ткачества и отделки;
- факторы, которые связаны со структурными характеристиками тканей (вид переплетения, плотность ткани, толщина нитей основы и утка).

Волокнистый состав — один из основных критериев, оказывающих влияние на усадку тканей. Так исследования авторов [8] показывают, что при введении в состав хлопчатобумажных тканей синтетических волокон (лавсан, капрон, поливинилхлорид) повышается уровень стабильности изменения линейных размеров после мокрых обработок.

Также результаты исследования [3] свидетельствуют, что на усадку после стирки оказывают влияние набухание, релаксация и трение между волокнами в процессе стирок.

Так, процесс уже первой стирки приводит к набуханию волокон, поэтому меняет размер и форму нитей, благодаря последующим процессам стирки эти деформации исчезают из-за изменения структуры нитей [1]. По причине таких деформаций на некоторых участках материала нити волокна слипаются, при сушке появляются свободные промежутки, во время последующих стирок происходит перегруппировка волокон, что способствует усадке.

Трение между волокнами и нитями тормозится при усадке. Трение зависит от строения тканей, соответственно, изменение линейных размеров материалов происходит по причине увеличения поперечного сечения нитей, которое происходит при набухании, управлять этим можно при помощи строения ткани.

По мнению Л.И. Вишневецкой и В.Г. Зориной [9] наиболее сильно подвержены изменению линейных размеров ткани с высоким коэффициентом уплотненности по причине более плотного расположения в такой ткани волокон.

В исследованиях Н.Ф. Сурниной и Ф.М. Розанова [10] описано, что усадка материала возрастает до конкретного максимума при увеличении плотности по противоположной системе. Дальнейшее увеличение плотности влечет к тому, что усадка будет снижаться, следовательно, наибольшая усадка будет системе нитей, которая больше всего уплотнена.

В работе Н.Н. Тхелидзе [11] было установлено, что усадка по основе зависит от плотности нитей по основе, чем больше плотность нитей по данной системе — тем выше усадка, при увеличении плотности нитей по утку, усадка ткани по направлению основы снижается.

Согласно исследованиям Н.Г. Савчук и С.Е. Жариковой [12] в процессе стирки на изменение линейных размеров ткани после мокрых обработок оказывают влияние многократные истирания, деформации, которые происходят в процессе механических воздействий, а также температура и состав моющего средства. Изменение линейных размеров после мокрых обработок происходит после трех-пяти стирок.

А.Н. Соловьевым [2] установлено, что многократные стирки приводят к изменению физико-химических и механических свойств материалов.

Дополнительно исследования авторов [1] показали, что в результате воздействия многократных стирок снижается воздухопроницаемость материала, разрывная нагрузка, однако, разрывное удлинение увеличивается. Кроме того, результатом многократных стирок

является изменение поверхности и внешнего вида ткани, ослабление волокон, постепенное их разрушение, ткань теряет свои основные свойства, первоначальную окраску, в результате чего изделие из этой ткани становится непригодным для дальнейшей эксплуатации [3].

О.Г. Котоменковой, С.В. Темоныкиной и др. [7] отмечено, что значительную роль в разрушении текстильных материалов играет глажение.

По данным исследований [13] при глажении и в особенности при глажении с запариванием происходит термоокислительная деструкция текстильных материалов (инициирование радикальных процессов, их развитие и обрыв цепи), сопровождающаяся ухудшением эксплуатационных свойств текстильных материалов (потеря, снижение механической прочности, изменение окраски и другие).

По данным авторов [1] глажение хлопковых и льняных волокон требует более высокого температурного нагрева рабочей поверхности утюга за счет того, что водородные связи целлюлозных волокон в составе ткани крепко связаны друг с другом и для их разрыва требуется намного больше энергии. Глажение с запариванием изделий из льна и хлопка происходит намного проще за счет того, что вода обладает увлажняющим свойством, что облегчает разрыв диполь-дипольных связей. По причине того, что синтетические волокна не содержат в составе волокон целлюлозы, увлажнение таких тканей абсолютно безрезультатно.

Кроме того, О.Г. Котоменкова и А.В. Виноградова [14] отмечают, что при влажно-тепловой обработке (глажении, прессовании) изделий из тканей, содержащих синтетические волокна, в некоторых случаях появляется тепловая усадка ткани. Ткани с синтетическими волокнами термопластичны, что обуславливает возникновение необратимых деформаций (усадки) при воздействии на ткани высокой температуры.

Материалы настоящей статьи являются частью диссертационного исследования одного из авторов.

Объекты и методы исследования

В качестве объекта исследования была выбрана ткань хлопкополиэфирная камуфлированной расцветки «Цифра» арт. 1220, предназначенная для изготовления костюма летнего полевого военнослужащих ВС РФ.

Для разработки методики прогнозирования износостойкости материалов специального назначения использована теория подобия и анализа размерностей [15; 16], которая позволяет изучать влияние на процесс каждого фактора не только по отдельности, но и в совокупности с другими комплексными параметрами, определяющими сущность процесса [17; 18], и достаточно точно построить математические модели, в которых можно реализовать формализованное сопоставление экспериментальных и фактических данных [19; 20].

Для прогнозирования износостойкости материалов для военной одежды были установлены условия подобия физических процессов, происходящих в модели и натурном объекте, и приведены результаты испытаний модели к условиям натурального объекта.

Существующие связи между параметрами процесса и параметрами элементов системы, в которой этот процесс протекает, были представлены в виде полной зависимости (1):

$$f(P_1; P_2; P_m) = 0, \quad (1)$$

где P_1, P_2, P_m — параметры процессов (параметров); m — количество параметров.

Влияние параметров процессов и количества параметров представлено в виде безразмерного показателя (2):

$$X = \eta = f(P_1; P_2; P_m) \quad (2)$$
$$\eta = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_n,$$

где X — исследуемый процесс (показатель); η — безразмерный показатель, характеризующий изменение процесса (показателя).

Используя положения теории подобия и анализа размерностей, была разработана методика прогнозирования износостойкости материалов специального назначения после воздействия стирки и глажения, включающая этапы исследования, математической обработки результатов, моделирования и построения зависимостей через структурные элементы показателей, определяющих износоустойчивость в процессе воздействия исследуемых факторов (рис. 1).

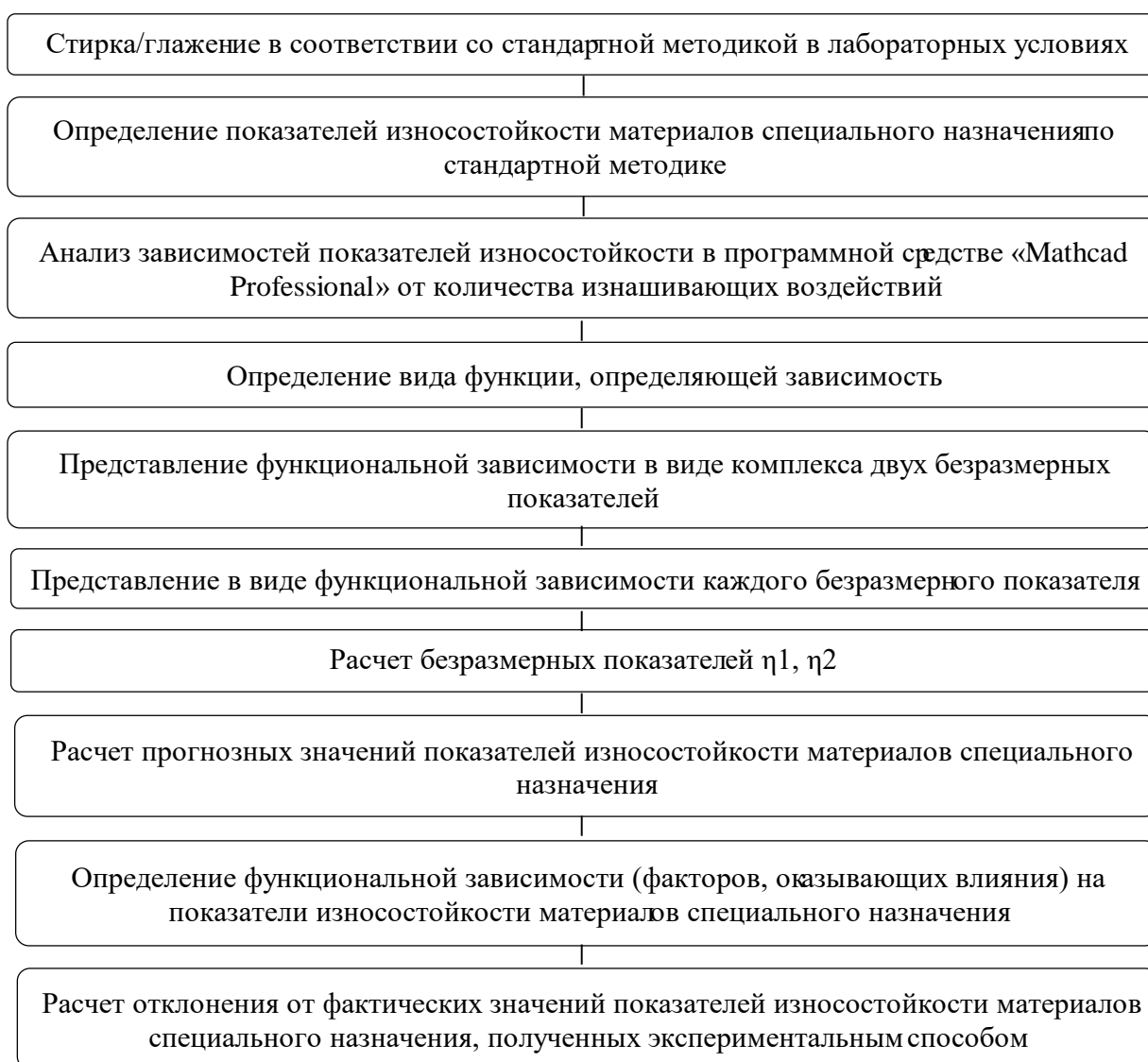


Рисунок 1. Методика прогнозирования износостойкости материалов специального назначения после воздействия стирки и глажения (разработано автором)

В работе были использованы стандартные методы определения показателей в лабораторных условиях, а также методы прикладной математики и математической статистики и методы корреляционно-регрессионного анализа с помощью программ Microsoft Excel и MathCad Professional. Для оценки достоверности результатов в программе рассчитывался коэффициент согласия Пирсона.

Результаты исследования и их анализ

Для исследования влияния количества стирок на изменение линейных размеров исследуемого образца были получены зависимости поверхностной и объемной усадки от количества циклов стирок образцов (рис. 2).

Анализ зависимостей поверхностной и объемной усадки исследуемого образца от количества стирок, показывает, что они с высокой степенью достоверности аппроксимации определяются экспоненциальной функцией.

Модель влияния многократных стирок на изменение линейных размеров материалов специального назначения после мокрых обработок представлена в виде (3):

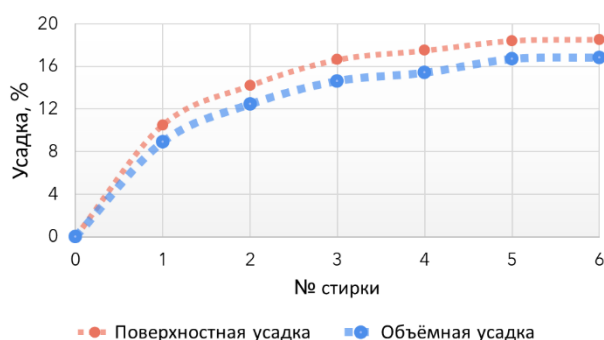


Рисунок 2. Изменение линейных размеров тканей после стирки (разработано автором)

$$y = -ae^{-bx} + c, \quad (3)$$

где y — изменение линейных размеров тканей, %; x — число стирок; a , b , c — расчетные коэффициенты.

Также оценивалось влияние многократных стирок и глажения на разрывную нагрузку материалов специального назначения (рис. 3).

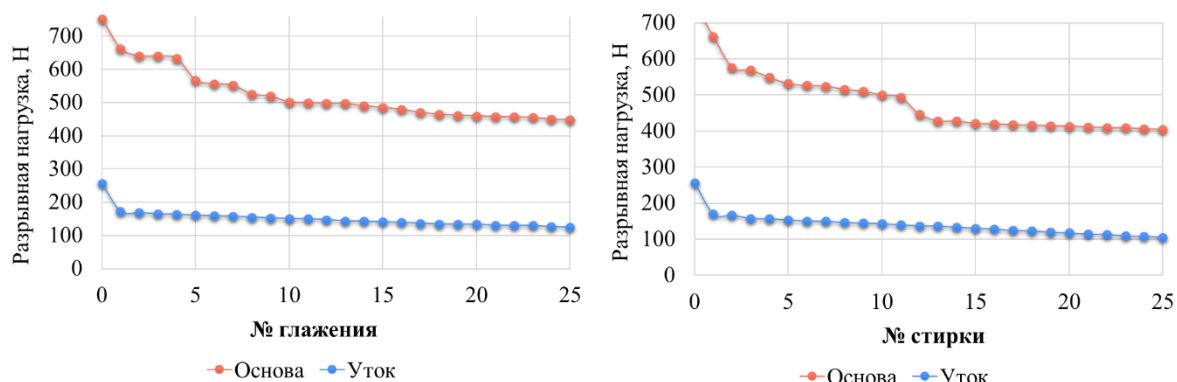


Рисунок 3. Изменение разрывной нагрузки тканей после стирки и глажения (разработано автором)

Изменение величины разрывной нагрузки исследуемого образца, полученное при растяжении образцов по направлению основы, происходит более интенсивно, чем по направлению утка. Данное обстоятельство связано, прежде всего, с тем, что в процессе ткачества нити основы имеют большее натяжение, чем нити утка, следовательно, релаксация напряжений, возникающая в процессе действия различных факторов, по направлению основы проявляется более интенсивно, что влияет на изменение разрывных характеристик.

Для исследования влияния стирки и глажения на разрывную нагрузку исследуемого образца были получены зависимости разрывной нагрузки от количества циклов стирки и глажения. Анализ зависимостей разрывной нагрузки от количества воздействий стирки и глажения показывает, что они также определяются экспоненциальной функцией.

Функциональная зависимость изменения размеров тканей от исходных параметров ее строения и количества стирок выглядит следующим образом (4):

$$S_c = f(S_{исх}; N; T_o; T_y; P_o; P_y), \quad (4)$$

где S_c — площадь исследуемого образца ткани после стирок, m^2 ; $S_{исх}$ — исходная площадь исследуемого образца, m^2 ($S_{исх} = 0,04 m^2$); N — количество стирок; T_o, T_y — линейная плотность нитей основы и утка, текс; P_o, P_y — плотность ткани по основе и утку, число нитей на 10 см.

На основе положений теории подобия и анализа размерностей зависимость изменения линейных размеров материала после мокрых обработок можно представить в виде комплекса безразмерных показателей.

Отношение массы уточных нитей к массе основных нитей характеризует структурные характеристики материала и является параметром строения ткани, данное соотношение предложено в работах Ю.С. Шустова и др. [16; 18], занимающегося исследованием методов подобия и размерности в текстильной промышленности. Так как на изменение линейных размеров тканей имеют влияние два комплекса, то формула для расчета безразмерного показателя, характеризующего изменение площади тканей после стирки, будет выглядеть как произведение двух безразмерных показателей (5):

$$\frac{S_c}{S_{исх}} = \eta = f\left(N; \frac{P_y T_y}{P_o T_o}\right), \quad (5)$$
$$\eta = \eta_1 \cdot \eta_2,$$

где η — безразмерный показатель, характеризующий изменение площади тканей после стирки; $\frac{P_y \cdot T_y}{P_o \cdot T_o}$ — безразмерный показатель, характеризующий отношение массы уточных нитей к массе основных нитей; η_1 — безразмерный показатель, характеризующий действие фактора стирки; η_2 — безразмерный показатель, характеризующий структурные характеристики ткани.

Уравнение расчета площади исследуемого образца, изменившейся после многократных стирок, принимает следующий вид (6):

$$\eta_1 = 0,279e^{-0,827N} + 0,720,$$
$$\eta_2 = f\left(\frac{P_y T_y}{P_o T_o}\right) = \frac{\frac{P_y T_y}{P_o T_o}}{0,908 \frac{P_y T_y}{P_o T_o} + 0,0067}, \quad (6)$$
$$S_c = S_{исх} \cdot 0,279e^{-0,827N} + 0,720 \left(\frac{\frac{P_y T_y}{P_o T_o}}{0,908 \frac{P_y T_y}{P_o T_o} + 0,0067} \right),$$

Отклонение значений, полученных во время эксперимента, от расчетных не превышает 8,74 %, коэффициент согласия Пирсона равен 0,895.

В качестве основных факторов, влияющих на разрывную нагрузку $R_{ст}(N)$ ткани, подвергавшейся многократным стиркам, выступают (7):

$$R_{ст} = f(R_{исх}; N; \Pi),$$
$$\Pi = \frac{\Pi_y T_y}{\Pi_0 T_0}. \quad (7)$$

Модель прогнозирования разрывной нагрузки материалов специального назначения после воздействия стирки имеет вид (8):

$$\frac{R_{ст}}{R_{исх}} = \eta = f\left(N; \frac{\Pi_y T_y}{\Pi_0 T_0}\right),$$
$$\eta = \eta_1 \cdot \eta_2, \quad (8)$$

где η — безразмерный показатель, характеризующий изменение разрывной нагрузки после воздействия стирок.

Таким образом, уравнение для расчета разрывной нагрузки исследуемого образца, подвергшегося многократным стиркам, имеет вид по основе (9):

$$\eta_1 = f(N) = 0,407e^{-147N} + 0,531,$$
$$\eta_2 = f\left(\frac{\Pi_y T_y}{\Pi_0 T_0}\right) = \frac{\frac{\Pi_y T_y}{\Pi_0 T_0}}{1,014 \frac{\Pi_y T_y}{\Pi_0 T_0} - 0,02}, \quad (9)$$
$$R_{ст} = R_{исх} \cdot 0,407e^{-147N} + 0,531 \cdot \left(\frac{\frac{\Pi_y T_y}{\Pi_0 T_0}}{1,014 \frac{\Pi_y T_y}{\Pi_0 T_0} - 0,02}\right),$$

и по утку (10):

$$\eta_1 = f(N) = 0,380e^{-192N} + 0,565,$$
$$\eta_2 = f\left(\frac{\Pi_y T_y}{\Pi_0 T_0}\right) = \frac{\frac{\Pi_y T_y}{\Pi_0 T_0}}{0,951 \frac{\Pi_y T_y}{\Pi_0 T_0} + 0,065}, \quad (10)$$
$$R_{ст} = R_{исх} \cdot 0,380e^{-192N} + 0,565 \cdot \left(\frac{\frac{\Pi_y T_y}{\Pi_0 T_0}}{0,951 \frac{\Pi_y T_y}{\Pi_0 T_0} + 0,065}\right).$$

Отклонение значений, полученных во время эксперимента, от расчетных не превышает 9,59 %, коэффициент согласия Пирсона равен 0,875.

Аналогичным образом представлена зависимость разрывной нагрузки ткани от воздействия глажения. На разрывную нагрузку оказывает влияние количество глажений, а также структурные характеристики исследуемого материала.

При помощи теории подобия и анализа размерностей данную зависимость можно представить в виде комплекса безразмерных показателей (11):

$$R_{гл} = f(R_{исх}; N; \Pi),$$
$$\Pi = \frac{\Pi_y T_y}{\Pi_0 T_0}, \quad (11)$$

где $R_{гл}$ — разрывная нагрузка исследуемого образца после воздействия нескольких циклов глажения, N ; $R_{исх}$ — первоначальная разрывная нагрузка исследуемого образца, N ; Π — параметр строения исследуемой ткани.

Модель прогнозирования разрывной нагрузки материалов специального назначения после воздействия глажения имеет вид (12):

$$\frac{R_{ст}}{R_{исх}} = \Pi = f\left(N; \frac{\Pi_y T_y}{\Pi_0 T_0}\right), \quad (12)$$

$$\Pi = \Pi_1 \cdot \Pi_2,$$

где Π — безразмерный показатель, характеризующий изменение разрывной нагрузки после воздействия глажения.

Таким образом, уравнение для расчета разрывной нагрузки исследуемого образца, подвергшегося нескольким циклам глажения, имеет вид по основе (13):

$$\Pi_1 = f(N) = 0,392e^{-0,156N} + 0,596,$$

$$\Pi_2 = f\left(\frac{\Pi_y T_y}{\Pi_0 T_0}\right) = \frac{\frac{\Pi_y T_y}{\Pi_0 T_0}}{1,03 \frac{\Pi_y T_y}{\Pi_0 T_0} + 0,08}, \quad (13)$$

$$R_{ст} = R_{исх} \cdot 0,392e^{-0,156N} + 0,596 \cdot \left(\frac{\frac{\Pi_y T_y}{\Pi_0 T_0}}{1,03 \frac{\Pi_y T_y}{\Pi_0 T_0} + 0,08}\right),$$

и по утку (14):

$$\Pi_1 = f(N) = 0,478e^{-0,254N} + 0,543,$$

$$\Pi_2 = f\left(\frac{\Pi_y T_y}{\Pi_0 T_0}\right) = \frac{\frac{\Pi_y T_y}{\Pi_0 T_0}}{0,958 \frac{\Pi_y T_y}{\Pi_0 T_0} + 0,048}, \quad (14)$$

$$R_{ст} = R_{исх} \cdot 0,478e^{-0,254N} + 0,543 \cdot \left(\frac{\frac{\Pi_y T_y}{\Pi_0 T_0}}{0,958 \frac{\Pi_y T_y}{\Pi_0 T_0} + 0,048}\right).$$

Отклонение значений, полученных во время эксперимента, от расчетных не превышает 9,56 %, критерий согласия Пирсона равен 0,770.

На основе полученных зависимостей прогнозирование износоустойчивости материалов специального назначения может быть осуществлено с помощью системы уравнений, описывающих изменение отдельных показателей после воздействия исследуемых факторов (15):

$$\left\{ \begin{array}{l} y = S_{исх} \cdot 0,497e^{-147N} + 0,720 \cdot \left(\frac{\frac{\Pi_y T_y}{\Pi_0 T_0}}{0,908 \frac{\Pi_y T_y}{\Pi_0 T_0} + 0,0067}\right) \\ y = R_{исх} \cdot 0,407e^{-147N} + 0,531 \cdot \left(\frac{\frac{\Pi_y T_y}{\Pi_0 T_0}}{1,014 \frac{\Pi_y T_y}{\Pi_0 T_0} - 0,02}\right) \\ y = R_{исх} \cdot 0,380e^{-192N} + 0,565 \cdot \left(\frac{\frac{\Pi_y T_y}{\Pi_0 T_0}}{0,951 \frac{\Pi_y T_y}{\Pi_0 T_0} + 0,065}\right) \\ y = R_{исх} \cdot 0,392e^{-156N} + 0,596 \cdot \left(\frac{\frac{\Pi_y T_y}{\Pi_0 T_0}}{1,03 \frac{\Pi_y T_y}{\Pi_0 T_0} - 0,08}\right) \\ y = R_{исх} \cdot 0,478e^{-0,254N} + 0,543 \cdot \left(\frac{\frac{\Pi_y T_y}{\Pi_0 T_0}}{0,958 \frac{\Pi_y T_y}{\Pi_0 T_0} + 0,048}\right) \end{array} \right. \quad (15)$$

Таким образом, с помощью разработанного метода можно определять необходимые показатели качества материалов специального назначения и прогнозировать показатели износоустойчивости военной одежды с высокой точностью, что подтверждается отклонением значений, полученных в результате эксперимента, от фактических не более чем на 10 % и значением критерия согласия Пирсона, стремящимся к единице.

Выводы

С прогнозирования износоустойчивости материалов специального назначения с помощью теории подобия и размерностей на основе результатов проведенных исследований сделаны следующие выводы:

1. С помощью теории подобия и анализа размерностей исходные параметры свойств и строения материалов специального назначения объединены в несколько безразмерных комплексов для определения показателей износоустойчивости тканей после воздействия на них факторов износа.
2. Определена модель прогнозирования площади материала специального назначения, изменившейся под воздействием многократных стирок при $0 \leq N \leq 25$. Отклонение экспериментальных значений от расчетных не превышает 8,74 %, критерий согласия Пирсона равен 0,895.
3. Определена модель прогнозирования разрывной нагрузки по основе и утку материала специального назначения после воздействия стирки, формула применим при $0 \leq N \leq 25$. Отклонение экспериментальных значений от расчетных не превышает 9,59 %, критерий согласия Пирсона равен 0,875.
4. Определена модель прогнозирования разрывной нагрузки по основе и утку материала специального назначения после воздействия глажения при $0 \leq N \leq 25$. Отклонение экспериментальных значений от расчетных не превышает 9,56 %, критерий согласия Пирсона равен 0,770.
5. Математические модели позволяют с помощью системы уравнений, описывающих изменение отдельных показателей после воздействия исследуемых факторов, прогнозировать износоустойчивость материалов специально назначения с высокой точностью, что подтверждается отклонением значений, полученных в результате эксперимента, от фактических не более чем на 10 % и значением критерия согласия Пирсона, стремящимся к единице.

ЛИТЕРАТУРА

1. Котоменкова, О.Г., Зезин, В.А., Горина, Е.В. Изменение свойств материалов для изготовления военной одежды в процессе эксплуатации: Монография. — Саратов: Наука, 2007. — 80 с.
2. Соловьев, А.Н. Влияние многократных стирок на усадку полотен // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. — 1981. — № 3. — С. 113–114.

3. Темонякина, С.В., Котоменкова, О.Г. Анализ влияния стирки на износостойчивость тканей специального назначения / Инновационные технологии, экономика и менеджмент в промышленности: Сборник научных статей по итогам XII международной научной конференции. — Волгоград: НПП Медпромдеталь, 2021. — С. 153–155.
4. Котоменкова, О.Г., Ермилова, И.А. О влиянии температурно-влажностных режимов на прочность тканей специального назначения военного ассортимента / Научно-технический сборник статей. — Вольск, ВВВУТ, 2001. — С. 40–44.
5. Лустгартен, Н.В., Нестерова, О.В., Цибизова, Т.Д. Взаимосвязь вытяжки пряжи, уработки основы и потребительской усадки льняной ткани // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. — 2003. — № 3. — С. 54–57.
6. Соловьев, А.Н. Определение полной усадки // Текстильная промышленность. — 1956. — № 2. — С. 46–48.
7. Темонякина, С.В., Миндова, Т.И., Дашкевич, О.А., Котоменкова, О.Г. Влияние факторов износа на структуру материалов специального назначения / Фундаментальные и прикладные исследования в области управления, экономики и торговли: Сборник трудов всероссийской научной и учебно-практической конференции. — СПб.: Изд-во политехн. ун-та, 2020. — С. 420–425.
8. Миголь, Т.Н., Галык, И.С., Семак, Б.Д. Исследование влияния строения и отделки разнокомпонентных трикотажных плательно-костюмных полотен на изменение их линейных размеров / Надежность, экономичность и качество текстильных материалов: Тезисы докладов XII Всесоюзной научной конференции по текстильному материаловедению. Т. 2. — М.: МТИ, 1988. — С. 127–129.
9. Вишневская, Л.И., Зорина, В.Г. О влиянии переплетений на усадку тканей / Надежность, экономичность и качество текстильных материалов: Тезисы докладов XII Всесоюзной научной конференции по текстильному материаловедению. Т. 2. — М.: МТИ, 1988. — С. 77–78.
10. Дробот, Е.В., Загора, О.В., Рязанова, Е.Ю. Анализ изменения параметров строения ткани на этапах ее изготовления // Вестник Витебского государственного технологического университета. — 2015. — С. 21–30.
11. Тхелидзе, Н.Н. Исследование факторов, влияющих на усадку швейных и текстильных изделий // Norwegian Journal of Development of the International Science. — 2018. — № 16. — С. 49–52.
12. Савчук, Н.Г., Жарикова, С.Е. Влияние условий стирки на изменение линейных размеров бельевых тканей / Надежность, экономичность и качество текстильных материалов: Тезисы докладов XII Всесоюзной научной конференции по текстильному материаловедению. Т. 2. — М.: МТИ, 1988. — С. 51–52.
13. Котоменкова, О.Г., Темонякина, С.В. Влияние стирки и глажения на качество материалов для изготовления специальной одежды и разработка предложений по совершенствованию ассортимента в розничном торговом предприятии / Экспертиза. Качество. Технологии: Сборник материалов Международной научно-практической конференции, посвященной 65-летию Сибирского университета потребительской кооперации. — Новосибирск: Изд-во Сибирского университета потребительской кооперации, 2020. — С. 282–287.

14. Котоменкова, О.Г., Виноградова, А.В. Влияние факторов износа на деструкцию материалов специального назначения // Костюмология. — 2020. — Т. 5. — № 4. — С. 19.
15. Северцев, Н.А., Шолкин, В.Г., Ярыгин, Г.А. Статистическая теория подобия: надежность технических систем. — М.: Наука, 1986. — 204 с.
16. Тюменев, Ю.Я., Шустов, Ю.С., Курденкова, А.В., Назарова, Ю.В., Галимулин А.Х. Использование теории подобия при прогнозировании прочностных характеристик нетканых материалов технического назначения // Технология текстильной промышленности. — 1993. — № 1. — С. 61–65.
17. Седов, Л.И. Методы подобия и размерности в механике. — М.: Наука, 1987. — 430 с.
18. Кашеев, О.В., Шустов, Ю.С. Моделирование разрывной нагрузки хлопкового волокна тонковолокнистых сортов хлопчатника // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. — 2022. — № 4 (400). — С. 52–55.
19. Макаров, П.В., Иглов, М.А. Теория подобия в среде моделирования / Поколение будущего: Взгляд молодых ученых — 2019: Сборник научных статей 8-й Международной молодежной научной конференции. — Курск: Юго-Западный государственный университет, 2019. — С. 327–329.
20. Кузнецов, В.В., Трухачев, В.И. Применение теории подобия для обработки результатов эксперимента / Теория, постановка и результаты агроинженерного эксперимента: Сборник научных трудов. — Воронеж: Воронежский государственный аграрный университет, 1999. — С. 9–15.

Kotomenkova Olga Gennadijevna

Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University, Saint-Petersburg, Russia
E-mail: kot-og@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0034-0315>

RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=620741

Google Академия: <https://scholar.google.ru/citations?user=JrjiUnYAAAAJ>

SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57205389274>

Vinogradova Anna Vyacheslavovna

Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University, Saint-Petersburg, Russia
E-mail: ann-vin@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6039-429X>

RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=288484

WoS: <https://www.webofscience.com/wos/author/rid/H-8802-2018>

SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57205391665>

Google Академия: https://scholar.google.ru/citations?user=fBWt_7gAAAAJ

Temonyakina Sabina Vladimirovna

Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University, Saint-Petersburg, Russia
E-mail: temonyakina98@gmail.com

Pankova Nina Vladimirovna

Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University, Saint-Petersburg, Russia
E-mail: pankovnina@yandex.ru

RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=403864

Prediction of wear resistance of special-purpose materials based on similarity theory and dimensional analysis

Abstract. In the work, the theory of similarity and dimension analysis was used to develop a methodology for predicting consumer properties of special-purpose materials.

The developed methodology for predicting the wear resistance of special-purpose materials after exposure to repeated washings and ironing cycles, including the stages of research, mathematical processing of results, modeling and constructing dependencies through structural elements of indicators that determine wear resistance during the exposure of the studied factors.

With the help of similarity theory and dimensional analysis, the initial parameters of the properties and structure of special-purpose materials intended for the manufacture of military clothing are combined into several dimensionless indicators and their complexes for modeling the values of the wear resistance of fabrics (changes in linear dimensions and breaking load) after exposure to wear factors (multiple washings and ironing cycles).

Studies have been conducted to determine the wear resistance indicators based on standard methods for assessing the quality of special-purpose materials.

The conditions of similarity of the physical processes occurring in the model and the full-scale object are established, and the test results of the model to the conditions of the full-scale object are presented. Functional dependences between physical parameters are transformed into criteria equations.

The models of forecasting (at $0 \leq N \leq 25$) the area of fabrics changed under the influence of multiple washings, the breaking load on the base and the weft of special-purpose materials after exposure to multiple washings and ironing cycles are determined.

Mathematical models make it possible to predict the wear resistance of fabrics for military clothing with high accuracy using a system of equations describing the change in individual indicators after exposure to the studied factors.

Keywords: special purpose materials; military clothing; wear resistance; forecasting; wear resistance indicators; similarity theory and dimensional analysis; fabric wear factors