УДК 677.017.57 DOI: https://doi.org/10.24412/2079-7958-2025-3-53-64

Обоснование параметров процесса проведения испытаний при определении неровноты смешивания текстильных волокон емкостным методом

Д. А. Яснев[1],
Д. Б. Рыклин[1],
И. А. Свито[2]

[1]*Витебский государственный технологический университет, Республика Беларусь*
[2]*Белорусский государственный университет, Республика Беларусь*

Аннотация. Статья посвящена разработке метода оценки неровноты смешивания разнородных волокон в текстильных материалах. Актуальность исследований по данной теме связана с постоянным расширением ассортимента материалов и повышением требований к качеству. Повышение равномерности распределения разнородных волокон в структуре текстильных материалов позволит более бережно использовать сырьевые ресурсы и повысить конкурентоспособность выпускаемой продукции.

Цель настоящей работы заключается в экспериментальном подтверждении применения емкостного метода и обосновании параметров процесса проведении испытаний для оценки неровноты смешивания волокон в неоднородных текстильных материалах.

В качестве объектов исследований были использованы пробы из различных сочетаний хлопковых и полиэфирных волокон. Для фиксации значений емкости использовались измерители импеданса Agilent E4980A и Agilent E4285A.

В результате проведения исследований экспериментально доказана обоснованность идеи разработки емкостного метода оценки неровноты смешивания текстильных волокон, основанного на различном влиянии состава испытуемых проб на емкость конденсатора при низких и высоких частотах электрического поля.

Рекомендовано для разработки метода оценки неровноты смешивания в качестве низкой частоты электрического поля принимать 10 кГц, а максимальную частоту устанавливать в диапазоне от 1 до 10 МГц. Указанные значения могут быть откорректированы с учетом конструкции и измерительной системы и технических характеристик ее элементов.

Ключевые слова: неровнота смешивания; емкостной метод; диэлектрическая проницаемость; частота электрического поля конденсатора.

Информация о статье: поступила 11 сентября 2025 года.

Rationale of test parameters for determining textile fibers blending unevenness using the capacitance method

Danila A. Yasneu[1],
Dzmitry B. Ryklin[1],
Ivan A. Svito[2]

[1]*Vitebsk State Technological University, Republic of Belarus*
[2]*Belarusian State University, Republic of Belarus*

Abstract. The article is devoted to the development of a method for assessing the fibers blending unevenness in textiles. The relevance of research on this topic is associated with the constant expansion of the range of materials and increasing quality requirements. Improving the uniformity of the distribution of dissimilar fibers in the structure of textile materials will allow for more efficient use of raw materials and improve the competitiveness of manufactured products. The objective of this study is to experimentally validate the use of a capacitance method and justify the test parameters for assessing fiber blending unevenness in heterogeneous textiles.

Samples of various combinations of cotton and polyester fibers were used as test objects. Agilent E4980A and Agilent E4285A impedance meters were used to record capacitance values.

The study experimentally validated the concept of developing a capacitance method for assessing textile fiber blending unevenness based on the different effects of sample composition on capacitor capacitance at low and high electric field frequencies.

It is recommended that the low electric field frequency be set to 10 kHz and the maximum frequency be set in the range of 1 to 10 MHz for developing the method for assessing blending unevenness. These values can be adjusted based on the design and measurement system and the technical characteristics of its components.

Keywords: blending unevenness; capacitance method; permittivity; capacitor electric field frequency.
Article info: received September 11, 2025.

Введение

На сегодняшний момент использование емкостного метода измерений находит широкое применение в различных отраслях науки и жизнедеятельности человека. Суть метода заключается в генерации между обкладками конденсатора электрического поля определённой частоты, помещении в него объекта контроля и определении физической величины через измерение электрической емкости, которая зависит от этой величины.

Например, в работе (Науменко, Темкин, 2023) для контроля износа моторного масла предложено использовать конденсатор с открытой областью пространства, контролируемым параметром является диэлектрическая проницаемость, на основании которой диагностируется кинематическая вязкость. Метод основан на том, что при частоте 500 Гц значение тангенса диэлектрических потерь образцов нового масла в 23,7–11,9 раз больше, чем при частоте 200 кГц, образцов отработанного масла – больше в 12,0–7,8 раз.

Емкостные датчики предлагается использовать для определения объёма жидкости в автомобильных баках и молокопроводах. В первом случае в ходе исследований доказано, что на частотах ниже 20 кГц взаимосвязь между емкостью конденсатора и объёмом измеряемой жидкости носит линейный характер (Колодкин, Серенков и Петрович, 2019). Во втором – подтверждено, что при использовании частот в диапазоне 750–950 кГц пропорциональна зависимость напряжения от объёма молока (Толпесов, Соловьев и Герасимова, 2025).

Интересный пример применения емкостного метода контроля в пищевой промышленности для оценки степени разделения структурных элементов коллагенсодержащей ткани емкостным способом описан в работе (Залуцкий, Котова и Поломошных, 2024). Для проведения эксперимента использовался конденсатор, обкладки которого были выполнены в виде иглообразных стальных электродов с никелевым покрытием.

На основе различия значений диэлектрической проницаемости у разных горных пород предложено использовать емкостной метод при разведке неоднородного горного массива (Бабиюк, Смекалкин и Пунтус, 2021).

В ряде случаев для получения необходимых исследователям данных емкостной метод сочетается с другими методами измерений. Например, совокупность емкостных измерений и физико-химических исследований позволила выявить необходимость предварительного механического и химического воздействия на фильтрующий материал (Мансуров и др., 2020).

На основании анализа источников можно сделать вывод о том, что емкостной метод находит применение в разнообразных процессах производства продукции и может быть использован в самых различных областях жизнедеятельности человека. Применение использование емкостного метода позволяет с достоверной точностью описывать изменение фиксируемого параметра объекта контроля, однако, данный процесс зачастую возможен только при правильно подобранных генерируемых между обкладками конденсатора частотах электромагнитного поля.

Емкостной метод измерений широко применяется и в текстильной промышленности, в первую очередь для определения неровноты пряжи и полуфабрикатов прядильного производства по линейной плотности и для выявления часто появляющихся пороков (Рыклин, Медвецкий, 2017). Применения данного метода на приборах Uster Tester и его аналогах основано на допущении о том, что существует линейная взаимосвязь массы участка волокнистого продукта, находящегося между пластинами измерительного конденсатора, и создаваемым сигналом, то есть сигнал от датчика прямо пропорционален массе отрезка продукта.

Регулярно публикуются работы, в которых при помощи прибора Uster Tester исследователи оценивают неровноту проб, полученных при различных режимах работы оборудования, в результате чего вырабатывают рекомендации по их оптимизации технологических процессов (Милеева, Казарновская, 2020; Махкамова, Матисмаилов, Валиева и Ражапов, 2019; Юсупова, 2025), предлагают методы подготовки текстильного волокна, позволяющие существенно снизить неровноту продуктов прядения (Прохоренко и др., 2019), осуществляют оценку влияния вида исходного сырья на показатели качества полуфабрикатов и пряжи (Айтымбетов, Хожаметова и Зайтбаев, 2025).

Одной из специфических задач, решаемых с применением емкостного метода измерений, является оценка неравномерности испытываемого материала по составу. Возможность применения данного метода для решения указанной задачи основана на том, что диэлектрические характеристики текстильных волокон зависят от природы и состава волокна и значительно снижаются с повышением частоты, о чем свидетельствуют многочисленные публикации (Almetwally and Elfowaty, 2025; Asanovic and al., 2021; Grujić, and al., 2021; Lv and Ma, 2013; Mukherjee, 2025;Wang, Liu, Yang, and Zhao, 2021). Данная закономерность напрямую связана с различной способностью волокон впитывать влагу из окружающей среды. Например, экспериментально показано, что диэлектрическая проницаемость вискозы и хлопка существенно превышает значение данного показателя для полиэфирного волокна.

Актуальность исследований по данной теме связана с постоянным расширением ассортимента материалов и повышением требований к качеству. Многообразие текстильных волокон является одной из основ создания широкого спектра материалов с заданными свойствами. Проектирование составов текстильных материалов основывается не только на информации о свойствах исходных компонентов, но и на предположении об их равномерном распределении в структуре изделий, так как наличие участков в полотне, состав которых существенно отличается от среднего (номинального), приводит к повышению неравномерности по физико-механическим, потребительским свойствам, а также сказывается на внешнем виде изделия.

Известно, что с увеличением количества смешиваемых компонентов, а также при малом процентном содержании одного из них задача обеспечения равномерности распределения волокон в смеси и в готовом полотне существенно осложняется. В случае инновационных материалов добавление в смесь волокон с особыми свойствами в небольшом количестве существенно меняет свойства пряжи и полотен из нее. При некачественном смешивании оказывается необходимым добавление в смесь дорогостоящих компонентов.

Таким образом, повышение равномерности распределения разнородных волокон в структуре текстильных материалов позволит более бережно использовать сырьевые ресурсы и повысить конкурентоспособность выпускаемой продукции.

Ранее был предложен новый метод оценки неровноты смешивания волокон, а за основу разработки использовать физический эффект, основанный на существенной разнице значений емкости конденсатора при испытании материалов разного состава на низких частотах и отсутствии такой разницы на высоких частотах (Рыклин и Авсеев, 2011; 2013). Приборной базой для реализации такого метода должны были выступать: широкополосный генератор частот; два плоскопараллельных конденсатора, для подключения в электрическую цепь высокой и низкой частоты. Предложенный метод был основан на априорных знаниях физики и требовал экспериментального подтверждения.

Для экспериментального подтверждения применения емкостного метода для оценки неровноты смешивания волокон в неоднородных текстильных материалах были проведены испытания образцов из хлопка и полиэфирного волокна на приборе измерителя иммитанса МНИПИ Е7-20 в диапазоне частот от 2 до 640 кГц с номинальной массой в 0,3, 0,5 и 0,7 г (Яснев и Рыклин, 2024). На основании экспериментальных данных предложена математическая модель, описывающая влияние частоты электрического поля конденсатора на соотношение значений емкости для разных видов волокон. Доказано, что различия значений емкости конденсатора, определенные для разных видов исходного сырья, существенно зависят от частоты электрического поля, создаваемого между пластинами конденсатора. Установлено, что с увеличением частоты разница существенно снижается. В результате исследований сделан вывод о том, что выявленный эффект может быть использован в качестве физической основы для разработки метода оценки неровноты смешивания волокон в неоднородных текстильных материалах. Однако технические способности используемой приборной базы не позволили это проследить выявленную тенденцию при повышении частоты электрического поля, а соответственно и провести эксперимент в области более высоких частот.

Цель настоящей работы заключается в экспериментальном подтверждении применения емкостного метода и обосновании параметров процесса проведении испытаний для оценки неровноты смешивания волокон в неоднородных текстильных материалах.

Методы и средства исследования

В качестве средств измерения для определения масс волокнистых проб различного состава были выбраны весы лабораторные электронные PA 214C, при массе пробы до 50 г погрешность измерения данных весов составляет 0,001 г.

Для фиксации значений емкости использовались измерители импеданса Agilent E4980A и Agilent E4285A в условиях ЦКП Белорусского государственного университета «Белорусский межвузовский центр обслуживания научных исследований». Данные приборы позволяют проводить испытания в диапазоне частот 20 Гц – 30 МГц. Перед началом измерений выполнялась стандартная процедура коррекции. Сами измерения выполнялись двухзондовым методом при температуре в 25 °С.

Эксперимент проводился путём определения значений емкости конденсатора в диапазоне частот от 20 Гц – 30 МГц. Конденсатор выполнен в виде двух плоскопараллельных пластин с габаритными размерами 85,5x50 мм, установленных на расстояние 8 мм друг от друга.

Объектами исследований являлись подготовленные и предварительно кондиционированные пробы из хлопчатобумажной и полиэфирной пряжи массой от 2 до 6 г, а также пробы массой 6 г, содержащие сочетания пряжи указанных составов в соотношении компонентов 33 %/67 % и 67 %/33 %.

Статистическая обработка экспериментальных данных производилась с использованием пакета программ Statistic for Windows.

Результаты исследований

В процессе эксперимента были получены данные на всём диапазоне частот (20 Гц – 13 МГц), однако на частотах выше 13 МГц тенденция к монотонному снижению емкости нарушалась, в связи с чем было принято решение об ограничении диапазона частот, принимаемого для последующего анализа результатов. При частоте 20 Гц значение емкости конденсатора при испытаниях проб из полиэфирного волокна оказались несущественно отличающимися от результатов измерений емкости, полученные при отсутствии текстильных материалов между его пластинами. При частотах, близких к 100 Гц, выявлена существенная нелинейность зависимостей. Данные, полученные на частотах от 1 кГц до 10 МГц, отличались хорошей воспроизводимостью результатов, в связи с чем было принято решение об их использовании для последующей обработки. В таблице 1 приведены результаты эксперимента для пяти различных частот в выбранном диапазоне, позволяющие выявить основные тенденции изменения емкости конденсатора при испытании проб различных составов и массы.

Таблица 1 – Значения емкости конденсатора в процессе испытаний проб различного состава и массы, пФ
Table 1 – Capacitor capacitance values during testing of samples of different composition and mass, pF

Масса пробы, г	Частота, Гц				
	990	9 900	99 000	990 000	9 900 000
Хлопковая пряжа					
2	13,82	10,23	9,38	9,08	9,05
4	22,37	12,69	10,65	9,97	9,81
6	33,53	15,70	12,04	10,90	10,6
Полиэфирная пряжа					
2	8,79	8,76	8,73	8,71	8,80
4	9,29	9,28	9,24	9,19	9,28
6	9,75	9,77	9,71	9,64	9,72
Проба, содержащая 67 % полиэфирных волокон и 33 % хлопка					
6	15,83	11,86	10,87	10,50	10,46
Проба, содержащая 33 % полиэфирных волокон и 67 % хлопка					
6	21,44	13,46	11,58	10,93	10,78

Анализ результатов

Для определения влияния состава и масс проб на емкость конденсатора при разных частотах электрического поля построены графики, представленные на рисунках 1 и 2, на которых отображены экспериментальные значения емкости конденсатора за вычетом емкости, определённого при отсутствии в нём материала, составившей 8,22 пФ.

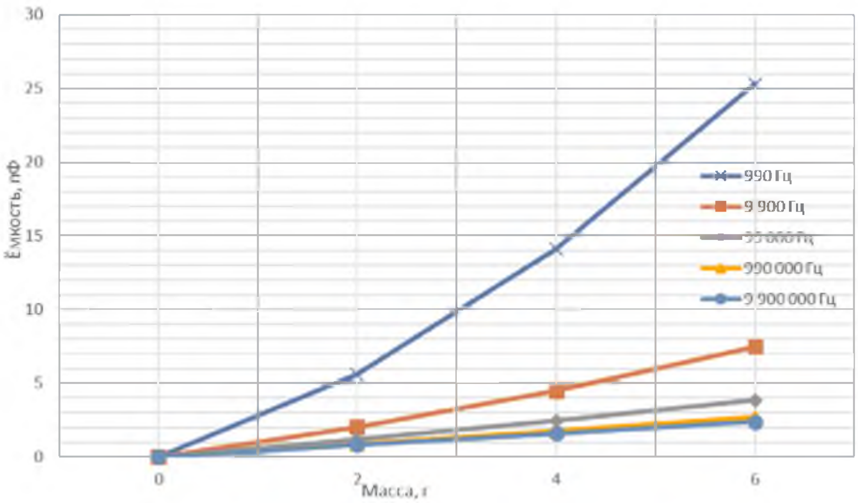

Рисунок 1 – Влияние массы пробы хлопковой пряжи на емкость конденсатора при различных частотах электрического поля за вычетом ёмкости конденсатора, определённого при отсутствии в нём материала
Figure 1 – Influence of cotton yarn sample mass on the capacitance at different frequencies of the electric field minus the capacitance of a capacitor determined without the material

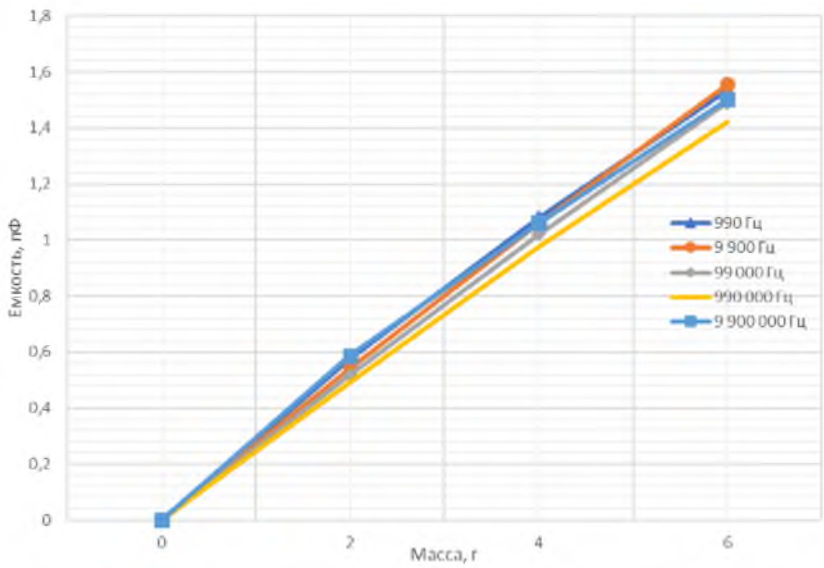

Рисунок 2 – Влияние массы пробы полиэфирной пряжи на емкость конденсатора при различных частотах электрического поля за вычетом ёмкости конденсатора, определённого при отсутствии в нём материала
Figure 2 – Influence of polyester yarn sample mass on the capacitance at different frequencies of the electric field minus the capacitance of a capacitor determined without the material

Анализ полученных графиков указывает на то, что состав пробы оказывает существенное влияние на значения емкости, что связано и с различными значениями их диэлектрической проницаемости при кондиционной влажности воздуха.

Анализируя представленные графики, можно отметить, что на всех исследованных частотах кроме 990 Гц емкость конденсатора находится в прямой зависимости от массы пробы. При частоте 990 Гц график приобретает кривизну, которая особенно заметна для проб из хлопчатобумажной пряжи.

Прямая зависимость подтверждается результатами статистической обработки данных, в ходе которой для каждой частоты электрического поля конденсатора были построены линейные модели следующего вида:

$$C = a \cdot m, \tag{1}$$

где m – масса пробы, г; a – коэффициент пропорциональности, зависящий от состава пробы и частоты электрического поля (таблица 2).

В таблице 2 t_p – расчетное значение критерия Стьюдента, сопоставление которого с табличным значением, равным 4,303 (df = 3; p = 0,95), позволяет оценить значимость коэффициента a. Коэффициент детерминации R^2 для всех частот близок к 1, однако минимальное его значение получено в случае испытания проб из хлопчатобумажной пряжи при частоте 990 Гц.

По графикам на рисунке 1 видно, что с увеличением частоты электрического поля при испытаниях проб из хлопка емкость конденсатора существенно снижается. Особенно это заметно на низких частотах. На высоких частотах (990000 и 9900000 Гц) существенной разницы в зависимостях уже не наблюдается.

При испытаниях проб из полиэфирных волокон влияние частоты существенно ниже, что в значительной степени связано с низкой влажностью этих волокон.

Как указывалось ранее, в основе разрабатываемого метода лежит предположение о том, что изменение состава пробы влияет на емкость конденсатора в существенно большей степени на низких частотах, чем на высоких. В связи с этим интерес представляют зависимости емкости конденсатора от процентного содержания компонентов в пробе, представленные на рисунке 3. Анализируя представленные графики, можно отметить, что с увеличением процентного содержания полиэфирного волокна в пробах при одинаковой их массе (6 г) при частотах до 99000 Гц заметно снижение емкости конденсатора, в то время как для двух максимальных частот влияние состава становится минимальным.

Таким образом, можно утверждать, что с увеличением частоты электрического поля, создаваемого между пластинами конденсатора, влияние состава волокнистого материала и, как следствие, неравномерности его по составу минимизируется, хотя и не устраняется полностью.

Ранее было установлено, что отношение значений емкости, полученной для проб хлопка и полиэфирного волокна определенной массы, снижается с увеличением частоты электрического поля (Яснев и Рыклин, 2024). На основании данного результата сделан вывод, что именно существенное влияние состава материала на емкость конденсатора при низких частотах и значительно меньшее при высоких может являться физической основой создания метода оценки неровноты смешивания.

Таблица 2 – Результаты статистической обработки экспериментальных данных
Table 2 – Results of statistical processing of experimental data

Частота электрического поля, Гц	Состав пробы					
	хлопок			полиэфирное волокно		
	a	t_p	R^2	a	t_p	R^2
990	3,919186	15,53985	0,97066026	0,262101	48,65907	0,99627840
9 900	1,192822	26,81539	0,98935945	0,261646	126,5614	0,99946583
99 000	0,624634	62,34156	0,99792051	0,250973	119,2208	0,99939814
990 000	0,443365	131,0737	0,99951978	0,239539	113,2966	0,99933381
9 900 000	0,398141	142,7968	0,99958118	0,257607	37,49333	0,99363055

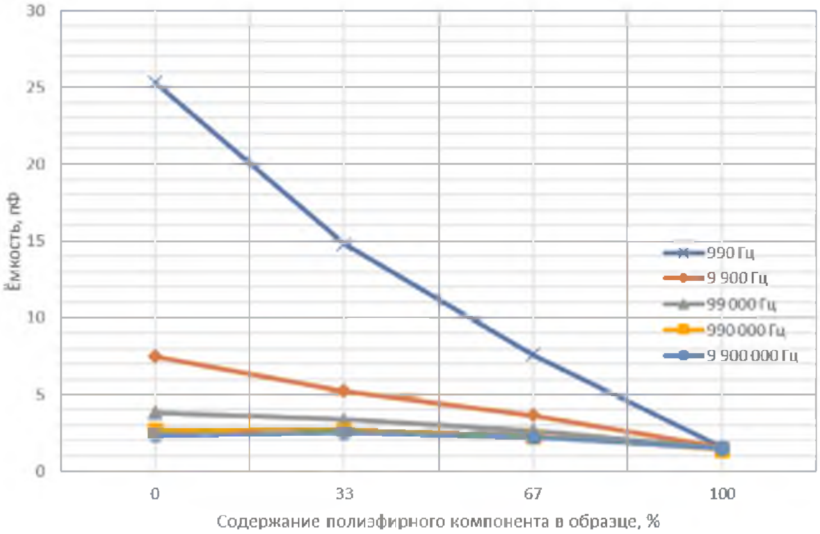

Рисунок 3 – Влияние состава пробы на емкость конденсатора при различных значениях частоты электрического поля за вычетом ёмкости конденсатора, определённого при отсутствии в нём материала
Figure 3 – The influence of sample composition on the capacitance of a capacitor at different values of the electric field frequency minus the capacitance of a capacitor determined without the material

С учетом расширения диапазона частот электрического поля и увеличения массы проб при проведении исследований в данной работе также было принято решение построить и проанализировать зависимости отношения значений емкости конденсатора хлопчатобумажной и полиэфирной пряжи [$C_{хл}(f) / C_{п}(f)$]. В данном отношении значения $C(f)$ определены без учета емкости, измеренной при отсутствии в конденсаторе волокнистого материала, Полученные графики представлены на рисунке 4.

Можно отметить, что отношение емкостей, определенное при частоте электрического поля 990 Гц, существенно зависит от массы проб и варьируется в диапазоне от 9,7 до 14,4, а с увеличением частоты до 9 900 000 Гц оно снижается до 1,5–1,6. Такой результат свидетельствует о высоком влиянии состава пробы на емкость конденсатора на низкой частоте и о низком влиянии на высоких частотах.

Отличия отношений в несколько порядков может быть использовано для разработки критерия оценки неравномерности текстильных материалов емкостным методом.

Статистическая обработка анализа данных полученных для проб хлопковых и полиэфирных образцов позволила построить модель, использование которой дает возможность прогнозировать отношение значений емкости конденсатора при испытаниях проб из хлопка и полиэфирных волокон с учетом массы пробы и частоты электрического поля:

$$Y = (1 + a \cdot m) \cdot exp(b / f^k), \qquad (2)$$

где m – масса пробы, г; f – частота электрического поля конденсатора, кГц; a, b, k – коэффициенты регрессии модели.

Коэффициенты модели определялись для двух диапазонов:
- от 990 до 9 900 000 Гц;
- от 9 900 до 9 900 000 Гц.

Коэффициенты моделей представлены в таблице 3. В обоих случаях коэффициент детерминации моделей R^2 составил более 0,99. Однако для более широкого диапазона в 47 % случаев отклонение расчетного значения от фактического превысило 10 %, в то время как модель, полученная в результате обработки данных для второго диапазона, оказалась значительно точнее – отклонение всех расчетных значений от фактических не превышали 10 %. При этом в 14 экспериментальных точках из

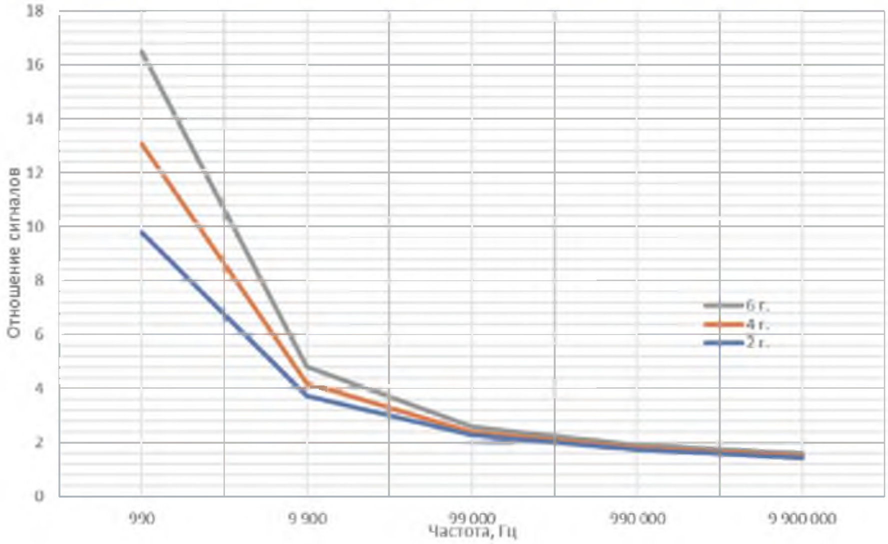

Рисунок 4 – Зависимости отношения значений емкости конденсатора от частоты электрического поля конденсатора для разных масс проб за вычетом ёмкости конденсатора, определённого при отсутствии в нём материала
Figure 4 – Dependences of the relation of capacitance on the frequency of the capacitor electric field for different masses samples minus the capacitance of a capacitor determined without the material

Таблица 3 – Результаты анализа экспериментальных данных
Table 3 – Results of the experimental data analysis

Диапазон частот электрического поля, Гц	Коэффициент детерминации модели R^2	Коэффициенты регрессии модели		
		a	b	k
от 990 до 9 900 000	0,9929	0,1786	2,0414	0,3764
от 9 900 до 9 900 000	0,9944	0,0626	2,2894	0,2716

15 (95,3 %) отклонение составило менее 5 %.

Таки образом, экспериментально подтверждено, что предложенные ранее подходы к разработке способа оценки неровноты смешивания неоднородных текстильных волокон, базирующиеся на теоретических представлениях, являются обоснованными и могут стать основой проектирования специального испытательного оборудования.

Выводы

1. В результате статистической обработки экспериментальных данных получены линейные математические зависимости емкости конденсатора от массы пробы волокнистого материала, причем коэффициенты моделей зависят от сырьевого состава пробы, а также от частоты электрического поля. Таким образом, экспериментально доказана обоснованность идеи разработки емкостного метода оценки неровноты смешивания текстильных волокон, основанного на различном влиянии состава испытуемых проб на емкость конденсатора при низких и высоких частотах электрического поля.

2. На основании анализа полученных данных рекомендовано для разработки метода оценки неровноты смешивания в качестве низкой частоты электрического поля принимать 10 кГц, а максимальную частоту устанавливать в диапазоне от 1 до 10 МГц. Указанные значения могут быть откорректированы с учетом конструкции и измерительной системы и технических характеристик ее элементов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

Айтымбетов, С.Р., Хожаметова, З.С. и Зайтбаев, К. (2025). Анализ физико-механических свойств хлопкового волокна выборочных сортов бухара 102 и андижан 36, *Universum: технические науки*, № 3 (132), С. 14–17.

Бабиюк, Г.В., Смекалкин, Е.С., Пунтус, В.Ф. (2021). Усовершенствование датчика, зонда и методики электроемкостной интроскопии горных пород, *Наукоемкие технологии и оборудование в промышленности и строительстве*, № 22 (65), С. 5–14.

Залуцкий, А.В., Котова, Т.И., и Поломошных, С.П. (2024). Исследование емкостных свойств коллагенсодержащей ткани при различных способах обработки, *Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания*, № 4, С. 240–249.

Колодкин, В.Д., Серенков, В.Ю. и Петрович, В.А. (2019). Емкостные датчики уровня топлива, *Материалы 55-й юбилейной научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР*, С. 152–153.

Прохоренко, О.В., Гришанова, С.С., Коган, А.Г. и Бакова, Ю.С. (2019). Анализ качества льняной пряжи и возможности его повышения, *Вестник Витебского государственного технологического университета*, № 1 (36), С. 81–90.

Рыклин, Д.Б. и Авсеев, Е.А. (2011). Способ определения неровноты смешивания компонентов в неоднородных волокнистых продуктах, *Вестник Витебского государственного технологического университета*, № 1 (20), С. 83–88.

Рыклин, Д.Б. и Авсеев, Е.А. (2013). Патент № 17839, *Способ определения неровноты смешивания компонентов в многокомпонентном волокнистом продукте*. Минск: Национальный центр интеллектуальной собственности, Республика Беларусь.

Рыклин, Д.Б. и Медвецкий, С.С. (2017). *Оценка качества текстильных нитей и полуфабрикатов с использованием приборов Uster Tester*. Витебск: УО «ВГТУ», Республика Беларусь.

Мансуров, З.А., Никитин, А.П., Сименюк, Г.Ю., Захаров, Ю.А., Павленко, В.В. и Исмагилов, З.Р. (2020). Исследование структурных особенностей и емкостных параметров углеродных материалов на основе карбонизованной рисовой шелухи, *Химия в интересах устойчивого развития*, № 28, С. 407–416.

Махкамова, Ш.Ф., Матисмаилов, С.Л., Валиева, З.Ф. и Ражапов, О.О. (2020). Анализ показателей физико-механических свойств пряжи в зависимости от частоты вращения приемного барабана чесальной машины, *Universum: технические науки*, № 3 (60).

Милеева, Е.С. и Казарновская, Г.В. (2020). Анализ влияния крутки на показатели качества котонинсодержащей пряжи пневмомеханического способа формирования, *Вестник Витебского государственного технологического университета*, № 1 (38), С. 59–70.

Науменко, А.М. и Темкин, Д.А. (2023). Изменение диэлектрических характеристик моторного масла в процессе эксплуатации, *Материалы и технологии*, № 2 (12), С. 6–11.

Толпесов, А.С., Соловьев, С.В. и Герасимова, О.А. (2025). Совершенствование конструкции приборов индивидуального учета молока на линейных молокопроводах, *Техника и технологии в животноводстве*, № 15 (1), С. 24–29.

Юсупова, Р.К. (2025). Влияние скорости шляпок чесальных машин на качество чесальной ленты и нити, *Universum: технические науки*, № 4 (133), С. 40–45.

Яснев, Д.А. и Рыклин, Д.Б. (2024). Обоснование применения емкостного метода для оценки неровноты смешивания волокон в неоднородных текстильных материалах, *Вестник Витебского государственного технологического университета*, № 3 (49), С. 51–60.

Almetwally, A.A. and Elfowaty, H.M. (2025). Electric and dielectric properties of cotton and regenerated cellulose fibers in comparison with polyethylene terephthalate fiber, *Journal of Natural Fibers*, vol. 22(1). doi: 10.1080/15440478.2025.2537062.

Asanovic, K.A., Cerovic, D.D., Kostic, M.M., Mihailovic, T. V. and Ivanovska, A.M. (2020). Multipurpose nonwoven viscose/polypropylene fabrics: effect of fabric characteristics and humidity conditions on the volume electrical resistivity and dielectric loss tangent, *Fibers and Polym*, vol. 21, pp. 2407–2416. doi:10.1007/s12221-020-1340-4.

Grujić, D., Škipina, B., Cerović D., Topalić-Trivunović, L. and Savić., A. (2021). Antibacterial and dielectric properties of textile materials modified with herbal extract of picea omorika and the copper ferrite nanoparticles, *Contemporary Materials*, vol. 12(1) doi: 10.7251/comen2101080g.

Lv, H.M. and Ma, C.Q. (2013). Experimental Study on the Dielectric Spectrum of Cotton Fiber Aggregation, *Advanced Materials Research*, vol. 821-822, pp. 1475–1478.

Mukherjee, P.K. (2025). Effects of copper ferrite nanoparticles on the dielectric properties of cotton and cotton-polyester mixture, *International Journal of Nanoscience*, vol. 24:2450031. doi:10.1142/S0219581X24500315.

Wang, Y., Liu, Y., Yang, C. and Zhao, X. (2021). Effect of the cobalt ferrite and carbon fiber powder doping ratio on the electromagnetic properties of coated polyaniline-based polyester-cotton fabric, *Textile Research Journal*, vol. 92 (9-10), pp. 1484–1494. doi:10.1177/00405175211060885.

REFERENCES

Ajtymbetov, S.R., Khozhametova, Z.S. and Zajtbaev, K. (2025). Analysis of physical and mechanical properties of cotton fiber of selected varieties Bukhara 102 and Andizhan 36 [Analiz fiziko-mekhanicheskih svojstv hlopkovogo volokna vyborochnyh sortov buhara 102 i andizhan 36]. *Universum: tekhnicheskie nauki = Universe: technical sciences*, vol. 3 (132), pp. 14–17 (In Russian).

Babiyuk, G.V., Smekalkin, E.S. and Puntus, V.F. (2021). Improvement of the sensor, probe and method of electrocapacitive introscopy of rocks [Usovershenstvovanie datchika, zonda i metodiki ehlektroemkostnoj introskopii gornykh porod]. *Naukoemkie tekhnologii i oborudovanie v promyshlennosti i stroitel'stve = High-tech technologies and equipment in industry and construction*, vol. 22 (65), pp. 5–14 (In Russian).

Zaluckij, A.V., Kotova, T.I. and Polomoshnykh, S.P. (2024). Study of capacitive properties of collagen-containing tissue under different processing methods [Issledovanie emkostnykh svojstv kollagensoderzhashchej tkani pri razlichnykh sposobakh obrabotki]. *Tekhnologii pishchevoj i pererabatyvayushchej promyshlennosti APK – produkty zdorovogo pitaniya = Technologies of food and processing industry of agro-industrial complex – healthy food products*, vol. 4, pp. 240–249 (In Russian).

Kolodkin, V.D., Serenkov, V.Yu. and Petrovich, V.A. (2019). Capacitive fuel level sensors [Yomkostnye datchiki urovnya topliva]. *Materialy 55-j yubilejnoj nauchnoj konferencii aspirantov, magistrantov i studentov BGUIR = Proceedings of the 55th Anniversary Scientific Conference of Postgraduate, Master's and Undergraduate Students of BSUIR*, pp. 152–153 (In Russian).

Prohorenko, O.V., Grishanova, S.S., Kogan, A.G. and Bakova, U.S. (2019). Analysis of the quality of linen yarn and the possibility of its improvement [Analiz kachestva l'nyanoĭ pryazhi i vozmozhnosti ego povysheniya]. *Vestnik Vitebskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta = Vestnik of Vitebsk State Technological University*, vol. 1 (36), pp. 81–90 (In Russian).

Ryklin, D.B, Avseev, E.A. (2011). Method for determining the unevenness of mixing components in heterogeneous fibrous products [Sposob opredeleniya nerovnoty smeshivaniya komponentov v neodnorodnyh voloknistyh produktah]. *Vestnik Vitebskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta = Vestnik of Vitebsk State Technological University*, vol. 1 (20), pp. 83–88 (in Russian).

Ryklin, D.B, Avseev, E.A. (2013). Patent No. 17839, *Method for determining the unevenness of mixing components in a multi-component fibrous product* [Sposob opredeleniya nerovnoty smeshivaniya komponentov v mnogokomponentnom voloknistom produkte]. Published: 12.30.2013. Minsk: National Center for Intellectual Property, Republic of Belarus (in Russian).

Ryklin, D.B. and Medveckij, S.S. (2017). *Ocenka kachestva tekstil'nykh nitej i polufabrikatov s ispol'zovaniem priborov Uster Tester* [Evaluation of the quality of textile threads and semi-finished products using Uster Tester devices]. Vitebsk: UO "VSTU", Republic of Belarus (In Russian).

Mansurov, Z.A., Nikitin, A.P., Simenyuk, G.Yu., Zakharov, Yu.A., Pavlenko, V.V. and Ismagilov, Z.R. (2020). Study of structural features and capacity parameters of carbon materials based on carbonized rice husk [Issledovanie strukturnykh osobennostej i emkostnykh parametrov uglerodnykh materialov na osnove karbonizovannoj risovoj shelukhi]. *Himiya v interesakh ustojchivogo razvitiya = Chemistry for Sustainable Development*, vol. 28, pp. 407–416 (In Russian).

Mahkamova, Sh.F., Matismailov, S.L., Valieva, Z.F. and Razhapov, O.O. (2020). Analysis of the physical and mechanical properties of yarn depending on the rotation frequency of the receiving drum of the carding machine [Analiz pokazatelej fiziko-mekhanicheskikh svojstv pryazhi v zavisimosti ot chastoty vrashcheniya priemnogo barabana chesal'noj mashiny]. *Universum: tekhnicheskie nauki = Universe: technical sciences*, vol. 3 (60) (In Russian).

Mileeva, E.S. and Kazarnovskaya, G.V. (2020). Analysis of the influence of twist on the quality indicators of cotton-containing yarn of the pneumatic mechanical method of formation [Analiz vliyaniya krutki na pokazateli kachestva kotoninsoderzhashchej pryazhi pnevmomekhanicheskogo sposoba formirovaniya]. *Vestnik Vitebskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta = Vestnik of Vitebsk State Technological University*, vol. 1 (38), pp. 59–70 (In Russian).

Naumenko, A.M. and Temkin, D.A. (2023). Changes in dielectric characteristics of motor oil during operation [Izmenenie diehlektricheskikh kharakteristik motornogo masla v processe ehkspluatacii]. *Materialy i tekhnologii = Materials and technologies*, vol. 2 (12), pp. 6–11 (In Russian).

Tolpesov, A.S., Solov'ev, S.V. and Gerasimova, O.A. (2025). Improving the design of individual milk metering devices on linear milk pipelines [Sovershenstvovanie konstrukcii priborov individual'nogo ucheta moloka na linejnykh molokoprovodakh]. *Tekhnika i tekhnologii v zhivotnovodstve = Equipment and technologies in animal husbandry*, vol. 15 (1), pp. 24–29 (In Russian).

Yusupova, R.K. (2025). The influence of the carding machine cap speed on the quality of the carding sliver and thread [Vliyanie skorosti shlyapok chesal'nykh mashin na kachestvo chesal'noj lenty i niti]. *Universum: tekhnicheskie nauki = Universe: technical sciences*, vol. 4 (133), pp. 40–45 (In Russian).

Yasnev, D.A. and Ryklin, D.B. (2024). Justification of the application of the capacitance method for assessing the unevenness of fiber mixing in heterogeneous textile materials [Obosnovanie primeneniya emkostnogo metoda dlya ocenki nerovnoty smeshivaniya volokon v neodnorodnykh tekstil'nykh materialakh]. *Vestnik Vitebskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta = Bulletin of Vitebsk State Technological University*, vol. 3 (49), pp. 51–60 (In Russian).

Almetwally, A.A. and Elfowaty, H.M. (2025). Electric and dielectric properties of cotton and regenerated cellulose fibers in comparison with polyethylene terephthalate fiber, *Journal of Natural Fibers*, vol. 22(1). doi: 10.1080/15440478.2025.2537062.

Asanovic, K.A., Cerovic, D.D., Kostic, M.M., Mihailovic, T.V. and Ivanovska, A.M. (2020). Multipurpose nonwoven viscose/polypropylene fabrics: effect of fabric characteristics and humidity conditions on the volume electrical resistivity and dielectric loss tangent, *Fibers and Polym*, vol. 21, pp. 2407–2416. doi:10.1007/s12221-020-1340-4.

Grujić, D., Škipina, B., Cerović D., Topalić-Trivunović, L. and Savić., A. (2021). Antibacterial and dielectric properties of textile materials modified with herbal extract of picea omorika and the copper ferrite nanoparticles, *Contemporary Materials*, vol. 12(1) doi: 10.7251/comen2101080g

Lv, H.M. and Ma, C.Q. (2013). Experimental Study on the Dielectric Spectrum of Cotton Fiber Aggregation, *Advanced Materials Research*, vol. 821-822, pp. 1475–1478.

Mukherjee, P.K. (2025). Effects of copper ferrite nanoparticles on the dielectric properties of cotton and cotton–polyester mixture, *International Journal of Nanoscience*, vol. 24:2450031. doi:10.1142/S0219581X24500315.

Wang, Y., Liu, Y., Yang, C. and Zhao, X. (2021). Effect of the cobalt ferrite and carbon fiber powder doping ratio on the electromagnetic properties of coated polyaniline-based polyester-cotton fabric, *Textile Research Journal*, vol. 92 (9-10), pp. 1484–1494. doi:10.1177/00405175211060885.

Информация об авторах

Яснев Данила Андреевич

Магистр технических наук, аспирант кафедры «Техническое регулирование и товароведение», Витебский государственный технологический университет, Республика Беларусь.

E-mail: yasnevdanila@mail.ru

Рыклин Дмитрий Борисович

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Техническое регулирование и товароведение», Витебский государственный технологический университет, Республика Беларусь.

E-mail: ryklin-db@mail.ru

Свито Иван Антонович

Кандидат физико-математических наук, доцент, ведущий научный сотрудник НИЛ энергоэффективних материалов и технологий кафедры физики твердого тела и нанотехнологий, Белорусский государственный университет, Республика Беларусь.

E-mail: ivansvito184@gmail.com

Information about the authors

Danila A. Yasneu

Master of Technical Sciences, Postgraduate Student of the Department "Technical Regulation and Commodity Science", Vitebsk State Technological University, Republic of Belarus.

E-mail: yasnevdanila@mail.ru

Dzmitry B. Ryklin

Doctor of Science (in Engineering), Professor, Chair of the Department "Technical Regulation and Commodity Science", Vitebsk State Technological University, Republic of Belarus.

E-mail: ryklin-db@mail.ru

Ivan A. Svito

Candidate of Sciences (in Physical and Mathematical), Associate Professor, Leading Researcher, Research Laboratory of Energy-Efficient Materials and Technologies at the Department "Solid State Physics and Nanotechnology", Belarusian State University, Republic of Belarus.

E-mail: ivansvito184@gmail.com