

УДК 621.396.6

**ПОРИСТЫЕ ВОЛОКНИСТЫЕ МАТЕРИАЛЫ С ЖИДКОСТНЫМИ НАПОЛНИТЕЛЯМИ
ДЛЯ ЭКРАНИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

*Н.В. КОЛБУН, д-р техн. наук, проф. Л.М. ЛЫНЬКОВ, Т.В. БОРБОТЬКО, В.А. БОГУШ
(Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники)*

Представлена технология создания машинно-вязаных полотен повышенной плотности для применения в качестве основы электромагнитных экранов и поглотителей электромагнитного излучения. Рассмотрены строение волокнистых материалов и гидродисперсная структура, формируемая в них в результате пропитки. Приведены результаты измерений экранирующих характеристик гибких конструкций радиопоглотителей на основе машинно-вязаных полотен, пропитанных жидкостным наполнителем.

Введение. Работе электронных устройств сопутствует создаваемое ими электромагнитное излучение. Оно может использоваться для передачи и получения информации или представлять собой нежелательное побочное излучение, создающее каналы утечки информации и нарушающее электромагнитную совместимость радиоэлектронных средств. Электромагнитный фон, создаваемый антропогенными источниками электромагнитного излучения (ЭМИ), в несколько раз превышает уровень естественных источников ЭМИ (Земли, космических объектов и пр.).

Исследованиями [1] выявлена восприимчивость человеческого организма даже к самым слабым электрическим и магнитным полям, не говоря уже о более мощных излучениях, исходящих от мониторов компьютеров, телевизоров, мобильных радиотелефонов. Биологическое воздействие электромагнитного излучения на организм человека используется в медицинских целях при дозированном терапевтическом воздействии. Однако довольно сложно оценить общий уровень ЭМИ от окружающих антропогенных источников, постоянно воздействующих на человека. Техногенные излучения, проникая в биологический объект, воздействуют на организм на межклеточном уровне, вызывая в организме различные нарушения, и, как следствие, заболевания. Особенно чувствительна к воздействию вредных излучений центральная нервная система человека.

Актуальность разработки высокоэффективных, широкополосных экранирующих и радиопоглощающих материалов обуславливается не только проблемами биологического воздействия электромагнитных излучений (ЭМИ) [2], но и высокой потребностью в таких материалах при разработке и усовершенствовании конструкций изделий радиоэлектроники, устройств защиты информации и военной техники [3]. Перспективным для защиты человеческого организма от воздействия электромагнитного излучения является применение поглощающих материалов на основе машинно-вязаных полотен, благодаря их гибкости, небольшому весу и высокой технологичности.

Изготовление гибких конструкций поглотителей ЭМИ может осуществляться различными способами:

- введением в структуру машинно-вязаного полотна металлического микропровода;
- осаждением тонкопленочных металлических покрытий на развитую поверхность волокнистых материалов [4];
- пропиткой машинно-вязаных матриц жидкостными технологическими наполнителями [5].

Эффективность пропитки определяется такими важными технологическими параметрами, как пористость материала, размер и распределение пор в объеме полотна. Высокопористая структура полотен достигается увеличением их толщины и повышением плотности.

Выделяют различные способы увеличения толщины машинно-вязаных полотен:

- вязывание дополнительных нитей в структуру одинарного полотна;
- применение двойных переплетений;
- создание многослойных структур.

Одной из структур, обладающих повышенной толщиной, является двухслойное машинно-вязаное полотно. Лицевая и изнаночная стороны двухслойного полотна представляют собой самостоятельные полотна и соединены посредством элементов петельной структуры футерным либо прессовым методами.

Наиболее удовлетворяющими требованиям к сырью для изготовления машинно-вязаных подложек представляются полиэфирные волокна вследствие их высокой прочности и стойкости к истиранию, а также химической устойчивости и термостойкости. Для изготовления машинно-вязаного полотна повышенной плотности использовались полиэфирные текстурированные нити разной линейной плотности.

На основании анализа известных способов увеличения толщины трикотажа [6, 7] было предложено создать многослойный трикотаж, используя переплетение «производная гладь» для получения более плотного одинарного полотна. Поскольку вязывание дополнительных нитей позволяет увеличивать толщину и объемную наполненность машинно-вязаного полотна, то двухслойное машинно-вязаное полотно повышен-

ной толщины представляет собой два полотна производной глади, соединенных между собой четырьмя связующими нитями (рис. 1). Каждая связующая нить провязывается в одном одинарном полотне с петлями производной глади, в петлях второго одинарного полотна она образует наброски. Так как на каждую иглу прокладывается в одном петельном ряду в противофазах две связующие нити, то на игле образуются две петли и набросок. Полотно вяжется при ластичной расстановке игл, поэтому петельный столбик одного одинарного полотна сдвинут относительно другого одинарного полотна на половину игольного шага. Толщина лицевой или изнаночной стороны равняется толщине платированной петли и наброска. Протяжки связующих нитей, располагаясь в скрещивающихся плоскостях, заполняют пространство между одинарными полотнами и уменьшают просветы. Одинарные полотна связаны переплетением «производная гладь», петельные столбики которого сближены вплотную друг к другу, при этом промежутков между соседними петельными столбиками нет. Петли этого переплетения располагаются в шахматном порядке, и сзади каждой петли находится протяжка, поэтому растяжимость в ширину меньше, чем у глади. Протяжки также увеличивают толщину полотна. Петли производной глади являются грунтовыми, поэтому, оставляя неизменным их модуль, а следовательно, и поверхностное заполнение полотна можно увеличить зазор между игольницами, также повышая толщину. Наброски связующей нити не выходят на лицевую сторону одинарных полотен, что позволяет использовать нити, различные по виду и свойствам.

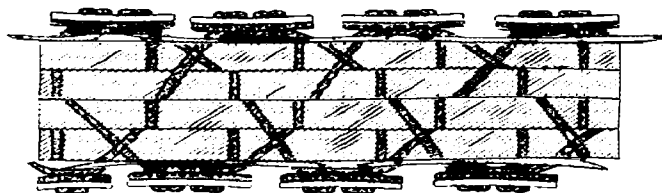


Рис. 1. Структура машинно-вязаного полотна повышенной плотности

Важными параметрами машинно-вязаной основы являются ее воздухопроницаемость (связанная с размером и распределением пор) и поверхностная плотность полотна. Регулирование плотности машинно-вязаного полотна осуществляется изменением суммарной линейной плотности нитей заправки. При этом увеличение линейной плотности уточных нитей оказывает меньшее влияние на увеличение поверхностной плотности, чем увеличение линейной плотности грунтовых нитей.

Гигроскопичность машинно-вязаных материалов в основном определяется гигроскопичностью составляющих их волокон, а привес влаги и капиллярность (максимальная высота поднятия жидкости в полоске полотна), т.е. характеристики влагопоглощения, зависят и от их структуры [8]. Традиционно пропитку проводят, погружая тело, выполненное из капиллярно-пористого материала в жидкость. Иногда это тело предварительно нагревают, вакуумируют. В ряде случаев процесс проводят при повышенном давлении. Это вызывает необходимость использования соответствующего оборудования для проведения процессов, например, автоклавов высокого давления. В [9] предложено использовать энергию ЭМИ СВЧ-диапазона для улучшения процесса пропитки.

Жидкость удерживается в капиллярно-пористом теле двумя способами: силовым полем на поверхности твердого тела в виде тонких молекулярных пленок, обволакивающих поверхности пор (так называемая связанная вода), и в виде капель – капиллярными силами, действующими на искривленных границах раздела между жидкостью и ее парами [10].

Отличие связанной воды от свободной объясняется перестройкой сетки межмолекулярных водородных связей в ее структуре под влиянием поля поверхностных сил. При размерах капилляров порядка единиц микрон меняется вязкость, растворяющая способность, плотность, температуропроводность, а также диэлектрическая проницаемость граничных слоев воды [11].

Разработанная технология создания машинно-вязаного полотна позволяет создать высокопористую структуру с капиллярами микронных размеров (рис. 2, а).

Заполнение жидкостью происходит вначале наиболее широких капилляров, из них жидкость проникает в межволоконные пространства, образуя локальные водосодержащие объемы (рис. 2, б).

Текстильное волокно состоит из большого числа макромолекул полимера, которые приблизительно ориентированы параллельно по длине в направлении оси волокна. Отдельные макромолекулы объединяются друг с другом под действием сил межмолекулярного притяжения в пучки макромолекул, называемые микрофибриллами. Микрофибриллы образуют между собой под действием тех же сил более крупные агрегаты макромолекул – фибриллы, из которых состоит волокно. Действие межмолекулярных сил и вытянутая форма макромолекул способствуют ориентации макромолекул, микрофибрилл и фибрилл в направлении оси волокна. Характерной особенностью микрофибрилл и фибрилл является то, что их длина значительно превышает поперечные размеры. Макромолекулы в микрофибриллах находятся

друг от друга на расстоянии меньше 1 нм. Расстояние между микрофибриллами и фибриллами больше. Фибриллярная структура приводит к образованию в волокнах микропор, заполненных воздухом, влагой и сопутствующими веществами. Химические волокна, в отличие от природных, имеют более простую структуру (отсутствие микрофибрилл, центрального канала и некоторых других особенностей) [12].

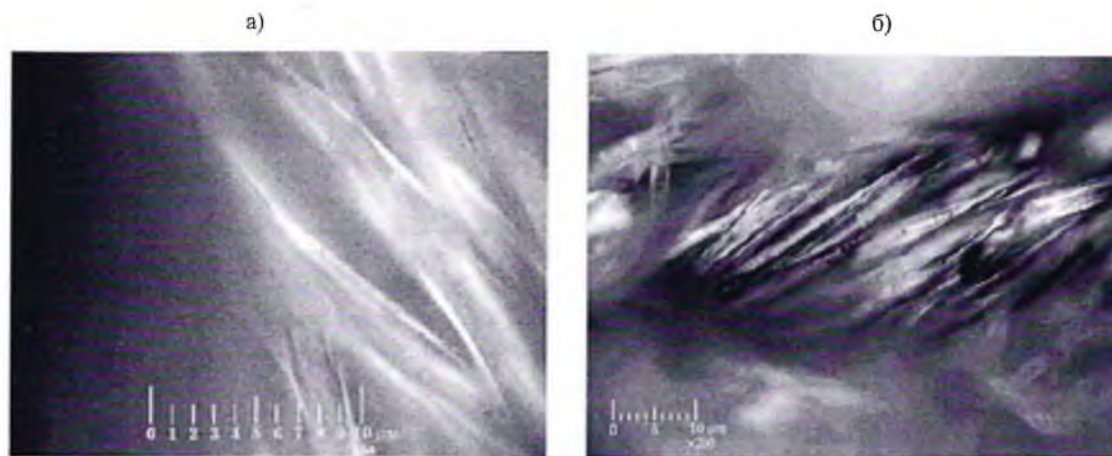


Рис. 2. Структура машинно-вязаного полотна:

а – волокнистая ($\times 500$)

б – локального растворного объема, сформированного в волокне ($\times 200$)

После соприкосновения пропитываемого материала с жидкостью и смачивания его поверхности в результате гидростатического давления и под действием капиллярных сил начинается проникновение пропиточного раствора в подложку. Фронт жидкости, продвигаясь вглубь материала, вытесняет содержащийся в нем воздух. Однако некоторая его часть обычно остается в глубине материала и препятствует полному заполнению капилляров жидкостью, образуя дополнительные границы раздела воздух – жидкость. В волокнистом материале остается воздуха тем больше, чем лучше материал смачивается жидкостью, поскольку при этом жидкость поднимается по стенкам капилляров в виде клиньев и при переменном размере капилляров может возникнуть «защемление» воздуха внутри них. Изменение влажности в пределах, соответствующих обычным изменениям относительной влажности воздуха, не оказывает заметного влияния на пропитывание [12]. При пропитывании водой природных волокон может произойти их набухание, что приведет к увеличению количества поглощенной материалом жидкости и изменению размеров пор. Продвижение жидкости внутрь капилляра происходит до тех пор, пока действие капиллярных сил не будет уравновешено гравитационными силами.

Вследствие действия сил поверхностного натяжения и на границе раздела воздух – жидкость формируется искривленная поверхность, радиус которой зависит от материала капилляра и свойств жидкости. Граница поверхности менисков имеет клиновидную форму (рис. 3).

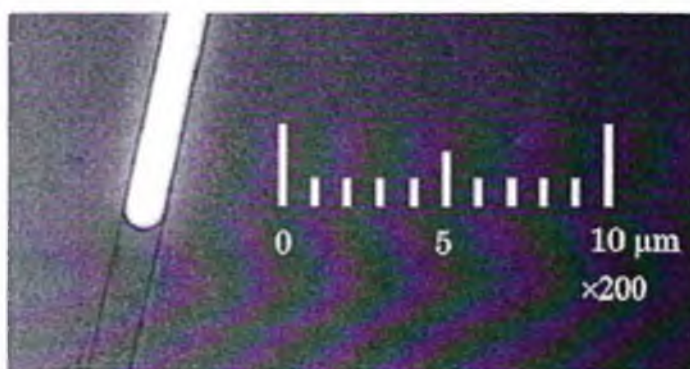


Рис. 3. Форма мениска жидкости в капилляре ($\times 200$)

Под действием силового поля на стенках капилляров образуются тонкие пленки воды толщиной от мономолекулярного слоя до нескольких молекул. Таким образом, можно говорить о существовании в капиллярно-пористой подложке слоев жидкости микро- и наноразмерной толщины. Образование границ раздела воздух – жидкость происходит в местах скопления воздуха, а также загрязнений волокон с меньшей смачиваемостью.

Формирование распределенной в пространстве гетерофазной структуры на основе жидкости в капиллярах пористого органического материала позволяет создавать электромагнитные экраны и поглотители электромагнитного излучения с повышенной эффективностью и расширенным диапазоном рабочих частот за счет высоких диэлектрических потерь жидкостного наполнителя и многократных переотражений ЭМИ от границ раздела воздух – жидкость. Процессы распространения электромагнитного излучения в таких сложных средах изучены недостаточно, и их теоретический анализ представляется довольно сложным. Целью работы является экспериментальное исследование взаимодействия ЭМИ с гидродисперсными средами различных составов, закрепленными в капиллярно-пористых материалах.

Для создания машинно-вязаного полотна повышенной плотности по описанной выше технологии использовались полиэфирные волокна с линейной плотностью 12,5 текс. Капиллярные пространства в структуре полотна образованы промежутками между нитями, обусловленными вязаной структурой полотна, межволоконными и межфибрилльными расстояниями. Сформированные полотна помещались в пропиточный раствор, закреплялись на подвеске для стекания лишнего количества жидкости и подвергались герметизации. В качестве жидкостных наполнителей использовались: № 1 – вода; № 2 – 10 %-ный раствор воды с солью NaCl; № 3 – раствор воды с глицерином 1:10; № 4 – органический наполнитель.

Экспериментальные исследования характеристик ослабления и отражения электромагнитного излучения образцов проводились в частотных диапазонах 8 – 12, 27 – 36 и 80 – 115 ГГц. Для измерения характеристик использовались панорамные измерители КСВН и ослабления Р2-61, Р2-65, Р2-124 в соответствующих частотных диапазонах и отрезки волноводных трактов. Измерения производились после предварительной калибровки оборудования, затем исследуемый образец помещался между двумя рупорными антеннами.

Измерения производились после предварительного определения влагосодержания образца с помощью прецизионных весов ВЛР-200 (таблица). Результаты представлены на рис. 4

Влагосодержание исследуемых образцов

Номер образца	№ 1	№ 2	№ 3	№4
Влагосодержание	0,72	0,72	0,57	0,7

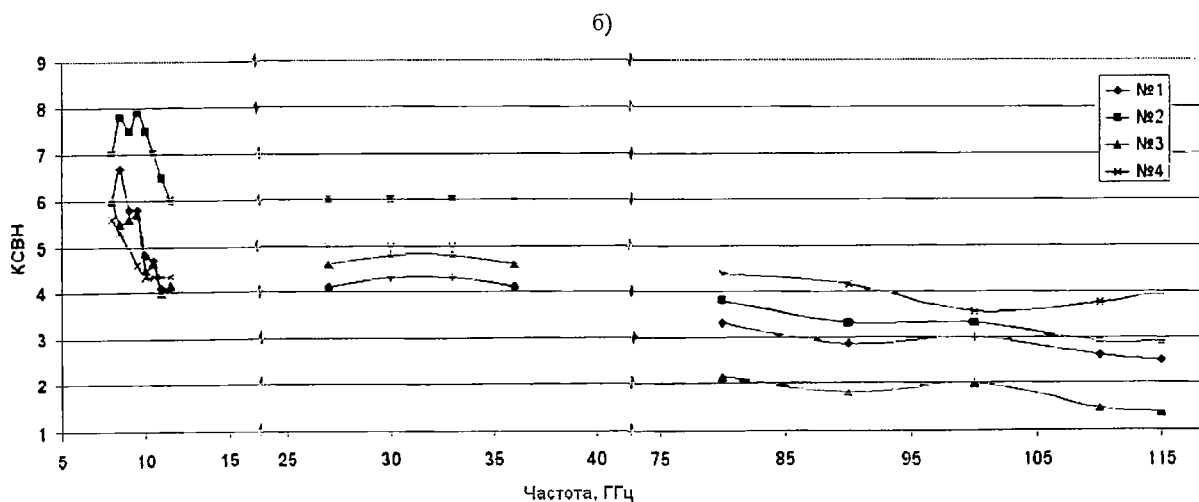
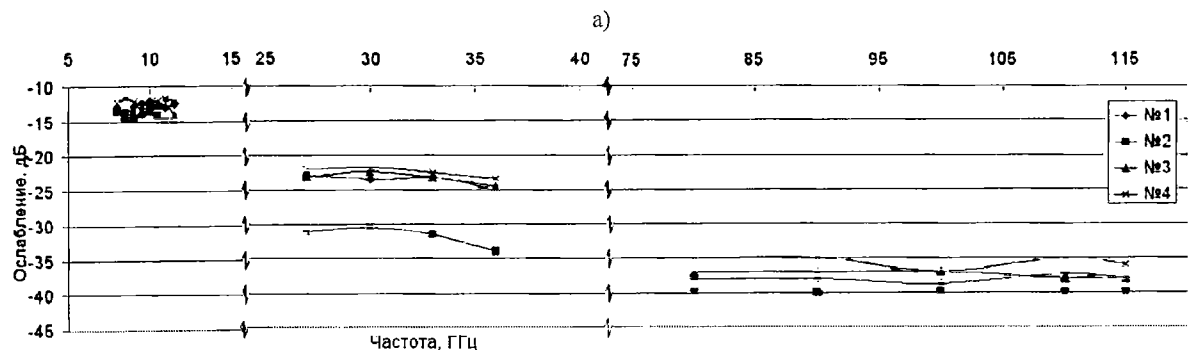


Рис. 4. Характеристики ослабления (а) и отражения (б) радиопоглотителей ЭМИ на основе машинно-вязаных полотен повышенной плотности с жидкостным наполнителем

Результаты и обсуждение. Исследование экранирующих характеристик образцов показывает, что коэффициент ослабления образцов с растворным наполнителем на основе воды увеличивается с ростом частоты. При этом наблюдается снижение коэффициента отражения от экранирующего материала. Экспериментально показано, что наибольшим коэффициентом подавления электромагнитного излучения обладают полотна, содержащие в качестве наполнителя раствор хлористого натрия, однако это также связано с увеличением значения коэффициента отражения, что может обуславливаться повышенной электрической проводимостью экрана и, как следствие, увеличением разницы волновых сопротивлений свободного пространства и экрана. Введение в жидкость глицерина или использование органического наполнителя приводит к снижению коэффициента отражения, позволяя получать материалы, лучше согласованные со свободным пространством.

В области больших длин волн падающее электромагнитное излучение взаимодействует с поглощающим материалом как с однородной средой, обладающей определенным волновым сопротивлением, диэлектрическими и магнитными потерями и электрической проводимостью. В этом случае эффективность материала пропорциональна его толщине на фиксированной частоте и увеличивается при постоянной толщине материала с уменьшением длины волны падающего электромагнитного излучения. С увеличением частоты длина волны становится соизмеримой с размерами поверхностных неоднородностей волокон и пространственной гидродисперсной структуры, что приводит к рассеиванию падающего электромагнитного излучения в приповерхностном слое. Это приводит к снижению коэффициента отражения от поглотителя. Ослабление энергии ЭМИ в диапазоне малых длин волн происходит в результате многократного переотражения ее от границ раздела воздух – жидкость и поглощения жидкостным наполнителем внутри полотна.

Выводы

1. Разработанная технология позволяет получить машинно-вязаное полотно повышенной плотности, образующее капиллярно-пористый материал, обладающий высокой пористостью при относительно небольшой толщине.

2. Пропитка машинно-вязаной основы жидкостным наполнителем позволяет сформировать в его объеме гидродисперсную структуру, содержащую микро- и наноразмерные локальные растворные неоднородности.

3. Созданные конструкции поглотителей обеспечивают коэффициент ослабления ЭМИ примерно –12...–40 дБ в диапазоне частот 8...115 ГГц. Увеличение эффективности экранирования с ростом частоты объясняется увеличивающимся влиянием фактора размерности локальных растворных объемов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алексеев А.Г., Холодов Ю.А. Электромагнитная безопасность // Вестн. Санкт-Петербург. отдел. РАЕН. – 1997. – № 1. – С. 49 – 54.
2. Особая роль системы «миллиметровые волны – водная среда» в природе / П.И. Синицин, В.И. Петросян, В.А. Елкин и др. // Биомедицинская радиоэлектроника. – 1998. – № 1. – С. 47 – 51.
3. Новые материалы для экранов электромагнитного излучения / Л.М. Лыньков, В.А. Богущ, Т.В. Борботько и др. // Доклады БГУИР – Т. 2, № 5. – С. 152 – 167.
4. Гибкие конструкции экранов электромагнитного излучения / Л.М. Лыньков, В.А. Богущ, В.П. Глыбин и др.; Под ред. Л.М. Лынькова. – Мн., 2000. – 284 с.
5. Конструкции гибких поглотителей электромагнитной энергии СВЧ-диапазона / Л.М. Лыньков, Т.В. Борботько, В.А. Богущ, Н.В. Колбун // Доклады БГУИР. – 2003. – Том 1, № 1. – С. 92 – 101.
6. А.с. 730895. Способ вязания двухслойного кулирного трикотажа / Е.П. Поспелов, Ш.Х. Мухамеджанов // Реферативный журнал. – М.: Легкая индустрия, 1980.
7. Гонтаренко А.Н. Особенности получения трехслойного трикотажа // Текстильная промышленность. – 1979. – № 7. – С. 6.
8. Кукин Г.Н., Соловьев А.Н. Текстильное материаловедение. – М.: Легкая индустрия, 1967. – 302 с.
9. Ермаков С.Ф. Применение СВЧ-излучения как эффективного фактора в энергосберегающих технологиях ускоренной пропитки древесины и материалов на ее основе: В сб. тр. конф. – Гомель: ИММС НАН Б, 2000. – С. 139 – 142.
10. Коллинз Р. Течения жидкостей через пористые материалы. – М.: Мир, 1964. – 210 с.
11. Вода в дисперсных системах / Б.В. Дерягин, Н.В. Чураев, Ф.Д. Овчаренко и др. – М.: Химия, 1989. – 288 с.
12. Воюцкий С.С. Физико-химические основы импрегнирования волокнистых систем водными дисперсиями полимеров. – 1969. – 260 с.