

ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ И ИЗУЧЕНИЕ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТКАНЕЙ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ОТ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

CHOOSING A RATIONAL STRUCTURE AND STUDYING THE RADIO AND TECHNICAL CHARACTERISTICS OF FABRICS FOR PROTECTION FROM ELECTROMAGNETIC RADIATION

УДК 677.07.13, 677.532, 677.017.6

П.Е. Сафонов*, Н.М. Левакова

ООО «ТЕКС-ЦЕНТР»

<https://doi.org/10.24412/2079-7958-2023-1-36-48>

P. Safonov*, N. Levakova

TEKS-CENTRE LLC

РЕФЕРАТ

ЭКРАНИРУЮЩИЕ ТКАНИ, КОМБИНИРОВАННЫЕ ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩИЕ НИТИ, МЕДНАЯ И СТАЛЬНАЯ ПРОВОЛОКА, КОЭФФИЦИЕНТ ПРОХОЖДЕНИЯ И ОТРАЖЕНИЯ

Исследование посвящено вопросам проектирования, выбора оптимальных структур и изучению радиотехнических характеристик тканей, предназначенных для защиты человека и специальной техники от электромагнитного излучения радиочастотного диапазона (ЭМИ РЧ). В соответствии с современными российскими стандартами средства индивидуальной защиты должны обеспечивать коэффициент экранирования в диапазоне частот 30 кГц...60 ГГц не менее 30 дБ.

Традиционные текстильные структуры (однослойные ткани и трикотаж), в первом приближении являющиеся двумерными материалами, способны обеспечить высокий уровень экранирования ЭМИ РЧ за счет высокой степени его отражения ($K_{отр} = 88...99\%$) – принцип клетки Фарадея. Для экранирования ЭМИ РЧ с использованием принципа поглощения необходимо использовать многослойные текстильные структуры с эффектом, так называемого многократного внутреннего отражения, которые, очевидно, обладают большим весом в сравнении с однослойными тканями.

В данной работе для эффективного экранирования ЭМИ РЧ предложено использовать сме-

ABSTRACT

SHIELDING FABRICS, COMBINED ELECTRICALLY CONDUCTIVE THREADS, COPPER AND STEEL WIRE, TRANSMISSION AND REFLECTION COEFFICIENT

The research is devoted to topical issues of designing, choosing a rational structure and studying the radio and technical properties of fabrics designed to shield electromagnetic radiation of the radio frequency range.

The article shows that single-layer woven structures can provide effective protection against electromagnetic radiation of the radio frequency range due to a high degree of reflection ($C_{ref} = 88...99\%$). If necessary, by alternating fabrics with different reflection and absorption coefficients in the package, the effect of multiple internal reflection can be realized.

The conducted studies have confirmed that the shielding properties of fabrics can be varied by changing the geometry of the cell formed by the conductive threads of the warp and weft. The dependence between the length of the electromagnetic wave and the size of the side of the cell necessary for its reflection is confirmed.

For effective shielding, it is proposed to use combined yarns with different percentages of steel fibers and combined electrically conductive threads, which should contain metal wire with low electrical resistance (copper and its alloys, steel).

Fabrics with a surface density from 55 to 220 g/m² have been developed, which have a trans-

* E-mail: pavlin722007@yandex.ru (P. Safonov)

совые пряжи с различным процентом вложения стальных волокон (не менее 30 %) и комбинированные электропроводящие нити, которые должны содержать металлическую проволоку с малым электрическим сопротивлением (медь и ее сплавы, сталь).

Разработанные ткани с поверхностной плотностью от 55 до 220 г/м² имеют коэффициент прохождения равный или менее -30 дБ при частоте излучения от 300 кГц до 16 ГГц.

mission coefficient equal to or less than -30 dB at a radiation frequency from 300 kHz to 16 GHz.

Аналитическая часть

В связи с непрекращающимся расширением сфер применения устройств и приборов (бытового, промышленного и оборонного назначения), являющихся источниками электромагнитного излучения, в том числе радиочастотного диапазона, особо актуальным направлением является проектирование структур текстильных материалов с заданной защитной способностью в широком частотном диапазоне электромагнитного излучения.

Объектами данного исследования являются ткани для защиты от электромагнитного излучения (ЭМИ) радиочастотного диапазона (РЧ). Руководствуясь определениями стандартов Российской Федерации, в частности ГОСТом 12.4.305-2016 и ГОСТом 12.4.306-2016, под ЭМИ радиочастотного диапазона понимается излучение в диапазоне частот от 30 кГц до 60 ГГц (от 10 см до 5 мм). При этом коэффициент экранирования в диапазоне частот от 30 кГц до 60 ГГц должен быть не менее 30 дБ.

Все способы эффективного экранирования ЭМИ РЧ с помощью средств индивидуальной защиты (СИЗ) можно условно разделить на две большие группы: экранирование за счет отражения и экранирование за счет поглощения излучения в интересующем диапазоне частот.

Традиционные текстильные структуры (ткани и трикотаж) в первом приближении можно рассматривать, как двухмерные материалы, из-за малого значения их толщины [1]. В подобных «плоских» структурах эффективную защиту от ЭМИ РЧ можно обеспечить лишь за счет высокой степени его отражения – принцип клетки Фарадея.

Для экранирования ЭМИ РЧ с использованием принципа поглощения (или комбинации поглощения и отражения) необходимо использовать многослойные текстильные структуры с эффектом, так называемого многократного внутреннего отражения [2], что, очевидно, приведет к увеличению веса защитного экрана.

Из работы [2] известно, что для решения задачи экранирования ЭМИ частотой от 1 до 18 ГГц предложено использовать пакеты текстильных материалов, на отдельные слои которых нанесены тонкослойные покрытия различных металлов.

На рисунке 1 схематично показано явление множественного отражения ЭМИ: волны, отраженные от второй границы поверхности, снова отражаются от первой поверхности и возвращаются на вторую поверхность, и когда волна достигает второй поверхности во второй раз, она уже имеет пренебрежимо малую амплитуду колебаний и т. д. По мнению авторов, для эффективной защиты от ЭМИ компоненты слоев в пакете должны сочетать высокую электропроводность и ферромагнитные свойства.

В рамках нашего исследования будут рассмотрены только ткани в виде отдельных слоев, которые должны экранировать ЭМИ РЧ за счет высокой степени отражения. Высокую степень отражения в рамках одного слоя ткани можно обеспечить следующими технологическими приемами:

- 1) обеспечить сплошное высокоэлектропроводящее покрытие (никель, сталь и т. д.) на поверхности ткани путем ее металлизации;
- 2) для изготовления ткани использовать смешанную пряжу с вложением электропроводящих

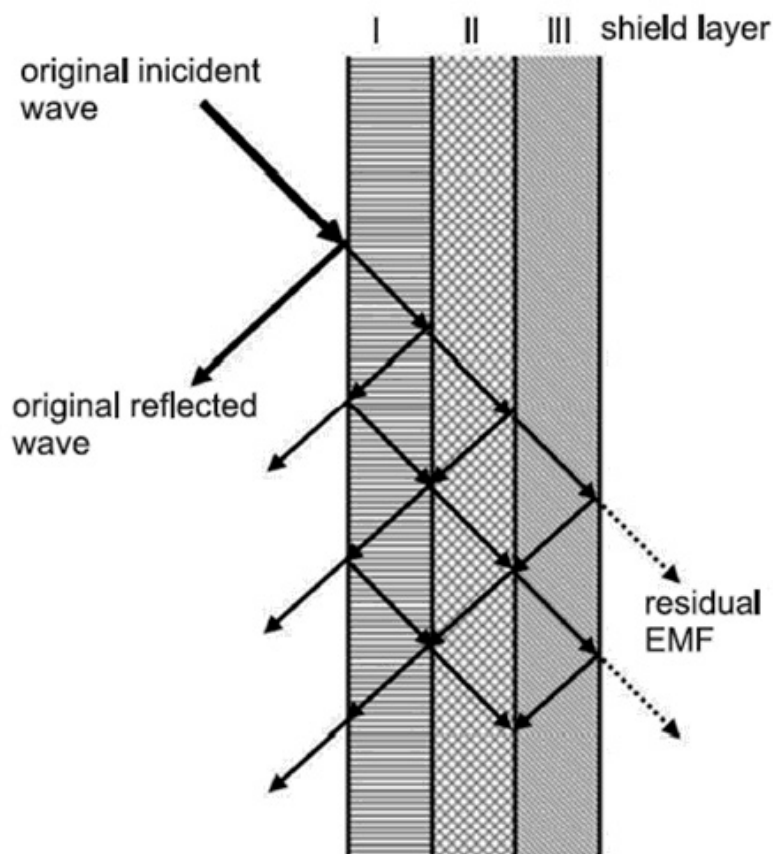


Рисунок 1 – Схема множественных внутренних отражений в многослойном экране, изображение из статьи [2]

волокон (как правило, нержавеющая сталь);

3) для изготовления ткани использовать непрерывные проводники – металлические микропровода (как правило, медная или стальная проволока);

4) использовать комбинацию способов 2 и 3.

Для изготовления радиоотражающих тканей специального назначения, а также экранирующей спецодежды, получили распространение ткани, структура которых предполагает наличие электропроводящей решетки с регулярными квадратными ячейками из основных и уточных нитей, в некоторых случаях чередующихся с непроводящими нитями [3].

На рисунке 2 представлена принципиальная схема описанной структуры, при этом из опыта использования данных тканей известно, что с увеличением расстояния между электропро-

водящими нитями более 1 мм эффективность экранирования от ЭМИ РЧ резко снижается.

Из работы [1] известно об изготовлении трех вариантов ткани, содержащих в своей структуре комбинированные крученые электропроводящие нити, изготовленные ткани имеют расстояние между электропроводящими нитями равное 3 мм.

Авторами были произведены измерения коэффициентов пропускания и отражения в пределах следующих диапазонов частот: 2,5...3,5 ГГц; 3,5...5 ГГц; 5...8 ГГц; 8...13 ГГц; 13...18 ГГц. Коэффициенты прохождения образцов тканей при максимальной частоте 18 ГГц составляют порядка -5 дБ, что свидетельствует о низкой эффективности данных материалов для экранирования ЭМИ РЧ, для уменьшения коэффициента пропускания необходимо уменьшать расстояние

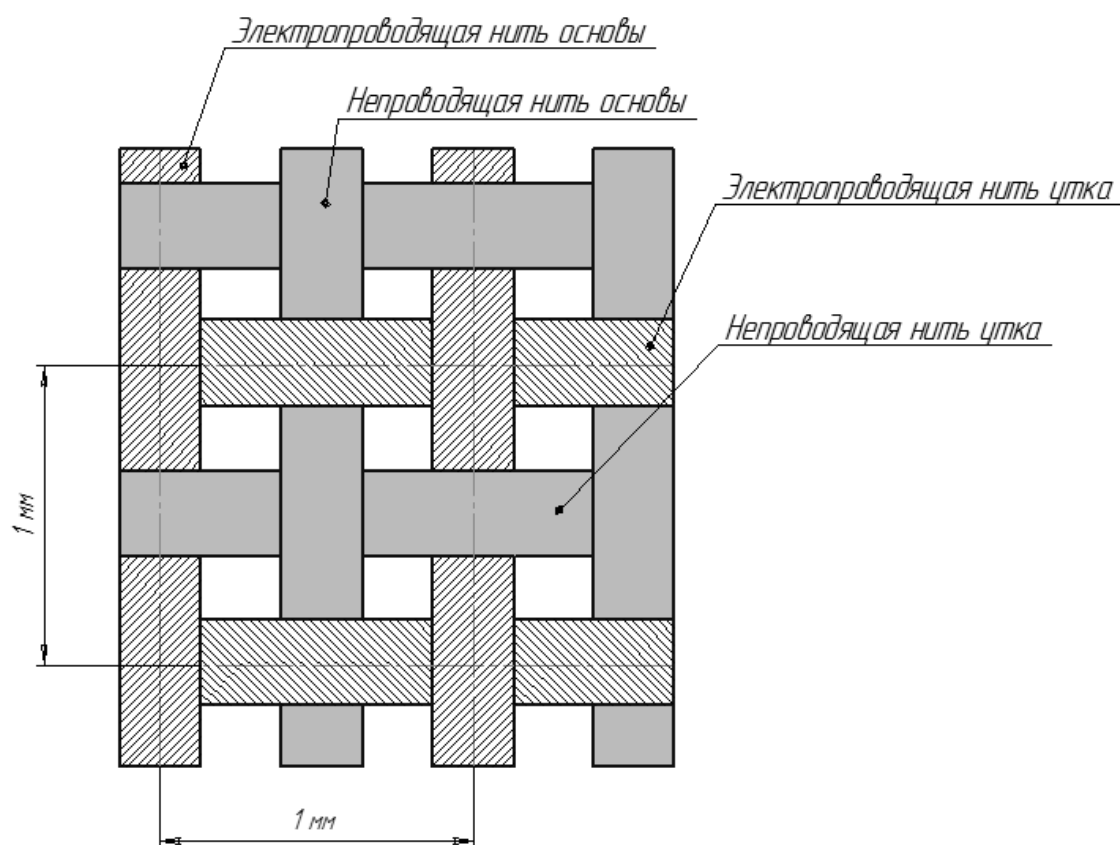


Рисунок 2 – Схема ячейки, образованной токопроводящими нитями основы и утка

между электропроводящими нитями.

На рисунке 3 представлена собственная эмпирическая зависимость коэффициента прохождения ЭМИ с частотой 10 и 16 ГГц от размера квадратной ячейки, образованной медной посеребренной проволокой диаметром 0,05 мм. Установлено, что с увеличением частоты с 10 до 16 ГГц при использовании ячейки со стороной 0,5 мм коэффициент прохождения увеличивается на 5–6 дБ. Для обеспечения коэффициента прохождения на уровне -30 дБ при частоте 10 ГГц достаточно использовать ткань со стороной ячейки 0,5 мм, а при увеличении частоты до 16 ГГц сторону ячейки необходимо уменьшить до 0,3 мм.

Несмотря на то, что большинство экранирующих тканей содержат ячейку из токопроводящих нитей квадратной формы, существуют альтерна-

тивные подходы к решению данной проблемы. Так из работ российских ученых (Беляев О.Ф., Заваруев В.А., Кудрявин Л.А., Подшивалов С.Ф., Халиманович В.И.) [4] известно об использовании трикотажных сетеполотен из металлической микропроволоки, которые могут быть использованы в конструкциях трансформируемых космических или наземных антенн в качестве отражающей поверхности.

Авторами показано, что существует эмпирическая зависимость между длиной электромагнитной волны и размером стороны ячейки трикотажного сетеполотна. Размер стороны ячейки можно определить, как: $\lambda/(10...20)$, где: λ – длина волны излучения.

Стоит отметить, что ткани, включающие непрерывные высокоэлектропроводящие нити, имеют существенное преимущество по сравнению с

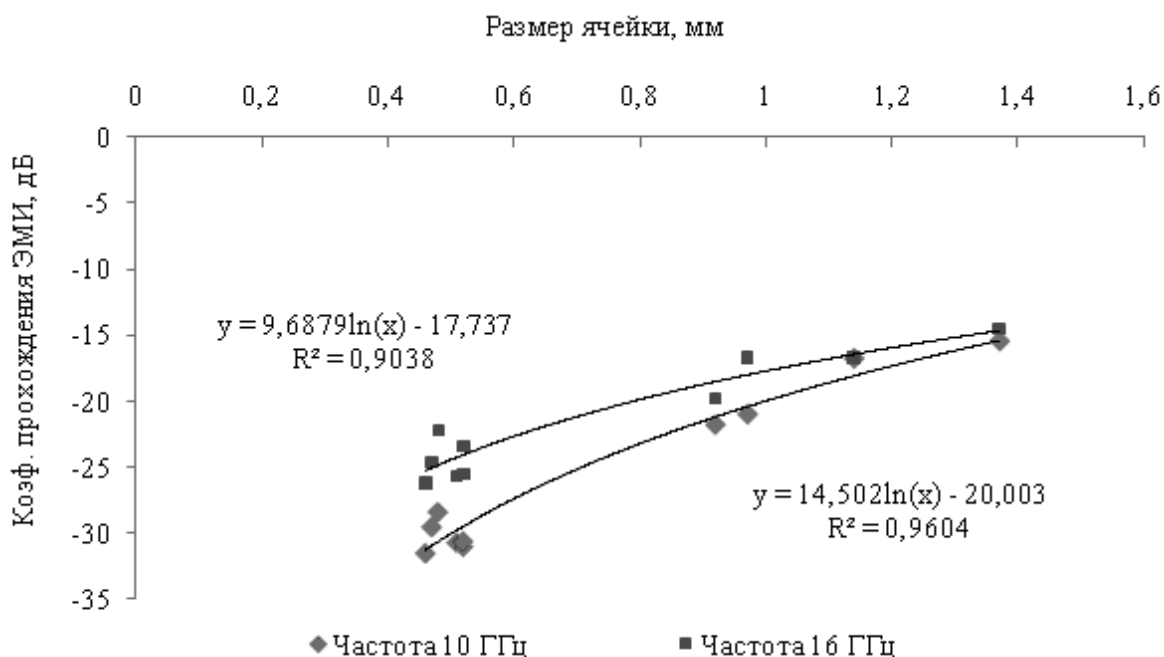


Рисунок 3 – Зависимость коэффициента прохождения ЭМИ от размера ячейки между нитями, содержащими медную проволоку

металлизированными с поверхности (способом магнетронного напыления или гальваническим способом нанесения металлического покрытия) тканями, поскольку они имеют устойчивые защитные свойства, и могут подвергаться физико-химическим воздействиям, в частности, химическим чисткам и стиркам.

Из результатов собственных исследований известно, что в местах пересечения нитей основы и утка наблюдается отсутствие металлического покрытия при металлизации ткани с поверхности тем или иным способом, что негативно влияет на надежность электрических контактов и может привести к ухудшению проводимости ткани.

На рисунке 4 представлены фотографии различных нитей и пряжи, извлеченных из тканей саржевого и полотняного переплетений, металлизированных гальваническим способом.

Таким образом, наиболее эффективным представляется использование в структурах экранирующих тканей специальных комбинированных нитей, сочетающих свойства огне-

термостойкости (по требованию Заказчиков), высокой электропроводности, способности быть переработанными на существующем технологическом оборудовании. Подобные комбинированные нити могут быть изготовлены на тростильно-крутильных или крутильно-оплеточных машинах путем скручивания или обкручивания непроводящего компонента (нити или пряжи) токопроводящей металлической микропроволокой диаметром от 30 до 60 *мкм*.

Объекты исследования

Далее проведем исследование радиотехнических характеристик образцов тканей, изготовленных с учетом изложенных выше принципов. Для изготовления тканей были использованы следующие виды исходного сырья:

- пряжа смесовая метаарамид/сталь 70/30 % Nm 60/2 (16,7x2 *текс*);
- пряжа смесовая метаарамид/сталь 52/48 % Nm 40/2 (25x2 *текс*);
- нить мишурная 43 *текс* с сердечником из пряжи метаарамидной Nm 60/1 (16,7 *текс*) и оплеткой из медной плющеной посеребрянной

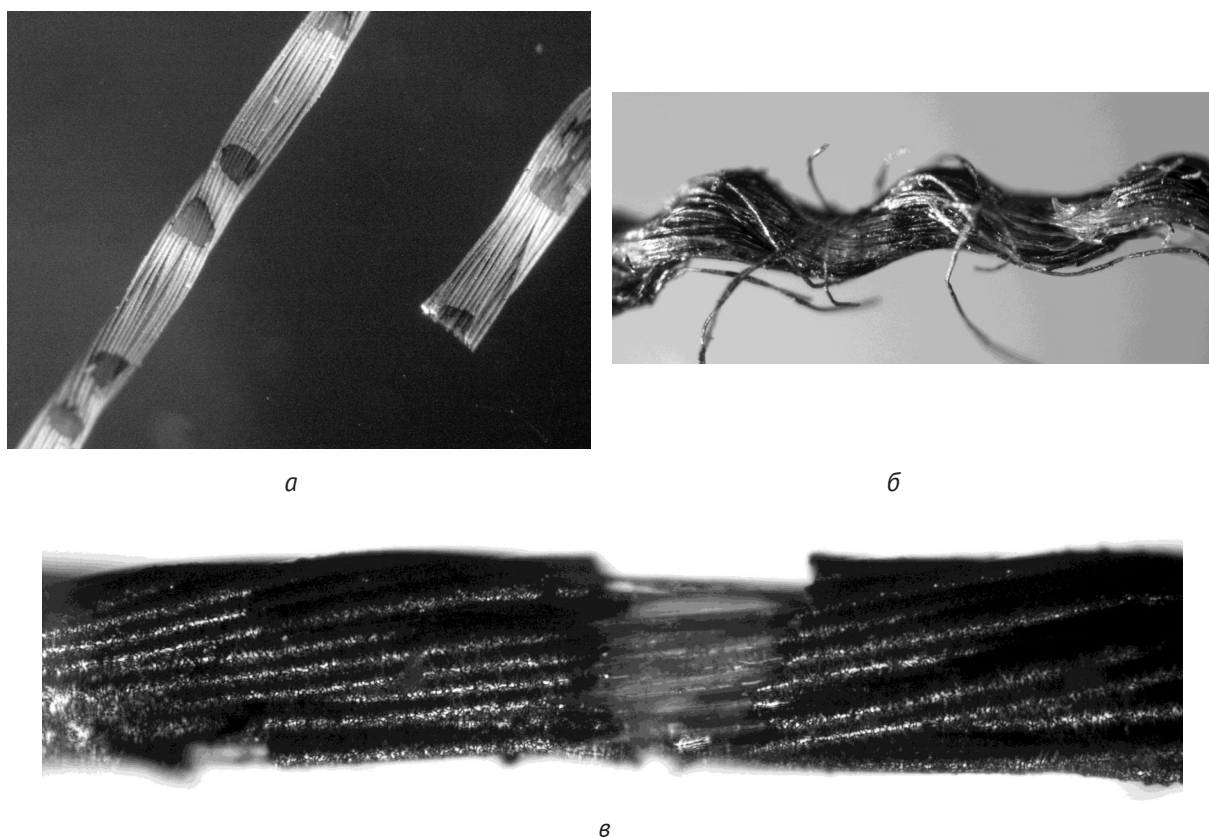


Рисунок 4 – Нить Аримид 11,1 *текс* (а), пряжа Арселон 29 *текс* (б), нить полиэфирная 5 *текс* (в), извлеченные из металлизированных тканей саржевого и полотняного переплетений

проволоки 2 ППС 0,05 *мм*;

г) нить мишурная 52 *текс* с сердечником из пряжи смесовой метаарамид/сталь 52/48 % Nm 40/1 (25 *текс*) и оплеткой из медной плющеной посеребренной проволоки 2 ППС 0,05 *мм*;

д) нить мишурная 43 *текс* с сердечником из пряжи метаарамидной Nm 60/1 (16,7 *текс*) и оплеткой из круглой посеребренной медь-ниобиевой (сплав *Cu-Nb*) проволоки ПМПЭ-МН-б-Ср5 0,06 *мм*;

е) стальная нержавеющая проволока диаметром 0,035 *мм*.

На рисунке 5 представлены фотографии пряжи смесовой с вложением стальных волокон (Inox) и нити мишурной с оплеткой из медной плющеной проволоки.

В таблице 1 представлен перечень с описанием образцов экранирующих тканей, которые

были выбраны для изучения радиотехнических характеристик. Сочетание в ткани стальных волокон (в составе пряжи) и медных посеребренных проволок (в составе мишурной нити) по нашему мнению должно способствовать повышению ее экранирующей способности за счет высокой электропроводности меди и наличия магнитных свойств у стали.

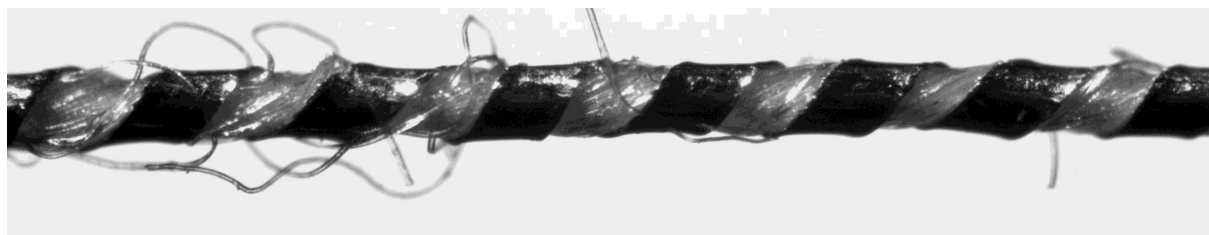
Методы испытаний

За помощь в проведении измерений радиотехнических характеристик тканей выражаем благодарность коллективу ООО НПП «Радиострим» и заведующему лаборатории ИБХФ РАН к.ф.-м.н. С.Б. Бибикову:

1. Измерения в диапазоне частот от 300 *кГц* до 7 *ГГц* проводились на лабораторном стенде, на базе измерителя комплексных коэффициентов передачи, сопряженного с компьютерной си-



а



б

Рисунок 5 – Фотографии электропроводящих нитей: а) смешовая пряжа, содержащая стальные волокна в количестве 30 %; б) мишурная нить с сердечником из пряжи и оплеткой из медной посеребренной плющеной проволоки

стемой регистрации и обработки сигнала. Образцы помещались в коаксиальную измерительную ячейку сечением 16/6,95 мм, согласованную с коаксиальным измерительным трактом и включенную в режим измерения ослаблений (пропускания). Трак обеспечивает распространение волны ТЕМ-моды. После помещения ячейки с образцом в измерительный тракт определялись соответствующие коэффициенты прохождения $K_{пр}$ ЭМИ через испытуемый образец.

2. Измерения на частотах 10 и 16 ГГц проводились в секциях прямоугольных волноводов 23×10 мм и 16×8 мм, соответственно, на основной моде Н10, при нормальном падении электромагнитной волны на образец, полностью заполняющий сечение тракта.

3. В результате измерений определялись значения коэффициентов поглощения ($K_{погл}$), отражения ($K_{отр}$) и пропускания ($K_{пр}$). Коэффициент поглощения $K_{погл}$ рассчитывался из условия энергетического баланса по данным $K_{пр}$ и $K_{отр}$.

Обсуждение результатов

В таблице 2 представлены усредненные по частотному диапазону 300 кГц...7 ГГц величины коэффициентов прохождения ($K_{прох}$), отражения ($K_{отр}$) и поглощения ($K_{погл}$) ЭМИ через образцы исследуемых тканей. Данные усреднены по направлению вектора \mathbf{E} вследствие структуры электрического поля в тракте.

В таблице 3 представлены значения коэффициентов прохождения ($K_{прох}$), отражения ($K_{отр}$) и поглощения ($K_{погл}$), определённые в волноводных трактах на фиксированных частотах 10 и 16 ГГц. Данные приведены для двух поляризационных положений (||, ⊥), которые соответствуют направлению систем нитей основы и утка.

При анализе данных таблицы 2 установлено, что все образцы тканей (кроме образца № 7) имеют коэффициент прохождения менее -30 дБ, что свидетельствует об высоких экранирующих свойствах во всем диапазоне частот 300 кГц...7 ГГц, при этом экранирование ЭМИ

Таблица 1 – Перечень образцов экранирующих тканей для испытаний радиотехнических характеристик

№ обр.	Описание структуры ткани и чередование нитей	Поверхностная плотность, г/м ²	Шаг элпрод. нитей, мм	Переплетение
1	Основа: пряжа (а); Уток: пряжа (а).	183	0,32*0,46	Саржа 1/2
2	Основа: мишура (в) / пряжа (а) 1 к 2; Уток: мишура (в) / пряжа (а) 1 к 1.	204		
3	Основа: пряжа (а); Уток: мишура (в) / пряжа (а) 1 к 1.	194		
4	Основа: пряжа (а); Уток: мишура (в).	204		
5	Основа: мишура Cu-Nb (д) / пряжа (а) 1 к 2; Уток: мишура Cu-Nb (д) / пряжа (а) 1 к 1.	210		
6	Основа: пряжа (а); Уток: мишура Cu-Nb (д) / пряжа (а) 1 к 1.	199		
7	Основа: пряжа (а); Уток: пряжа (а).	175	0,33*0,52	Плотняное
8	Основа: стальная проволока 0,035 мм (е); Уток: стальная проволока 0,035 мм (е).	55	0,26*0,28	Плотняное
9	Основа: мишура (в); Уток: мишура (в).	159	0,53*0,54	Саржа 2/2
10	Основа: мишура (в); Уток: мишура (в).	185	0,52*0,41	
11	Основа: мишура (г) / пряжа (б) 1 к 1; Уток: мишура (г) / пряжа (б) 1 к 1.	223	0,40*0,49	Саржа 1/2
12	Основа: мишура (в) / пряжа (б) 1 к 1; Уток: мишура (в) / пряжа (б) 1 к 1.	200	0,45*0,53	Саржа 1/2
13	Основа: мишура Cu-Nb (д) / пряжа (б) 1 к 1; Уток: мишура Cu-Nb (д) / пряжа (б) 1 к 1.	199		

происходит за счет высокой степени отражения ($K_{отп} = 88...99,7\%$).

Минимальный коэффициент прохождения в **дБ** (максимальная степень экранирования) достигнут для образцов № 11–13, в данных образцах в основе и утке использована смесовая пряжа метаарамид/сталь 52/48 % в чередовании 1 к 1 с мишурными нитями с медной проволокой.

При анализе данных таблицы 3 установлено, что все образцы тканей (кроме образца № 9) имеют коэффициент прохождения менее -30 **дБ**, что свидетельствует об высоких экранирующих свойствах на частотах 10 и 16 **ГГц**, при этом экранирование ЭМИ происходит за счет

высокой степени отражения ($K_{отп} = 91...99\%$).

Минимальный коэффициент прохождения в **дБ** достигнут для образцов № 11–13, в которых использована смесовая пряжа метаарамид/сталь 52/48 % в чередовании 1 к 1 с мишурными нитями с медной проволокой. Максимальные коэффициенты прохождения (наименьшая степень экранирования) наблюдались для образцов № 8–10, которые представляют собой сетчатые структуры либо только из мишурных нитей с медной проволокой (№ 9 и 10) либо полностью из микропроволоки (№ 8).

На рисунке 6 представлены примеры частотных зависимостей коэффициента прохождения и отражения ЭМИ для образцов тканей № 2–4 в

Таблица 2 – Результаты измерения радиотехнических характеристик тканей для экранирования ЭМИ РЧ, усредненные по диапазону 300 кГц...7 ГГц (длина волны от 1 км до 43 м.м)

№ Обр.	Усреднение по диапазону от 300 кГц до 7 ГГц				
	$K_{\text{прох}}$		$K_{\text{отр}}$		$K_{\text{погл}}$
	%	дБ	%	дБ	%
1	0,063	-32,0	-	-	-
2	0,056	-32,5	93,8	-0,28	6,2
3	0,073	-31,4	93,5	-0,29	6,4
4	0,039	-34,1	88,0	-0,56	12,0
5	0,099	-30,0	93,3	-0,30	6,6
6	0,066	-31,8	92,9	-0,32	7,0
7	0,157	-28,0	89,5	-0,48	10,3
8	0,051	-32,9	96,0	-0,18	4,0
9	0,069	-31,6	98,2	-0,08	1,7
10	0,025	-36,1	99,7	-0,02	0,3
11	0,005	-43,2	98,2	-0,08	1,8
12	0,003	-44,8	98,3	-0,07	1,7
13	0,006	-42,1	98,1	-0,08	1,9

линейном и логарифмическом масштабе. Видно, что в области малых частот излучения (300 кГц) коэффициент прохождения достигает минимальных значений (-70...-80 дБ), далее с увеличением частоты происходит увеличение $K_{\text{прох}}$ с достижением максимальных значений (около -30 дБ) на частотах 2–3 ГГц (15–10 см), после чего с увеличением частоты излучения рост $K_{\text{прох}}$ замедляется и сменяется снижением. Представленные частотные зависимости достаточно полно характеризуют поведение практически всех тканей, рассмотренных в данной работе.

На рисунке 7 представлены фотографии поверхности образцов тканей № 1, 2, 8 и 10. С учетом выводов, сделанных при анализе таблиц 2 и 3 можно заключить, что для достижения максимальной экранирующей способности ЭМИ РЧ (что в данном случае эквивалентно минимуму коэффициента прохождения) необходимо ис-

пользовать высоконаполненную ткань из смесовой пряжи с содержанием стальных волокон на уровне 50 % с включением в ее структуру микшурных нитей с медной плющеной проволокой.

Таким образом, по результатам проведенной работы можно сделать следующие выводы:

- установлено, что однослойные тканые структуры позволяют обеспечить эффективную защиту от ЭМИ РЧ за счет высокой степени отражения ($K_{\text{отр}} = 88...99\%$) – принцип клетки Фарадея. При этом при необходимости, чередуя между собой ткани с различным коэффициентом отражения и поглощения в составе пакета, можно реализовать эффект многократного внутреннего отражения;

- установлено, что экранирующие свойства тканей можно варьировать, изменяя геометрию ячейки, образованной токопроводящими нитями основы и утка. Установлено, что существует зависимость между длиной электромагнитной волны

Таблица 3 – Результаты измерения радиотехнических характеристик тканей для экранирования ЭМИ РЧ на частотах 10 и 16 ГГц (длина волны 30 и 19 мм)

№ Образца	Поляризация	Частота 10 ГГц					Частота 16 ГГц				
		$K_{\text{прох}}$		$K_{\text{отр}}$		$K_{\text{погл}}$	$K_{\text{прох}}$		$K_{\text{отр}}$		$K_{\text{погл}}$
		%	дБ	%	дБ	%	%	дБ	%	дБ	%
1		0,01	-42,0	94,1	-0,26	5,9	0,03	-35,8	92,9	-0,32	7,1
	⊥	0,01	-42,7	93,5	-0,29	6,5	0,01	-38,8	93,9	-0,28	6,1
2		0,003	-45,7	96,5	-0,15	3,5	0,008	-41,0	95,3	-0,21	4,7
	⊥	0,013	-38,8	95,4	-0,21	4,6	0,014	-38,5	92,7	-0,33	7,3
3		0,007	-41,5	95,1	-0,22	4,9	0,032	-35,0	94,8	-0,23	5,2
	⊥	0,017	-37,6	94,1	-0,26	5,9	0,013	-39,0	92,0	-0,36	8,0
4		0,009	-40,6	94,5	-0,25	5,5	0,023	-36,4	94,9	-0,23	5,1
	⊥	0,098	-30,1	93,9	-0,28	6,1	0,1	-30,0	91,3	-0,39	8,6
5		-	-45,0	95,3	-0,21	4,7	-	-39,3	93,9	-0,27	6,1
	⊥	-	-37,0	93,0	-0,32	7,0	-	-35,8	92,3	-0,35	7,7
6		-	-40,7	95,9	-0,18	4,1	-	-37,7	94,4	-0,25	5,5
	⊥	-	-37,4	92,9	-0,32	7,1	-	-39,2	91,4	-0,39	8,6
7		-	-40,8	94,6	-0,24	5,4	-	-38,2	93,7	-0,28	6,3
	⊥	-	-37,5	92,2	-0,35	7,7	-	-36,6	91,0	-0,41	8,9
8		0,023	-36,3	97,1	-0,13	2,9	0,039	-34,1	93,0	-0,32	7,0
	⊥	0,1	-29,9	96,6	-0,15	3,3	0,093	-30,3	94,3	-0,26	5,7
9		0,07	-31,7	99,3	-0,03	0,6	0,22	-26,6	98,8	-0,05	1,0
	⊥	0,15	-28,3	99,1	-0,04	0,8	0,2	-27,0	97,5	-0,11	2,3
10		0,08	-30,9	98,8	-0,05	1,1	0,23	-26,3	98,4	-0,07	1,4
	⊥	0,03	-35,6	99,2	-0,03	0,7	0,06	-32,4	98,8	-0,05	1,1
11		0,003	-45,7	96,8	-0,14	3,2	0,008	-40,8	95,4	-0,20	4,6
	⊥	0,001	-49,9	96,6	-0,15	3,4	0,002	-47,2	93,4	-0,30	6,6
12		0,007	-41,6	97,1	-0,13	2,9	0,009	-40,4	91,0	-0,41	8,9
	⊥	0,002	-47,0	97,3	-0,12	2,7	0,002	-47,0	93,1	-0,31	6,9
13		0,002	-46,8	95,1	-0,22	4,9	0,001	-52,3	92,4	-0,34	7,6
	⊥	0,007	-41,3	94,3	-0,26	5,7	0,01	-40,2	93,9	-0,28	6,1

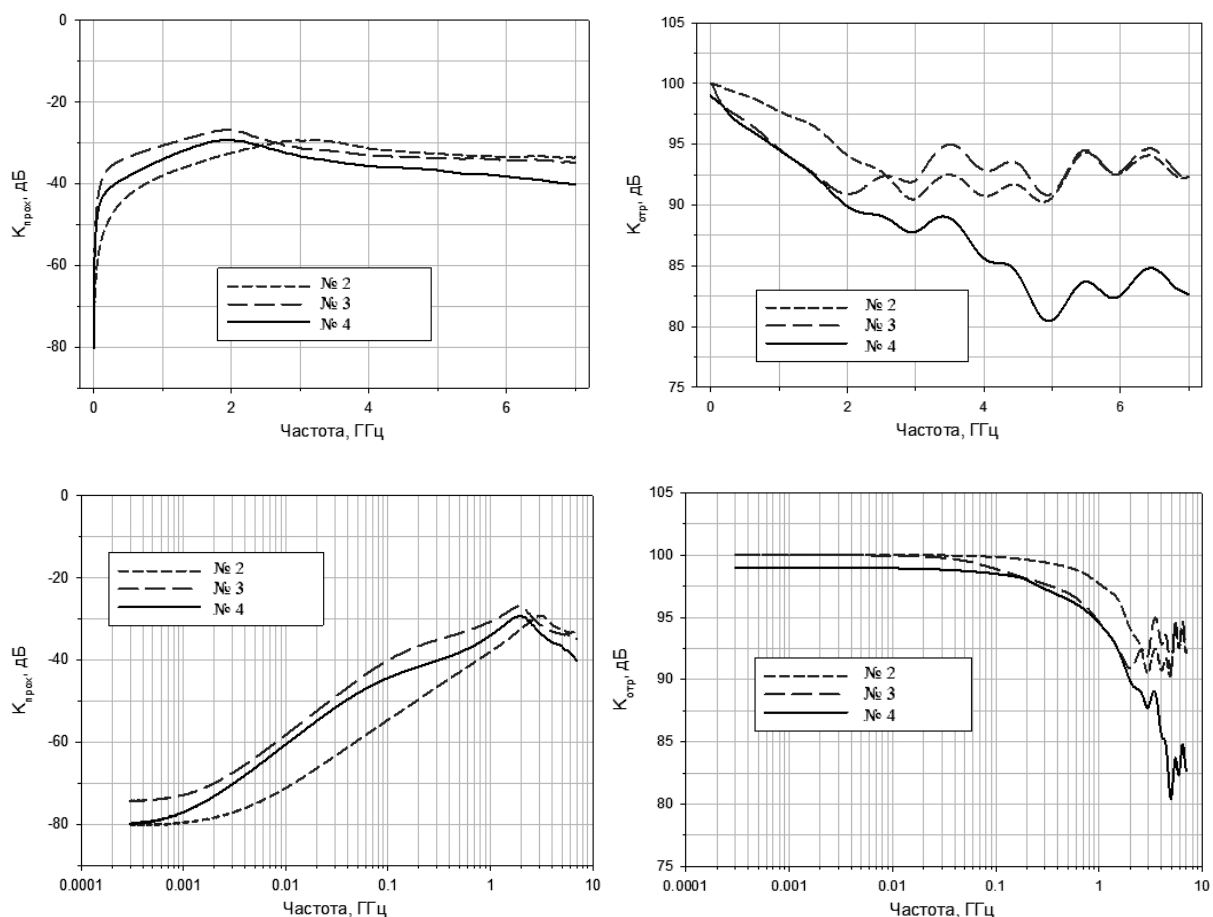


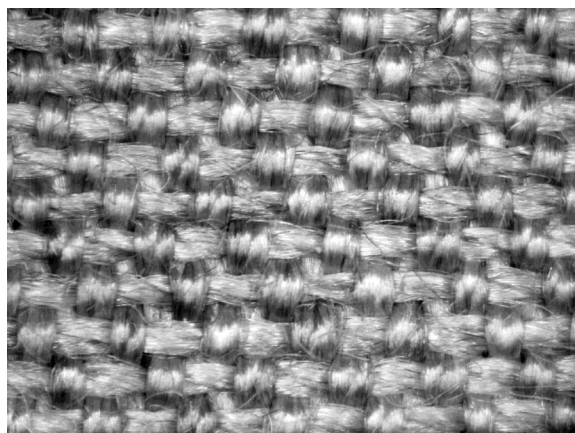
Рисунок 6 – Примеры частотных зависимостей коэффициента прохождения (слева) и отражения (справа) ЭМИ для образцов тканей № 2, 3, 4 в линейном (вверху) и логарифмическом (внизу) масштабе

и размером стороны ячейки, необходимым для отражения волны;

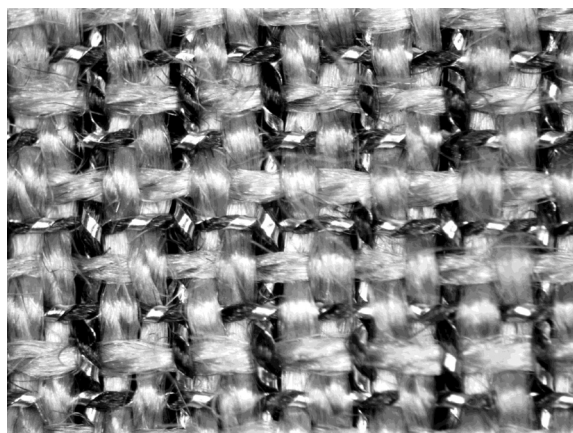
– установлено, что для эффективного экранирования в структуре ткани могут быть использованы смесовые пряжи с различным процентом вложения стальных волокон и комбинированные (мишурные) электропроводящие нити, которые должны содержать в качестве оплетки металлическую проволоку с малым сопротивле-

нием (медь и ее сплавы, сталь);

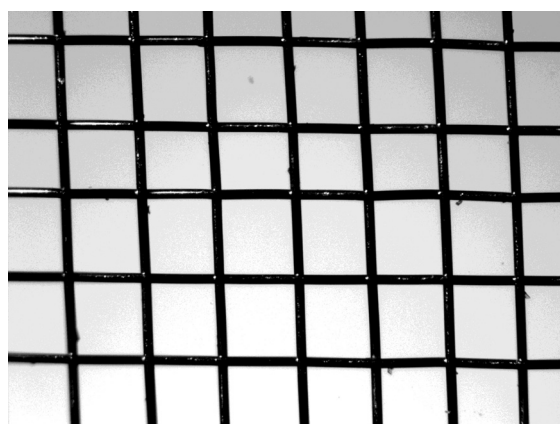
– установлено, что разработанные ткани с поверхностной плотностью от 55 до 220 г/м^2 являются эффективным средством защиты от электромагнитного излучения радиочастотного диапазона (от 300 кГц до 16 ГГц), так как имеют коэффициент прохождения равный или менее -30 дБ .



а



б



в



г

Рисунок 7 – Примеры фотографий экранирующих тканей: а) образец 1; б) образец 2; в) образец 8; г) образец 10

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Rybicki, T., Brzezinski, S., Lao, M., Krawczynska, I. (2013), Modeling Protective Properties of Textile Shielding Grids Against Electromagnetic Radiation, *FIBRES & TEXTILES in Eastern Europe*, 2013, № 1 (97), pp. 78–82.
2. Brzezinski, T., Rybicki, T., Malinowska, G., Karbownik, I., Rybicki, E., Lech Szugajew, L. (2009), Effectiveness of Shielding Electromagnetic Radiation, and Assumptions for Designing the

REFERENCES

1. Rybicki, T., Brzezinski, S., Lao, M., Krawczynska, I. (2013), Modeling Protective Properties of Textile Shielding Grids Against Electromagnetic Radiation, *FIBRES & TEXTILES in Eastern Europe*, 2013, № 1 (97), pp. 78–82.
2. Brzezinski, T., Rybicki, T., Malinowska, G., Karbownik, I., Rybicki, E., Lech Szugajew, L. (2009), Effectiveness of Shielding Electromagnetic Radiation, and Assumptions for Designing the

Multi-layer Structures of Textile Shielding Materials, *FIBRES & TEXTILES in Eastern Europe*, 2009, № 1 (72), pp. 60–65.

3. Сафонов, П. Е., Левакова, Н. М., Юхин, С. С. (2020), Проектирование структуры и выбор сырьевого состава экранирующей ткани для спецодежды, *Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности*, 2020, № 1 (385), С. 150–155.
4. Беляев, О. Ф., Заваруев, В. А. (2014), Выбор материала микропроволоки для вязания отражающей поверхности крупногабаритных трансформируемых антенн. Дизайн, технологии и инновации в текстильной и легкой промышленности (ИННОВАЦИИ-2014), *Сборник материалов Международной научно-технической конференции. Часть 1*, Москва, 2014, С. 56–58.

Multi-layer Structures of Textile Shielding Materials, *FIBRES & TEXTILES in Eastern Europe*, 2009, № 1 (72), pp. 60–65.

3. Safonov, P. E., Levakova, N. M., Yukhin, S. S. (2020), Design of the structure and selection of the raw material composition of the shielding fabric for workwear [Proektirovanie struktury i vybor syr'evogo sostava jekranirujushhej tkani dlja specodezhdy], *Proceedings of higher educational institutions. Textile industry technology*, 2020, № 1 (385), pp. 150–155.
4. Belyaev, O. F., Zavaruyev, V. A. (2014), The choice of microwire material for knitting the reflective surface of large-sized transformable antennas [Vybor materiala mikroprovoloiki dlja vjazaniya otrazhajushhej poverhnosti krupnogabaritnyh transformiruemyh antenn], Design, technologies and innovations in the textile and light industry (INNOVATIONS-2014), *Proceedings of the International Scientific and Technical Conference. Part 1*, Moscow, 2014, pp. 56–58.

Статья поступила в редакцию 11. 12. 2022 г.