

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ВОЛОКОН ВЕКІНОХ НА УДЕЛЬНОЕ ПОВЕРХНОСТНОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ТКАНЕЙ**DETERMINATION OF THE EFFECT OF BEKINOX FIBERS ON THE FABRICS SPECIFIC SURFACE ELECTRICAL RESISTANCE**

УДК 677.024.1

Д.Б. Рыклин*, Д.И. Кветковский*Витебский государственный технологический университет*<https://doi.org/10.24412/2079-7958-2021-2-73-80>**D. Ryklin*, D. Kvetkovsky***Vitebsk State Technological University***РЕФЕРАТ**

АНТИСТАТИЧЕСКАЯ ТКАНЬ, УДЕЛЬНОЕ ПОВЕРХНОСТНОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ, ВОЛОКНО ВЕКІНОХ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТКАНЕЙ

Объект исследований – антистатические ткани, содержащие в своем составе стальные волокна Векінох. Цель работы – определение минимального количества волокон Векінох в ткани, обеспечивающего заданный уровень антистатических свойств, для последующего учета полученной информации при разработке методики проектирования тканей специального назначения. В результате статистической обработки экспериментальных данных построена математическая модель, описывающая зависимость удельного поверхностного электрического сопротивления тканей от процентного содержания в их структуре стальных волокон Векінох в диапазоне от 0 до 1 %. Установлено, что отклонение фактического значения удельного электрического сопротивления тканей от расчетного не превышает 1 порядка независимо от расположения в их структуре антистатических нитей. На основании анализа полученной модели и требований, предъявляемых к антистатическим тканям, разработаны рекомендации по их проектированию.

ABSTRACT

ANTISTATIC FABRIC, SURFACE ELECTRICAL RESISTIVITY, BEKINOX FIBER, FABRIC DESIGN

The object of research is antistatic fabrics containing Bekinox steel fibers. The aim of the work is to determine the minimum percentage of Bekinox fibers in a fabric which provides a required level of antistatic properties. The information received will be used for development of the method to design fabrics for special application. As a result of statistical processing of experimental data a mathematical model was developed that describes the dependence of the surface electrical resistance of fabric on the Bekinox steel fibers percentage in their structure in the range from 0 to 1 %. It was found that the deviation of the observed value of the electrical resistance of fabrics from the predicted one does not exceed 1 degree of order regardless of the location of antistatic yarns in their structure. Based on the analysis of the resulting model and the requirements for antistatic fabrics recommendations for their design have been developed.

Одним из наиболее перспективных направлений расширения ассортимента текстильных материалов, выпускаемых белорусскими предприятиями, является создание новых видов тканей для изготовления специальной одежды,

характеризующихся комплексом свойств, соответствующих требованиям, предъявляемым с учетом конкретного вида деятельности работника, для которого данная одежда предназначена.

Известно, что спецодежда работников раз-

* E-mail: ryklin-db@mail.ru (D. Ryklin)

личных профессий должна обеспечивать безопасность труда, предохранять от воздействия вредных факторов (метеорологических, механических, химических, физических, биологических), сохраняя нормальное функциональное состояние человека, его работоспособность в течение всего рабочего времени.

Склонность традиционных текстильных волокон, в особенности синтетических, к накоплению зарядов статического электричества существенно ухудшает эксплуатационные свойства одежды. Опасным последствием наличия электростатического потенциала на одежде является то, что он может быть достаточно высоким для того, чтобы стать причиной опасных искровых разрядов [1]. Скопление статического напряжения во взрывоопасной среде опасно тем, что искра даже самой низкой энергии, образуемая при трении предметов или элементов одежды друг о друга, способна привести к возгоранию или даже взрыву [2]. Длительное действие статического электричества отрицательно влияет на организм человека, вызывая ряд биологических изменений: чувство подавленности, страха, аллергию, бронхиальную астму и бронхит, отек ног, боли в сердце, варикозное расширение вен и т. д. Полностью предотвратить образование статического электричества практически невозможно. Поэтому очень важно, чтобы ткань для технологической одежды имела низкую склонность к электризации при трении и, главное, способность быстро рассеивать возникающий заряд, не допуская его накапливания [3].

В настоящее время разработка текстильных материалов с антистатическими и экранирующими свойствами является одним из наиболее перспективных направлений развития ассортимента материалов технического назначения. Существует множество способов придания текстильным нитям электропроводных свойств, основными из которых на сегодняшний день являются нанесение на поверхность синтетических нитей тонкого слоя металлизированного или углеродного покрытия и использование электропроводящих компонентов в структуре нитей.

Наибольший интерес для Республики Беларусь представляет использование в составе тканей пряжи с вложением волокон Bekinox компании Beakaert [4]. Данное волокно представляет

собой отрезки проволоки из нержавеющей стали. Выпуск смешанной пряжи с вложением волокон Bekinox в сочетании с другими волокнами освоено на ОАО «Гронитекс».

За последние годы исследователями разных стран проведены работы по разработке текстильных материалов с вложением волокон Bekinox для достижения антистатических [5] и экранирующих свойств [6]. В результате проведенных исследований доказана эффективность использования пряжи, содержащей стальные волокна, для обеспечения высоких антистатических свойств тканей.

Однако в настоящее время в литературных источниках нет однозначного ответа на вопрос о том, какого количества электропроводящих волокон в составе ткани достаточно для достижения требуемого уровня антистатических свойств. Словенская компания Predilnica Litija рекомендует для решения данной проблемы использовать пряжу с вложением 20 % волокон Bekinox, располагая ее в структуре ткани в виде полос или сетки, а в случае получения ткани только из пряжи, в состав которой входят стальные волокна, придерживаться их процентного содержания не ниже 2 %.

Необходимо обратить внимание на то, что волокна из нержавеющей стали более чем на порядок превосходят по цене традиционные виды текстильного сырья, в связи с чем решение задачи их рационального использования в значительной степени оказывает влияние на конкурентоспособность разрабатываемых тканей специального назначения. Поэтому на этапе проектирования тканей необходимо стремиться к минимизации содержания волокон Bekinox при условии достижения требуемых показателей качества выпускаемой продукции.

С учетом вышесказанного целью данной работы являлось определение минимального количества волокон Bekinox в ткани, обеспечивающего заданный уровень антистатических свойств, для последующего учета полученной информации при разработке методики проектирования тканей специального назначения.

Требования к антиэлектростатической специальной одежде приведены в ГОСТ 12.4.124-83 «Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Средства защиты от статического электричества.

Общие технические требования». Указано, что для изготовления антиэлектростатической специальной одежды должны применяться материалы с удельным поверхностным электрическим сопротивлением не более 10^7 Ом, определенным по ГОСТ 19616-74 «Ткани и трикотажные полотна. Метод определения удельного поверхностного электрического сопротивления».

С учетом указанного требования для определения минимально допустимого процентного содержания волокон Bekinox в ткани необходимо определить влияние данного фактора на величину ее удельного поверхностного электрического сопротивления.

С целью разработки математической модели, описывающей влияние процентного содержания волокон Bekinox на удельное поверхностное электрическое сопротивление тканей, на ткацком станке СТБ-2-175 была осуществлена наработка тканей, в которых в качестве антистатической нити использовалась смешанная пряжа линейной плотности 20 текс $\times 2$, содержащая 90 % полиэфирного волокна и 10 % стальных волокон Bekinox.

Полученные образцы можно разделить на две группы в зависимости от расположения антистатических нитей в их структуре:

- ткани, в которых антистатические нити располагаются вдоль одной из систем нитей (основы или утка) на следующих расстояниях друг от друга: $4,5$ мм, 7 мм, 9 мм;
- ткани, в которых из антистатических ни-

тей формировалась сетка с квадратной ячейкой следующих размеров: $4,5 \times 4,5$ мм, 7×7 мм, 9×9 мм, 14×14 мм, 18×18 мм.

Содержание стальных волокон Bekinox в ткани изменялось от 0 (базовая ткань) до 1,03 %. Характеристика базовой ткани, не содержащей волокна Bekinox, представлена в таблице 1.

Удельное поверхностное электрическое сопротивление образцов тканей в виде прямоугольных полос ткани размером 100×200 мм определялось на приборе ИЭСТП-2 в условиях Испытательного центра УО «ВГТУ» и на приборе ИЭСТП-1 лаборатории ОАО «Моготекс». Данные приборы предназначены для измерения электрического сопротивления на поверхности текстильных полотен с целью оценки электростатических свойств и эффективности антистатических обработок тканей, трикотажных полотен и других плоских текстильных материалов. Несмотря на то, что приборы несколько отличаются по конструкции, их использование для определения удельного поверхностного электрического сопротивления согласно ГОСТ 19616-74 считается равнозначным.

Так как признание текстильного материала в качестве антистатического зависит от порядка удельного поверхностного электрического сопротивления p_s (Ом), представляет интерес разработка математической модели, описывающей влияние процентного содержания электропроводящего компонента β (%) на десятичный логарифм данного показателя.

Таблица 1 – Характеристика базовой ткани

Наименование показателя	Значение показателя
Вид переплетения	саржа 2/2
Состав: – основа – уток	хлопчатобумажная пряжа, 25 текс $\times 2$ хлопкольняная пряжа, 25 текс $\times 2$
Плотность ткани, нит./10 см: – по основе – по утку	174 180
Уработка нитей, %: – по основе – по утку	5,5 5,9
Поверхностная плотность, г/м ²	187,7

Анализ результатов измерений показал, что с увеличением процентного содержания волокна Bekinox в ткани логарифм удельного поверхностного сопротивления монотонно снижается, асимптотически приближаясь к некоторой величине. В связи с этим принято решение при проведении статистической обработки полученных данных для описания данной зависимости использовать модель следующего вида:

$$\lg(p_s) = a + \frac{b}{10^{k\beta}} \quad (1)$$

где β – процентное содержание волокна Bekinox в ткани; a , b и k – эмпирические коэффициенты, значения которых определяются в результате статистической обработки экспериментальных данных.

Сумма коэффициентов ($a + b$) характеризует свойства базовой ткани, выработанной без использования антистатических нитей. При этом коэффициент a соответствует порядку значения удельного поверхностного электрического сопротивления в случае полного покрытия ткани электропроводящим материалом. Коэффициент k характеризует интенсивность снижения удельного поверхностного электрического сопротивления ткани по мере повышения процентного содержания в ней электропроводящих волокон.

В ходе статистической обработки результатов проведенного эксперимента определены коэффициенты регрессионной модели, значения и оценка значимости которых представлены в таблице 2.

В упрощенном виде, удобном для инженерных расчетов, модель имеет следующий вид:

$$\lg(p_s) = 4,7 + \frac{4}{10^{3\beta}} \quad (2)$$

Зависимость десятичного логарифма удельного поверхностного электрического сопротивления от процентного содержания волокон Bekinox в ткани, полученная с использованием формулы (2), представлена на рисунке 1.

В результате расчета по формуле (2) установлено, что удельное поверхностное электрическое сопротивление ткани рассматриваемой структуры достигает значения 10^7 Ом при содержании стального волокна Bekinox в ней, равного 0,08 %.

Однако электрофизические свойства ткани могут существенно варьироваться по ряду причин:

1. Неравномерность по составу нитей, содержащих волокна Bekinox.
2. Миграция электропроводящих волокон и ворсистость пряжи, следствием чего на некоторых участках нити стальные волокна могут находиться не на поверхности ткани, а покрываться неэлектропроводящими волокнами (в исследуемом случае – полиэфирными).

Анализируя полученные экспериментальные данные, можно отметить, что, несмотря на достаточно высокое значение коэффициента детерминации регрессионной модели $R^2 = 0,9$, для некоторых образцов имели место единичные существенные отклонения результатов прогнозирования от фактических значений оцениваемого свойства. Максимальное отклонение составило 0,8 порядка.

Значительная вариативность показателя «удельное поверхностное электрическое сопро-

Таблица 2 – Коэффициенты регрессионной модели и оценка их значимости

Обозначение коэффициента	Значение коэффициента	Расчетное значение критерия Стьюдента	Табличное значение критерия Стьюдента при ($p = 0,95, k = 17$)
a	4,688	24,6	2,11
b	4,018	11,9	
k	3,046	4,90	

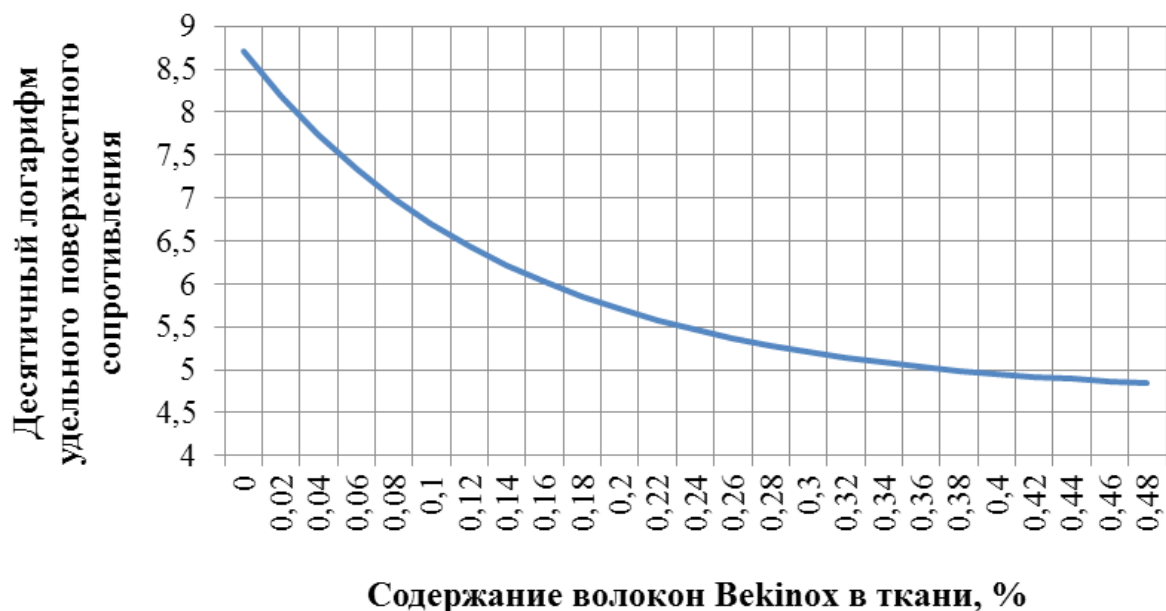


Рисунок 1 – Влияние процентного содержания волокон Bekinox в ткани на ее удельное поверхностное электрическое сопротивление в соответствии с формулой (2)

тивление» отмечается и в литературе. Так, в международном стандарте ГОСТ EN 1149-1-2018 «Одежда специальная защитная. Электростатические свойства. Часть 1. Метод испытания для измерения удельного поверхностного сопротивления» указывается на то, что применяемый метод дает расхождение результатов измерений между разными испытательными лабораториями вплоть до 10 раз, то есть до 1 порядка.

В связи с этим при проектировании ткани с использованием исследуемой пряжи можно рекомендовать принимать запас в один порядок, то есть устанавливать при проектировании более жесткое ограничение, согласно которому удельное поверхностное электрическое сопротивление не должно превышать 10^6 Ом. В соответствии с формулой (2) данное значение достигается при содержании в ткани 0,163 % волокон Bekinox.

Как указывалось выше, в исследуемых тканях пряжа с электропроводящим компонентом располагалась в экспериментальных образцах ткани в виде полос и в виде сетки. При этом формула (2) получена без учета характера расположения в структуре ткани антистатической пряжи. В связи с этим представляет интерес анализ влияния

данного фактора на отклонение фактического значения удельного поверхностного сопротивления от результатов прогнозирования.

На рисунке 2 представлены экспериментальные данные, полученные для тканей с разным расположением антистатической пряжи, в сопоставлении с результатами расчета по формуле (2). Представленные экспериментальные данные получены на приборе ИЭСП-2 в условиях Испытательного центра УО «ВГТУ».

Анализируя представленную диаграмму, можно отметить, что для тканей с вложением 0,25 % и 0,5 % волокон Bekinox, прогнозируемое значение ближе к фактическому при расположении антистатических нитей в виде полос вдоль основы. При формировании сетки из пряжи, содержащей волокна Bekinox, удельное поверхностное электрическое сопротивление несколько снижается. Можно отметить, что отклонение фактического значения от прогнозного не превышает одного порядка, что позволяет сделать вывод о возможности использования полученных рекомендаций при различном расположении антистатических нитей в ткани.

Процентное содержание волокна Bekinox в ткани можно определить по следующей форму-

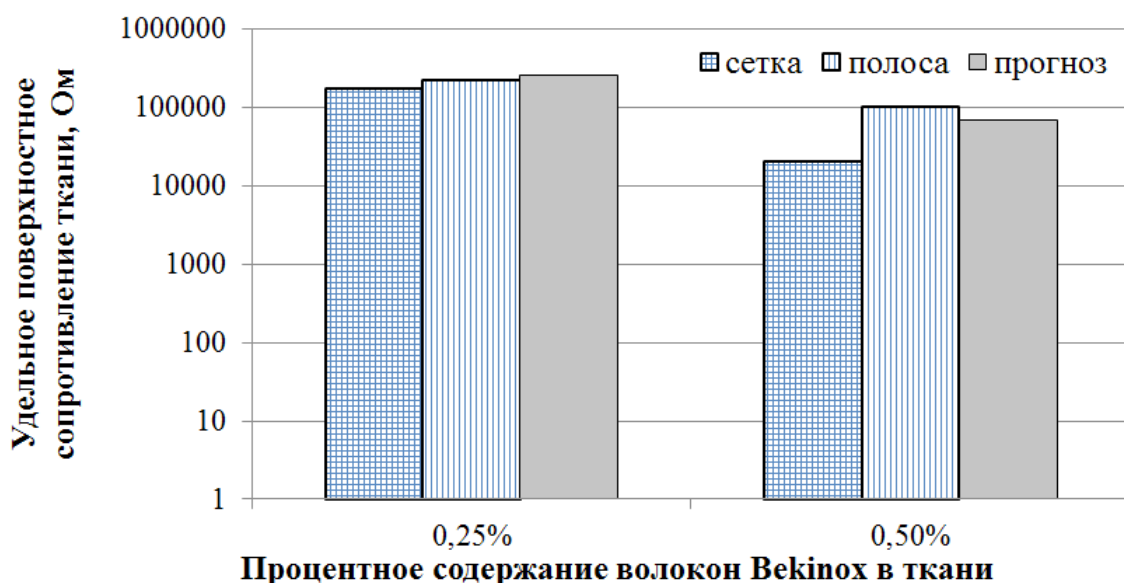


Рисунок 2 – Влияние расположения антистатических нитей в ткани на ее удельное поверхностное электрическое сопротивление

ле (без учета разницы уработок нитей основы и утка)

– плотность по основе и утку при расположении нитей в виде сетки с квадратной ячейкой

$$\beta_T = \frac{\beta_{II} \cdot (P_{BO} + P_{BY}) \cdot T_B}{(P_O - P_{BO}) \cdot T_O + (P_Y - P_{BY}) \cdot T_Y + (P_{BO} + P_{BY}) \cdot T_B}, \quad (3)$$

$$P_{BO} = \frac{\beta_T (P_O \cdot T_O + P_Y \cdot T_Y)}{2\beta_{II} \cdot T_B - \beta_T \cdot (2T_B - T_O - T_Y)}. \quad (5)$$

где β_{II} – содержание волокон Bekinox в антистатической пряже, %; P_O и P_Y – плотности нитей базовой ткани по основе и утку, *нит./10 см*; P_{BO} и P_{BY} – плотности антистатических нитей по основе и утку, *нит./10 см*; T_O и T_Y – линейные плотности нитей основы и утка базовой ткани, *текс*; T_B – линейная плотность пряжи, содержащей волокна Bekinox, *текс*.

После преобразований формулы (3) получаем формулы для расчета плотности антистатических нитей, обеспечивающей заданное процентное содержание волокон Bekinox:

– плотность по основе при расположении нитей в виде полос

$$P_{BO} = \frac{\beta_T (P_O \cdot T_O + P_Y \cdot T_Y)}{\beta_{II} \cdot T_B - \beta_T \cdot (T_B - T_O)}, \quad (4)$$

Подставляя данные о характеристиках базовой ткани, приведенные в таблице 1, получаем, что необходимое процентное содержание волокон Bekinox в ткани $\beta_T = 0,163$ % достигается при плотности $7,2$ *нит./10 см* при расположении их в виде полос и при плотности $3,6$ *нит./10 см*. В первом случае расстояние между антистатическими нитями в ткани составляет 14 *мм*, а во втором – 28 *мм*.

Формула (2) и основанные на ней рекомендации могут быть использованы в случае, если базовая ткань выработана из натуральных волокон. Однако проектируемая ткань может производиться и на основе базовой ткани из синтетических волокон, что приводит к необходимости корректировки формулы (2).

Исследования показали, что электрическое сопротивление хлопчатобумажной и полиэфирной пряжи может отличаться на порядок [7]. Дан-

ное различие вполне объяснимо существенной разницей в кондиционной влажности исследуемых образцов пряжи. При этом образец пряжи, полученной их смесей 90 % хлопка и 10 % волокна Bekinox, характеризуется сопротивлением только в 1,5 раза ниже, чем образец из 90 % полиэфирного волокна и 10 % волокна Bekinox. Следовательно, можно сделать вывод о том, что при значительном количестве стальных волокон в ткани влияние свойств неэлектропроводящих волокон существенно снижается, а порядок значения удельного поверхностного электрического сопротивления практически не зависит от свойств базовой ткани.

С учетом данного вывода для тканей из синтетических волокон значение коэффициента a в формуле (2), характеризующего удельное поверхностное электрическое сопротивление ткани с максимальным покрытием стальными волокнами, не изменяется, а коэффициент b увеличивается на единицу.

Таким образом, в случае использования базовой синтетической ткани формула (2) приобретает вид

$$\lg(p_s) = 4,7 + \frac{5}{10^{3P}} \quad (6)$$

При установленном ограничении на величину удельного поверхностного электрического сопротивления 10^6 Ом минимально допустимое содержание волокон Bekinox в синтетических тканях составляет 0,195 %, что соответствует расстоянию между антистатическими нитями в виде

полос 11,6 мм (8,6 нит./10 см), при формировании из них сетки в структуре ткани – 23,2 мм (4,3 нит./10 см).

Значения эмпирических коэффициентов и рекомендации, полученные на основании анализа экспериментальных данных, являются ориентировочными и будут уточнены на последующих этапах работы с учетом влияния вида переплетения ткани, а также процентного содержания волокон Bekinox в антистатической пряже.

ВЫВОДЫ

1. В результате статистической обработки экспериментальных данных построена регрессионная модель, описывающая зависимость удельного поверхностного электрического сопротивления тканей от процентного содержания в их структуре стальных волокон Bekinox в диапазоне от 0 до 1 %.

2. Установлено, что отклонение фактического значения удельного электрического сопротивления тканей от расчетного не превышает 1 порядка независимо от расположения в их структуре антистатических нитей.

3. С учетом колебаний электрофизических свойств текстильных полотен при проектировании тканей с заданным уровнем антистатических свойств рекомендовано принимать минимальное допустимое содержание волокон Bekinox 0,163 % в случае использования антистатической пряжи с вложением 10 % стальных волокон, если базовая ткань выработана из натуральных волокон. При производстве синтетических антистатических тканей рекомендовано повышение содержания волокон Bekinox в них до 0,195 % и более.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- ГОСТ Р EN 1149-5-2008. Система стандартов безопасности труда. Одежда специальная защитная. Электростатические свойства. Общие технические требования, Москва: Стандартинформ, 2009.
- Антистатическая нить [Электронный ресурс]. –

REFERENCES

- GOST R EN 1149-5-2008. Occupational safety standards system. Special protective clothing. Electrostatic properties. General technical requirements, Moscow: Standardinform, 2009.
- Antistaticheskaya nit' [Antistatic thread], (2021), available at: <https://vostok.ru/customers/tehnologii/odezhda/1608> (accessed 03.10.2021).

- Режим доступа: <https://vostok.ru/customers/tehnologii/odezhda/1608>, дата доступа: 03.10.2021.
3. *Antistatic fibers and yarns for textiles* (2021), available at: <https://www.bekaert.com/en/products/basic-materials/textile/anti-static-fibers-and-yarns-for-textiles> (accessed 02.10.2021).
 4. Власенко, В. И., Левицкая, Н. Г., Арабули (Ковтун), С. И., Никольский, В. В. (2010), Антистатические свойства тканей для технологической одежды и электростатическая безопасность чистых производственных помещений, *Фармацевтическая отрасль*, 2010, № 6 (23), С. 78–81.
 5. Vasile, S., Deruck, F., Hertleer, C., De Raeve, A., Ellegiers, T., De Mey, G. (2016), Study of the Contact Resistance of Interlaced Stainless Steel Yarns Embedded in Hybrid Woven Fabrics, *AUTEX Research Journal*, 2016, pp. 1–7, available at: <https://biblio.ugent.be/publication/8520807/file/8520813.pdf>.
 6. Radulescu, I. R., Surdu, L., Scarlat, R., Constantin, C., Mitu, B., Morari, C., Costea, M. (2021), Modelling the Woven Structures with Inserted Conductive Yarns Coated with Magnetron Plasma and Testing Their Shielding Effectiveness, *Textiles*, 2021, 1, pp. 4–20.
 7. Medvetski, S. S., Ryklin, D. B., Davidziuk, V. V. (2021), Research of influence of blended yarn structure including stainless steel fibers on its properties, *ICTTE 2020. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 1031*, 2021, 012042.
 3. *Antistatic fibers and yarns for textiles* (2021), available at: <https://www.bekaert.com/en/products/basic-materials/textile/anti-static-fibers-and-yarns-for-textiles> (accessed 02.10.2021).
 4. Vlasenko, V. I., Levitskaya, N. G., Arabuli (Kovtun), S. I., Nikolsky, V. V. (2010), Antistatic properties of fabrics for industrial clothing and electrostatic safety of clean industrial premises [Antistaticheskie svojstva tkaney dlya tekhnologicheskoy odezhdy i elektrostaticheskaya bezopasnost' chistyh proizvodstvennyh pomeshchenij], *Farmaceuticheskaya otrasl' – Pharmaceutical industry*, 2010, № 6 (23), pp. 78–81.
 5. Vasile, S., Deruck, F., Hertleer, C., De Raeve, A., Ellegiers, T., De Mey, G. (2016), Study of the Contact Resistance of Interlaced Stainless Steel Yarns Embedded in Hybrid Woven Fabrics, *AUTEX Research Journal*, 2016, pp. 1–7, available at: <https://biblio.ugent.be/publication/8520807/file/8520813.pdf>.
 6. Radulescu, I. R., Surdu, L., Scarlat, R., Constantin, C., Mitu, B., Morari, C., Costea, M. (2021), Modelling the Woven Structures with Inserted Conductive Yarns Coated with Magnetron Plasma and Testing Their Shielding Effectiveness, *Textiles*, 2021, 1, pp. 4–20.
 7. Medvetski, S. S., Ryklin, D. B., Davidziuk, V. V. (2021) Research of influence of blended yarn structure including stainless steel fibers on its properties, *ICTTE 2020. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 1031*, 2021, 012042.

Статья поступила в редакцию 23. 10. 2021 г.