

**ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ОТРАЖАЮЩИЕ СВОЙСТВА
ПОЛИАМИДНОГО ПОЛОТНА С СЕРЕБРЯНЫМ НАПЫЛЕНИЕМ**

**ELECTROMAGNETIC REFLECTING PROPERTIES
OF SILVER-COATED POLYAMIDE CANVAS**

А.Г. БУЛГАКОВ¹, В.Т. ЕРОФЕЕВ², П.В. МАЛЬЦЕВ³

A.G. BULGAKOV¹, V.T. EROFEEV², P.V. MALTSEV³

¹Центральный научно-исследовательский и проектный институт Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации,

²Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет,

³Юго-Западный государственный университет)

(¹Central Research and Development Institute of the Ministry of Construction of Russian Federation,

²National Research Moscow State University of Civil Engineering,

³Southwest State University)

E-mail: agi.bulgakov@mail.ru

В данной статье исследуется полиамидный материал с низкой поверхностной плотностью на предмет его возможной защиты от электромагнитного излучения (ЭМИ). Данный материал подходит для композиционных структур одежды, а также для технического применения. Эффективность экранирования электромагнитного излучения полотна, связанного из полиамидных нитей, покрытых серебром, измеренная в диапазоне частот от 0,9 до 2,4 ГГц, свидетельствует о высокой степени защиты. Проведена оценка стабильности свойств защиты от ЭМ-излучения после применения неполярных и полярных растворителей в синергии с параметрами циклического процесса влажной и сухой чистки. Результаты исследования подтвердили снижение эффективности защиты после последовательных циклов обработки материала сухой и влажной чисткой. Эффект влажной чистки по отношению к сухой более выражен, что связано с повреждением серебряного покрытия на полиамидных нитях трикотажного полотна.

The article is devoted to the study of a polyamide material with low surface density for its possible protection against electromagnetic radiation (EMR). This material is suitable for composite structures of clothing, as well as for technical applications. The shielding efficiency of electromagnetic radiation of a fabric knitted from polyamide threads coated with silver indicates a high degree of protection. An important key point of the work is the assessment of the consistency of protective properties against EM radiation after the use of non-polar and polar solvents in synergy with the parameters of the cyclic process of wet and dry cleaning. The results of the study confirmed a decrease in the effectiveness of protection after successive cycles of processing the material by dry and wet cleaning. The effect of wet cleaning in relation to dry cleaning is more pronounced, which is associated with damage to the silver coating on the polyamide threads of the knitted fabric.

Ключевые слова: отражающие способности, напыление серебра, электромагнитное излучение, полиамидное полотно, эффективность экранирования, влажная уборка, сухая уборка.

Keywords: reflectivity, silver plating, electromagnetic radiation, polyamide fabric, shielding efficiency, wet cleaning, dry cleaning.

Введение

Повышенная осведомленность об электромагнитном излучении привела к введению во всем мире новых правил для производителей электрических и электронных устройств, которые теперь должны соответствовать требованиям электромагнитной совместимости. Необходимость установления пределов электромагнитного излучения электрических и электротехнических устройств (мобильных телефонов, микроволновых печей, сигналов «радиолокационной» связи, радиопередатчиков и т.п.), излучающих ЭМ энергию в различных диапазонах частот, направлена на минимизацию возможности возникновения помех радиосвязи и проводной связи. Срок службы и эффективность электронных устройств можно увеличить за счет их защиты от электромагнитных помех [1].

На рис. 1 схематически показано распространение сигнала через слой материала со свойствами защиты от ЭМИ. Когда ЭМ-лучи проходят через среду или материал, они взаимодействуют с молекулами материала. Это явление взаимодействия можно разделить на три фазы:

- поглощение;
- отражение;
- вторичное отражение.

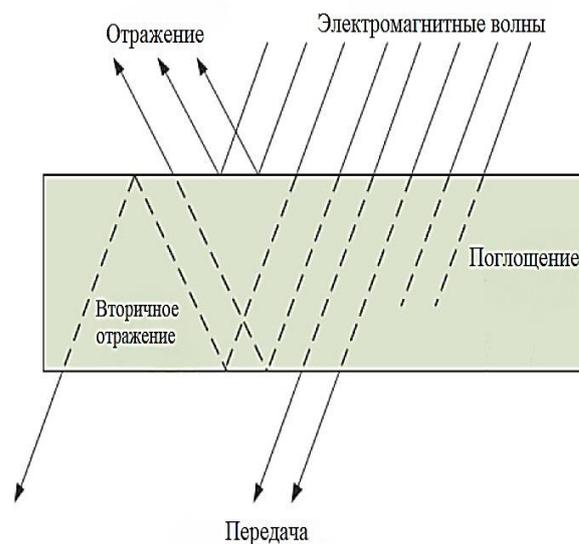


Рис. 1

Когда ЭМ-лучи [2] попадают на поверхность материала, они вызывают колебание заряда в материале. Это вынужденное колебание заряда действует как антенна и приводит к отражению, тогда как другая часть за счет колебаний преобразуется в тепловую энергию. Этот вид потери сигнала известен как затухание из-за поглощения. Таким образом, защитное свойство материала против ЭМИ основано на отражении от проводящей поверхности и поглощении в проводящем объеме. Часть

волны отражается, а остальная часть передается и ослабевает при прохождении через среду.

Совокупное влияние потерь на отражение и поглощение определяет эффективность защитных свойств материала в зависимости от его электрических и магнитных свойств, свойств поверхностной и внутренней проводимости, толщины материала, состава материала, истираемости и степени обработки [3].

Отношение уровня электрического поля на определенном расстоянии от источника без защиты (экрана) к уровню электрического поля с защитой определяется как эффективность экранирования (SE) [4]. Эффективность экранирования проводящего барьера SE в дБ представляет собой сумму потерь отражения (R), потерь поглощения (A) и потерь вторичного отражения (Rr) и рассчитывается по уравнению:

$$SE = R + A + R_r. \quad (1)$$

С целью защиты от ЭМИ в электротехнической и электронной промышленности вместо проводящих металлов или проводящих сетчатых материалов производятся и разрабатываются проводящие, легкие и гибкие структуры полотна. Снижение передачи электромагнитного излучения текстильными материалами может быть достигнуто различными способами, например, путем изменения состава, структуры или конструкции; путем включения проводящих частиц в волокна или металлических нитей и фольги в пряжи; использованием металлических покрытий, морфологии или проводящих красок, пигментов и лаков.

Проведены многочисленные исследования таких изделий, в которых имели место различные варианты конструкции и отделки. Результаты измерения показателей, определяющих свойства защиты материалов от ЭМИ, зависят не только от свойств материала, но и от размера выборки, установки измерения и источника ЭМИ. Поскольку материалы подвергаются различным циклическим механическим нагруз-

кам, а также химическим и атмосферным воздействиям, важно контролировать долговечность защитных свойств в контролируемых условиях.

Функциональный материал анализировали до и после циклической обработки в неполярных и полярных растворителях с параметрами процесса влажной и сухой чистки. Влияние растворителей и параметров процесса на изменения на поверхности материала анализировали методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), а защитные свойства ЭМИ контролировали путем тестирования свойств экранирования на частотах 0,9 ГГц, 1,8 ГГц, 2,1 ГГц и 2,4 ГГц.

Материалы и методы

Производителем полиамидного полотна выступает один из ведущих российских производителей полиамидных нитей и волокон – ООО «Курскхимволокно». Напыление серебра производилось компанией ООО «Хром-Пром». При напылении серебра использовался метод магнетронного распыления, который позволяет получать покрытие на рулонных материалах толщиной от 10 до 200 нанометров. При этом частицы серебра «внедряются» в волокна ткани, не меняя физических свойств материала. Благодаря разработанному протяжному механизму рулонов, установленному в вакуумной камере, существует возможность получать сравнительные объемы по площади напыления серебра.

Способ напыления серебра в глубоком вакууме уникален тем, что происходит распыление чистого серебра без каких-либо примесей. На материал наносятся именно частицы серебра, а не коллоидные соединения крахмалистого серебра. Нанесенное магнетронным методом серебро обладает всеми свойствами полноценных частиц. Толщина покрытия полотна составила в среднем 12 нанометров.

Характеристики экранирующего электропроводящего полотна из полиамидной (ПА) нити, покрытой серебром (Ag), представлены в табл. 1 [5].

Таблица 1

Состав ПА/Ag, %	80/20
Масса единицы площади, г/м ²	35,8
Плотность (петельные ряды/петельные столбики), петель/100 мм	150/125

Это функциональное полиамидное полотно можно использовать в качестве функциональной подкладки в одежде или для изготовления детской одежды ввиду его мягкости на ощупь и наличия антимикробных свойств, которые стали возможными благодаря серебру [6]. Флизелин со свойствами защиты от ЭМ-излучения помещается между основным материалом и подкладкой, образуя таким образом часть композиционной структуры одежды. Одежда подвергается различным механическим и физико-химическим воздействиям, что обуславливает необходимость объективной оценки защитных свойств ее материалов или композиционных конструкций до и после воздействия различных частот. Это важный фактор для оценки срока службы одежды с защитой от ЭМИ.

Функциональный материал (ПА/Ag) подвергался циклической обработке полярным растворителем (водой) при влажной чистке и неполярным растворителем (перхлорэтиленом) при сухой чистке. Эти физико-химические процессы осуществлялись за счет синергии растворителей и параметров процесса круга Синнера: химии, механического перемешивания, температуры и времени [7]. Влажная чистка (W) – экологически чистый и малоизученный процесс для текстиля SE, который проводится в воде низкой температуры с значительным механическим перемешиванием с применением специальных гипоаллергенных моющих средств и защитных добавок, уменьшающих набухание волокон в воде. Сухая очистка (P) – это традиционный процесс с отличными очищающими свойствами, который является надежной основой для сохранения исходных свойств материала в перхлорэтилене. Трикотажное полотно ПА/Ag размерами 1 м × 1 м обрабатывали перхлорэтиленом 10 раз по норме EN ISO 3175-2, а обработ-

ку водой проводили по норме EN ISO 3175-3 [8].

Сканирующая электронная микроскопия (СЭМ)

Поверхность полотна ПА/Ag анализировали до и после циклической обработки неполярным растворителем при сухой чистке (P) и полярным растворителем при влажной чистке (W) по параметрам круга Синнера; образцы наблюдались после 1-го, 3-го, 5-го, 7-го и 10-го цикла. Несмотря на содержание серебра в полотне ПА/Ag [9], все образцы были покрыты золотом и палладием в течение 90 с с использованием напылительного устройства Emitech Mini SC7620 (Quorum Technologies). Наблюдение поверхности образцов проводили с помощью детектора SE сканирующего электронного микроскопа FE-SEM, MIRA3LMU при увеличении 500×.

Изменение эффективности экранирования (SE) от микроволнового излучения

Защитные свойства испытуемых образцов исследовались при следующих условиях работы:

- температура 23 ± 1 °С,
- относительная влажность $50 \pm 10\%$.

Согласно рекомендациям IEEE-STD 299-97, MIL STD 285 и ASTM D4935-89 была спроектирована и установлена измерительная установка (рис. 3), состоящая:

- из измерительного прибора NARDA SRM 3000 [10],
- генератора сигналов HP 8350 B,
- рупорной антенны IEV: Industrija za elektrozveze (Телекоммуникационная индустрия), Любляна, тип A12 [11],
- деревянной рамы, в которую помещался образец материала ПА/Ag размером 1 м × 1 м.

На рис. 2 показана схема измерения для испытания характеристик экрана. Генератор сигналов управлялся компьютером и обеспечивал частоты 0,9 ГГц, 1,8 ГГц, 2,1 ГГц и 2,4 ГГц. Генератор подключался к рупорно-воронковой антенне коаксиальным кабелем (для диапазона 900 МГц используется дипольная антенна). Деревянный щит располагался на расстоянии 30 см от антенны и измерительного прибора – анали-

затора спектра с широкополосной антенной.

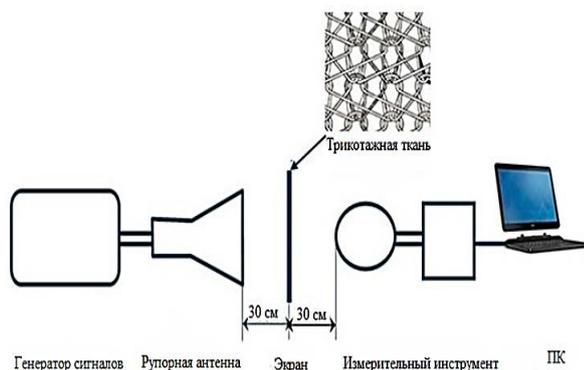


Рис. 2

Коэффициент ЭМ защиты определялся как отношение интенсивности ЭМ поля (E_0), измеренной без полотна, к напряженности ЭМ поля (E_1) с материалом, помещенным между источником излучения и измерительным устройством.

Эффективность экранирования SE (дБ) рассчитывали по следующим уравнениям:

$$SE = 20 \log \frac{E_0 E_0}{E_1 E_1}, \quad (2)$$

$$dSE = SE_0 - SE_p, \quad (3)$$

$$dSE = SE_0 - SE_w. \quad (4)$$

Результаты и обсуждение

Циклическое воздействие растворителей на материал ПА/Ag в сочетании с параметрами процесса привело к изменению толщины материала, испытанного согласно EN ISO 5084:2003, как показано в табл. 2 (толщина ткани P_a/A_g до и после 10 циклов сухой (P) и влажной (W) чистки).

Таблица 2

Ткань P_a/A_g	Толщина, мм
Необработанная	0,150
После 10 циклов обработки с P	0,162
После 10 циклов обработки с W	0,165

Благодаря наличию амидных связей в макромолекулах волокна ПА могут образовывать водородные связи, следовательно, они обладают лучшей способностью по сравнению с некоторыми гидрофобными полимерами поглощать влагу в присутствии полярного растворителя, например,

воды (W). Однако результаты в таблице указывают на незначительное увеличение толщины материала при влажной (W) и сухой (P) чистке по сравнению с необработанным полотном.

Выраженная в процентах изменчивость толщины полотна после 10 циклов сухой чистки в 0,5 раза превышает изменчивость толщины полотна после влажной чистки. Незначительную усадку полотна SE в процессе сухой чистки можно объяснить наличием небольшого количества воды в системе и последующей сушкой [12].

На фотографии поверхности проводящего необработанного образца ПА/Ag (рис. 4) видно равномерное покрытие серебра на полиамидной нити. Синергетическое влияние растворителя и других веществ процесса определено исследованием поверхности материала ПА/Ag с помощью сканирующего электронного микроскопа до и после 1-го, 3-го, 5-го, 7-го и 10-го циклов обработки при увеличении $500\times$ (рис. 3 и 4).

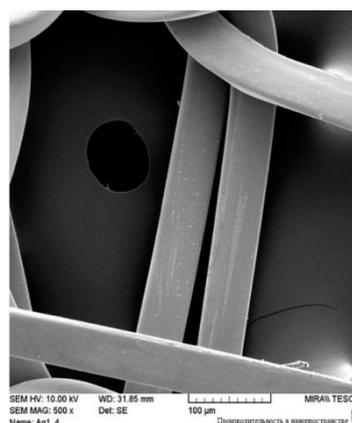


Рис. 3

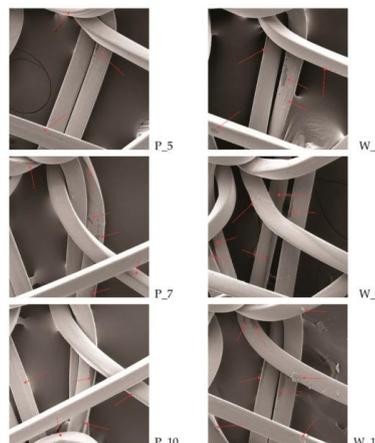


Рис. 4

Влияние неполярного растворителя (P) в синергии с параметрами процесса химической чистки можно было увидеть после пяти циклов. С увеличением числа циклов на трикотажном полотне отмечалось большее продольное повреждение серебряного покрытия на нитях, которое усиливалось в 10-м цикле. Неправильная форма повреждения и появление разрывов на серебряном покрытии свидетельствуют о более интенсивном влиянии механики как технологического фактора, приведшего к разрушению материала. Такие локальные повреждения исключают влияние растворителей, которые действовали бы более равномерно по всей поверхности.

Изменения поверхности полотна ПА/Ag под воздействием полярного растворителя (W) и параметров процесса влажной очистки были заметны после 3-го цикла. Динамика изменений была более интенсивной по сравнению с сухой чисткой (P). Кроме того, после 10 циклов влажной очистки (W_10) на поверхности образца можно было увидеть неравномерные налеты, что указывает на взаимодействие некоторых веществ в процессе. Изображения СЭМ показывают, что полярный растворитель в сочетании с параметрами процесса влажной чистки вызвал более высокую степень продольного и неравномерного локального повреждения полотна ПА/Ag по сравнению с неполярным растворителем и параметрами процесса сухой чистки [13].

При завершении 25 циклов стирки полотна с серебряным покрытием толщина покрытия практически не изменилась.

Полиамид, как чистый полимер, проявляет непроводящие свойства, а покрытие Ag повышает электропроводность материала и его экранирующую эффективность.

Эффективность экранирования (SE) лицевой и обратной стороны полотна ПА/Ag до обработки растворителем при параметрах процесса на частотах 0,9 ГГц, 1,8 ГГц, 2,1 ГГц и 2,4 ГГц показана на рис. 5.

Защитные свойства лицевой и обратной стороны необработанных образцов ПА/Ag на всех частотах практически идентичны,

как показано на рис. 6. Наибольшая степень защиты получена на частоте 2,4 ГГц (24,1 дБ), а наименьшая степень защиты достигнута на частоте 0,9 ГГц (SE = 14,8 дБ). Несмотря на разницу почти в 10 единиц, достигнутая степень защиты >10 дБ представляет собой приемлемую степень защиты.

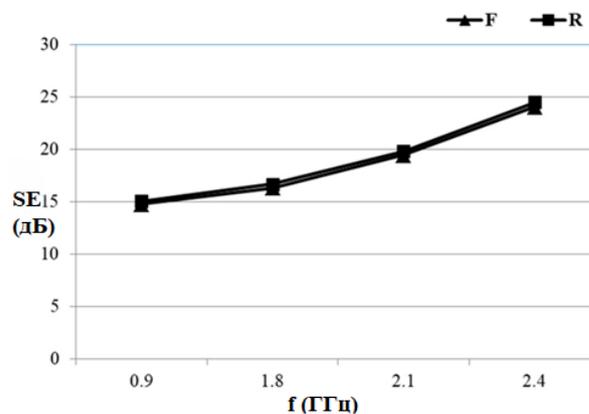


Рис. 5

Первый цикл обработки полотна ПА/Ag с сухой (P) и влажной (W) чисткой снизил степень защиты на частоте 0,9 ГГц. Влажная чистка (W) оказала более сильное влияние по сравнению с сухой чисткой (P), при этом наибольшая разница свойств SE подтвердилась после трех циклов. Практически линейное и параллельное снижение свойств SE продолжалось после 5-го, 7-го и 10-го циклов (рис. 6) [14].

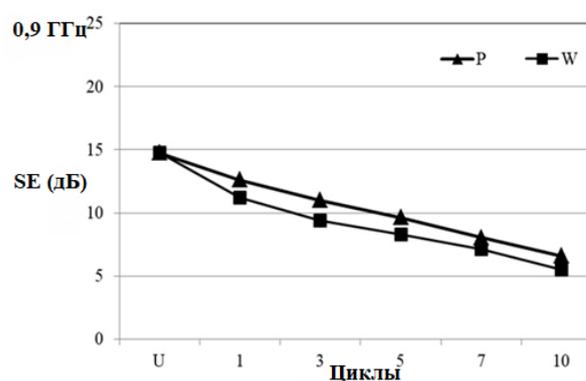


Рис. 6

Первый цикл обработки полотна ПА/Ag растворителями для сухой (P) и влажной (W) чистки в синергии с технологическими параметрами снизил степень защиты на

частоте 1,8 ГГц. Влажная чистка имела более сильное влияние по сравнению с сухой чисткой; наибольшая разница свойств SE обнаружена после 7-го цикла (рис. 7) [15].

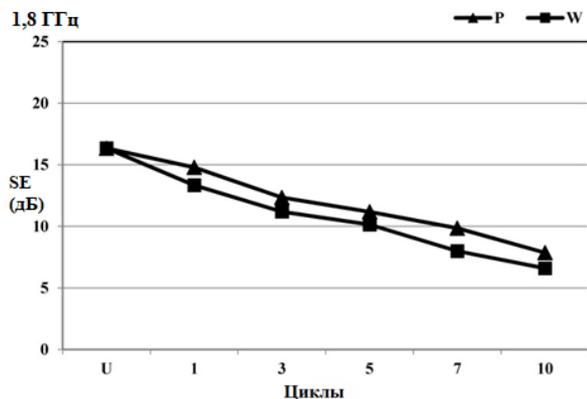


Рис. 7

Первый цикл сухой и влажной чистки полотна ПА/Ag снизил степень защиты на частоте 2,1 ГГц. Влажная чистка оказала более сильное влияние по сравнению с сухой чисткой. Наибольшая разница свойств SE обнаружена после 1-го цикла, а почти линейное и параллельное снижение свойств SE продолжалось после 3-го, 5-го, 7-го и 10-го циклов (рис. 8).

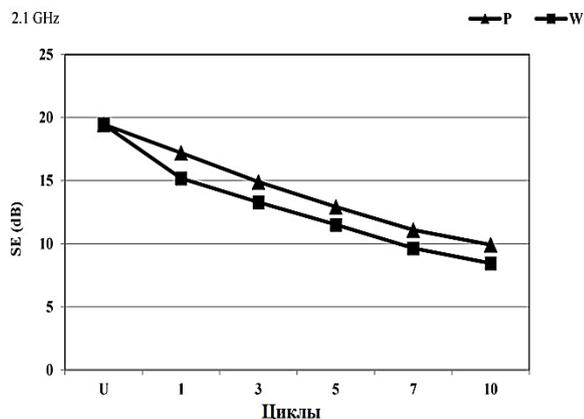


Рис. 8

Текстильные материалы, характеризующиеся эффективностью экранирования (SE) >20 дБ, пригодны для промышленного применения, что означает, что необработанное полотно ПА/Ag обладает соответствующей SE на частоте 2,4 ГГц [16]. Рис. 9 свидетельствует о лучшей сохранности SE при сухой чистке, чем при влаж-

ной. Численные различия в значениях SE полотна ПА/Ag после повторных циклов сухой чистки по сравнению с исходным показаны в табл. 3.

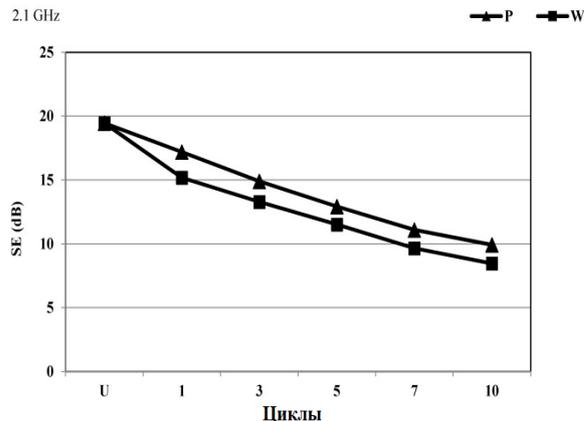


Рис. 9

Таблица 3

f (ГГц)	dSE (дБ) после P циклов сухой чистки				
	P1	P3	P5	P7	P10
0,9	2,2	3,8	5,2	6,7	8,2
1,8	1,5	4,0	5,2	6,5	8,5
2,1	2,3	4,6	6,5	8,4	9,5
2,4	2,2	4,3	6,5	8,0	11,9

Отличия SE обработанного полотна ПА/Ag, обусловленные физико-химическим влиянием влажной чистки, по сравнению с необработанными полотнами показаны в табл. 4 [17].

Таблица 4

f (ГГц)	dSE (дБ) после W циклов влажной чистки				
	W1	W3	W5	W7	W10
0,9	3,6	1,8	6,4	7,6	9,3
1,8	4,3	6,2	7,9	9,8	10,9
2,1	4,3	6,2	7,9	9,8	10,9
2,4	4,5	9,5	11,9	13,8	14,3

На основании полученных различий эффективности (dSE) на всех частотах можно отчетливо заметить более прогрессивное влияние влажной чистки на снижение значения SE по сравнению с сухой чисткой. Наибольшие различия в эффективности обнаружены на частоте 2,4 ГГц. Влияние параметров процесса влажной и сухой чистки на dSE хорошо коррелирует с данными наблюдения за поверхностью на изображениях СЭМ.

Первоначальное повреждение поверхности полотен ПА/Ag наблюдается после 5-й сухой чистки. Полученные значения dSE полотна ПА/Ag после пяти циклов сухой чистки на всех частотах практически одинаковы. Различия в dSE между нижними и верхними частотами заметны после 7-го и 10-го циклов сухой чистки [18].

Последующие циклы влажной чистки приводят к большим различиям dSE на всех частотах по сравнению с 1-м циклом. Начальное повреждение поверхности слоя Ag на полотне ПА, наблюдаемое после 3-го цикла влажной очистки, привело к существенному снижению значения dSE, особенно на частоте 2,4 ГГц.

Подтверждено, что на снижение значений SE влияет повреждение поверхностного слоя полотна в процессе влажной чистки [19].

ВЫВОДЫ

Полиамидное полотно из посеребренной нити обладает оптимальной эффективностью электромагнитного экранирования в диапазоне частот от 0,8 ГГц до 2,4 ГГц. Защитный фактор, минимальный вес и толщина являются перспективными характеристиками для швейного, интерьерного и технического применения. Исходные свойства эффективного экранирования (SE) менялись при повторных циклах сухой и влажной чистки. Увеличение количества циклов влажной и сухой чистки привело к линейному падению значений SE на частотах 0,9 ГГц, 1,8 ГГц, 2,1 ГГц и 2,4 ГГц [25]. Изображения СЭМ показали повреждение серебряного покрытия на полиамидной нити. Деградация была более заметна после влажной чистки, чем после сухой.

ЛИТЕРАТУРА

1. Zoriy P., Dederichs H., Pillath J., Heuel-Fabianek B., Hill P., Lennartz R. Long-Term Measurements of the Radiation Exposure of the Inhabitants of Radioactively Contaminated Regions of Belarus – The Korma Report II (1998-2019). Verlag Forschungszentrum Jülich, 2016. – ISBN 978-3-95806-181-1.
2. Родионов В.Г. Проблемы традиционной энергетики // Энергетика: проблемы настоящего и

возможности будущего. М.: ЭНАС, 2017. С. 22. – ISBN 978-5-4248-0002-3.

3. Арутюнян Р.В., Большой Л.А., Боровой А.А., Велихов Е.П. Системный анализ причин и последствий аварии на АЭС «Фукусима-1». М.: ИБРАЭ РАН, 2018. 408 с. – ISBN 978-5-9907220-5-7.

4. Bates R.L. Geology of non-metallic minerals. 2021. 548 p. – ISBN 978-5-458-48180-9.

5. Karipidis K., Mate R., Urban D. et al. 5G mobile networks and health—a state-of-the-science review of the research into low-level RF fields above 6 GHz // Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology. 2021. 16 March. – doi:10.1038/s41370-021-00297-6. – PMID 33727687.

6. Bakshi K.A., Bakshi A.V., Bakshi U.A. Electronic Measurement Systems. – US: Technical Publications, 2008. P. 4...14. – ISBN 978-81-8431-206-5.

7. Olifer V.G., Olifer N.A. Chapter 13 Switched Ethernet networks // Computer networks. Principles, technologies, protocols. 4th ed. St. Petersburg: Piter, 2020. S. 438. – ISBN 978-5-49807-389-7.

8. McLaren P.G. Elementary Electric Power and Machines, Ellis Horwood. 1984. P. 182...183. – ISBN 0-85312-269-5.

9. Wood A., Mate R., Karipidis K. Meta-analysis of in vitro and in vivo studies of the biological effects of low-level millimetre waves // Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology. 2021. 16 March. P. 1...8. – doi:10.1038/s41370-021-00307-7. – PMID 33727686. – PMC 7962924.

10. Cachada, A., Rocha-Santos T., Duarte A.C. Chapter 1: Soil and Pollution: An Introduction to the Main Issues". Soil Pollution: From Monitoring to Remediation. Academic Press. 2018. P. 1...28.

11. Астафьев В.Н., Гогенко С.А. Уровни электромагнитного излучения мобильных телефонов и других портативных передающих устройств // Актуальные проблемы транспортной медицины. 2014. №1 (35). С. 46...57.

12. Yang, D., Cai, J., Hull V., Wang, K., Tsang Y.P., Liu J. New road for telecoupling global prosperity and ecological sustainability. Ecosyst. Health Sustain. 2016, 2, 01242.

13. Седых В.А., Савич В.И., Балабко П.Н. Почвенно-экологический мониторинг. М.: РГАУ-МСХА им. К. А. Тимирязева, 2013. 584 с. – ISBN 978-5-9238-0164-4.

14. Scigliuzzo M. et al. Phononic loss in superconducting resonators on piezoelectric substrates. New J. Phys. 22, 053027 (2020). – <https://doi.org/10.1088/1367-2630/ab8044>.

15. Ciardi G., Vannucchi G., Madiati C. Effects of Colloidal Silica Grouting on Geotechnical Properties of Liquefiable Soils: A Review // Geotechnics. 2021. № 1. P. 460...491. – DOI: 10.3390/geotechnics1020022

16. Аврамов Ю.С. Защита человека от электромагнитных воздействий. М.: МГИУ, 2012. 231 с.

17. Акбашев Б.Б. Экранирующие системы зданий и помещений. М.: МИЭМ, 2017. 110 с.

18. Шандала М.Г., Зуев В.Г., Ушаков И.Б. Справочник по электромагнитной безопасности работающих и населения. Воронеж: Истоки, 2014. 82 с.

19. Шапиро Д.Н. Электромагнитное экранирование. Долгопрудный: Издательский дом «Интеллект», 2018. 120 с.

20. Шапошникова Е.С., Минкина Н.А. Снижение уровней электромагнитных полей на территории жилой застройки // Экологические проблемы урбанизированных территорий. 2014. №1. С. 49.

REFERENCES

1. Zoriy P., Dederichs H., Pillath J., Heuel-Fabianek B., Hill P., Lennartz R. Long-Term Measurements of the Radiation Exposure of the Inhabitants of Radioactively Contaminated Regions of Belarus - The Korma Report II (1998—2019). Verlag Forschungszentrum Jülich, 2016. – ISBN 978-3-95806-181-1.

2. Rodionov V.G. Problems of traditional energy // Energy: problems of the present and opportunities for the future. M.: ENAS, 2017. P. 22. – ISBN 978-5-4248-0002-3.

3. Arutyunyan R.V., Bolshov L.A., Borovoy A.A., Velikhov E.P. System analysis of the causes and consequences of the accident at the Fukushima-1 nuclear power plant. M.: IBRAE RAS, 2018. 408 p. – ISBN 978-5-9907220-5-7.

4. Bates R.L. Geology of non-metallic minerals. 2021. 548 p. – ISBN 978-5-458-48180-9.

5. Karipidis K., Mate R., Urban D. et al. 5G mobile networks and health—a state-of-the-science review of the research into low-level RF fields above 6 GHz // Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology. 2021. 16 March. – doi:10.1038/s41370-021-00297-6. - PMID 33727687.

6. Bakshi K.A., Bakshi A.V., Bakshi U.A. Electronic Measurement Systems. – US: Technical Publications, 2008. P. 4-14. – ISBN 978-81-8431-206-5.

7. Olifer V.G., Olifer N.A. Chapter 13. Switched Ethernet networks // Computer networks. Principles, technologies, protocols. 4th ed. -St. Petersburg: Piter, 2020. S. 438. – ISBN 978-5-49807-389-7.

8. McLaren, Peter G. Elementary Electrical Power and Machines, Ellis Horwood. 1984. P. 182...183. – ISBN 0-85312-269-5.

9. Wood A. Mate R., Karipidis K. Meta-analysis of in vitro and in vivo studies of the biological effects of low-level millimeter waves // Journal of Exposure Sci-

ence and Environmental Epidemiology. 2021. 16 March. P. 1–8. – doi:10.1038/s41370-021-00307-7. – PMID 33727686. – PMC 7962924.

10. Cachada, A., Rocha-Santos T., Duarte A.C. Chapter 1: Soil and Pollution: An Introduction to the Main Issues. Soil Pollution: From Monitoring to Remediation. Academic Press. 2018. P. 1...28. – ISBN 9780128498729.

11. Astafiev V.N., Gogenko S.A. Levels of electromagnetic radiation from mobile phones and other portable transmitting devices // Current problems of transport medicine, 2014, No. 1 (35). P. 46...57.

12. Yang, D., Cai, J., Hull V., Wang, K., Tsang Y.P., Liu J. New road for telecoupling global prosperity and ecological sustainability. Ecosyst. Health Sustain. 2016, 2, e01242.

13. Sedykh V.A., Savich V.I., Balabko P.N. Soil-ecological monitoring / RGAU-MSHA im. K. A. Timiryazev. M.: RGAU-MSHA named after. K. A. Timiryazeva, 2013. 584 p. – ISBN 978-5-9238-0164-4.

14. Scigliuzzo M. et al. Phononic loss in superconducting resonators on piezoelectric substrates. New J. Phys. 22, 053027 (2020). – <https://doi.org/10.1088/1367-2630/ab8044>.

15. Ciardi G., Vannucchi G., Madiati C. Effects of Colloidal Silica Grouting on Geotechnical Properties of Liquefiable Soils: A Review // Geotechnics. 2021. No. 1. P. 460..4 91. – DOI: 10.3390/geotechnics1020022

16. Avramov Yu.S. Human protection from electromagnetic influences. M.: MGIU, 2012. 231 p.

17. Akbashev B.B. Shielding systems for buildings and premises. M.: MIEM, 2017. 110 p.

18. Shandala M.G., Zuev V.G., Ushakov I.B. Handbook on electromagnetic safety of workers and the population. Voronezh: Origins, 2014. 82 p.

19. Shapiro D.N. Electromagnetic shielding. Dolgoprudny: Publishing House "Intelligence", 2018. 120 p.

20. Shaposhnikova E.S., Minkina N.A. Reducing the levels of electromagnetic fields in residential areas // Environmental problems of urbanized territories. 2014. No. 1. P. 49.

Рекомендована кафедрой промышленного и гражданского строительства Юго-Западного государственного университета. Поступила 22.09.23.