

УДК 537.874.7

## **Широкодиапазонные конструкции экранов электромагнитного излучения на основе влагосодержащей целлюлозы**

**Яхия Таха Абдо Аль Адеми,\* Ахмед Абдулбасет Араби Абулькасим,\*\***

**Пулко Т.А.,\*\*\* Насонова Н.В.\*\*\*\*, Лыньков Л.М.\*\*\*\*\***

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, ул.*

*П. Бровки, 6, Минск, 220013, Республика Беларусь*

*\*e-mail: [yahta66@yahoo.com](mailto:yahta66@yahoo.com)*

*\*\*e-mail: [bast1967@yahoo.com](mailto:bast1967@yahoo.com)*

*\*\*\*\*e-mail: [NasonovaN@bsuir.by](mailto:NasonovaN@bsuir.by)*

*\*\*\*\*\*e-mail: [leonid@bsuir.by](mailto:leonid@bsuir.by)*

### **Аннотация**

Недостатком большинства существующих широкодиапазонных экранирующих конструкций с геометрическими неоднородностями поверхности является большая толщина базового модуля, масса и существенная стоимость. Предложена конструкция экрана ЭМИ линейной гофрированной формы, выполненной на основе целлюлозы с гигроскопичным растворным наполнителем. Исследованы характеристики коэффициента отражения и ослабления ЭМИ в диапазоне частот 0,7...17 ГГц в зависимости от расположения рёбер линейных неоднородностей по отношению к поляризации электромагнитных волн.

**Ключевые слова:** экран электромагнитного излучения, композиционные материалы, влагосодержащие материалы.

## Введение

Одним из основных параметров экранов ЭМИ является их рабочий диапазон частот, в пределах которого выдерживаются значения технических характеристик, заявленные в паспорте на данный экран ЭМИ. Для широкодиапазонных экранов ЭМИ полоса рабочих длин волн определяется соотношением  $l_{\max}/l_{\min} > 3/5$ , где  $l_{\min}$  – нижняя рабочая длина волны, а  $l_{\max}$  – верхняя рабочая длина волны. Для изготовления широкодиапазонных экранов ЭМИ применяются сложные конструкции поглотителей, с формированием геометрических неоднородностей на поверхности используемой основы, обращенных в сторону падающей электромагнитной волны, что позволяет уменьшить коэффициент отражения волны и расширить рабочий диапазон экрана за счет рассеяния ЭМВ на геометрических неоднородностях, приводящих к формированию пространственно-поверхностных затухающих волн. Высота геометрических неоднородностей связана с нижней границей рабочего диапазона частот, а выбор материала для экрана проводится исходя из обеспечения требуемой эффективности экранирования в заданном диапазоне частот при определенных ограничениях. Эти ограничения связаны с массогабаритными характеристиками экрана, с механической прочностью и устойчивостью экрана против коррозии, эксплуатационными характеристиками, с технологичностью его конструкции и т.д.

Недостатками большинства существующих широкодиапазонных конструкций с геометрическими неоднородностями поверхности являются большая толщина базового модуля, масса и существенная стоимость [1, 2].

Целью работы является разработка и исследование широкодиапазонного гибкого экрана ЭМИ с небольшими массо-габаритными характеристиками и технологичного в изготовлении на основе влагосодержащих капиллярно-пористых материалов.

### **Теоретические сведения**

Применение в конструкциях экранов ЭМИ различных жидких сред, в том числе и водных растворов, позволяет создавать гетерогенные материалы, подавляющие ЭМИ в широком диапазоне частот вследствие релаксационных потерь электромагнитной энергии в них [3, 4].

Использование воды в качестве жидкостного наполнителя для создания широкодиапазонных экранов ЭМИ, обусловлено быстрым атомно-молекулярным механизмом перераспределения электрического заряда, который действует в воде с ростом частоты. Недостатком экранирующих конструкций на основе воды является зависимость экранирующих характеристик от стабильности влагосодержания используемых элементов, которая связана с процессом испарения и замерзанием раствора в случае понижения температур эксплуатации.

Стабилизировать уровень влагосодержания капиллярно-пористых материалов можно посредством использования гигроскопичного раствора равновесной концентрации, характеризующегося устойчивостью к изменениям температуры

эксплуатации [5, 6]. Образование химических связей между ионами диссоциированной соли щелочноземельного металла и молекулами воды приводит к образованию кристаллогидратов и препятствует испарению воды из композиционных материалов, тем самым стабилизируя уровень влагосодержания экранирующих материалов. Согласно проведённым ранее исследованиям [7, 8], колебание уровня влагосодержания получаемого растворного наполнителя относительно начального значения находится в пределах  $\pm 8\%$  в течение более 30 месяцев, что позволяет стабилизировать величину экранирующих характеристик ослабления ЭМИ в пределах  $\pm 10\%$  [9]. В процессе эксплуатации происходит взаимообмен молекулами воды из капиллярно-пористого материала с воздухом, за счет чего растворный наполнитель обладает способностью восстанавливать свое влагосодержание при нормальных температурных условиях за счет сорбции паров воды из окружающего воздуха [10, 11].

При создании экранирующих водосодержащих конструкций используются гидрофильные материалы, обладающие пористой структурой. В частности, использование целлюлозы обусловлено её повышенной впитывающей способностью по отношению к водным растворам, а также возможностью снижения стоимости конструкций экранов ЭМИ при сохранении их высокой эффективности. Целлюлоза является стереорегулярным природным полимером, цепь которого синтезируется в природе достаточно специфически, что отражается на механических, физических и других свойствах. В структуре целлюлозы, в силу того, что каждое элементарное звено макромолекулы имеет три гидроксильные группы, имеем ее высокую водопоглощающую способность [12].

Существенное влияние на экранирующие характеристики в широком диапазоне частот, помимо материала основы и состава растворного наполнителя, оказывают формируемые на поверхности экрана геометрические неоднородности определённой формы и размеров [13].

### Экспериментальная часть

Для исследований были изготовлены образцы размером 0,5x0,4 м<sup>2</sup> на основе целлюлозы плоской и линейной гофрированной формы. Высота конструктивных элементов гофрированной формы составляет порядка 0,08 м, с углом наклона плоскостей 30°. Элементы конструкции располагаются в шахматном порядке относительно друг друга, как показано на рисунке 1 а. Конструктивные элементы пропитывались синтезированным водным раствором 45% масс. концентрации соли щелочноземельного металла. Масса сухих образцов составила 436 г, пропитанных образцов 1266 г, влагосодержание 56 % масс.



а



б

Рисунок 1 –Элементы конструкции экранов (а – внешний вид гофрированной конструкции, б – микрофотография водосодержащей целлюлозы)

Исследования микроструктуры поверхности образцов полученных композиционных материалов проводились с использованием металлографического агрегатного микроскопа МЕТАМ–Р1 с увеличением до 507 раз, оборудованным цифровой фотокамерой.

Эффективность экранирующих ЭМИ материалов оценивается соотношением между напряженностями электрического и магнитного полей в экранируемом пространстве при отсутствии и наличии экрана, и характеризуется ослаблением энергии ЭМИ и коэффициентом отражения ЭМВ от поверхности образца.

Измерения экранирующих характеристик проводились в раскрыве рупора антенны, при этом экран представлялся пассивным четырехполюсником и его экранирующие характеристики оценивались через коэффициенты передачи  $S_{21}$  и отражения  $S_{11}$  измерительного тракта. Ослабление ЭМИ, которое характеризует снижение мощности ЭМИ, прошедшего через образец  $P_{\text{прош}}$ , определялось через модуль коэффициента передачи измерительного тракта с образцом:

$$O_{\text{сл}} = 10 \cdot \log \frac{P_{\text{пад}}}{P_{\text{прош}}} = |S_{21}| = 20 \cdot \log \frac{H_2}{H_1}, \text{ дБ} \quad (2.1)$$

где  $H_1$  и  $H_2$  – напряженности поля на входе и на выходе четырехполюсника.

Коэффициент отражения ЭМИ определялся, исходя из параметров режима стоячей волны, устанавливающегося в измерительном тракте с образцом, и коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВН), и характеризует долю мощности ЭМИ, отражаемой от образца  $P_{\text{отр}}$ , по отношению к падающей мощности  $P_{\text{пад}}$  ЭМИ:

$$K_{omp} = 10 \cdot \log \frac{P_{omp}}{P_{над}} = S_{11} = 20 \cdot \log \frac{КСВН-1}{КСВН+1}, \text{дБ} \quad (2.2)$$

Оценка коэффициента стоячей волны по напряжению может производиться как в режиме согласованной нагрузки, так и при короткозамкнутом за образцом тракте (используется металлическая пластина). Оценка эффективности экранирования ЭМИ исследуемых образцов проводилось в лабораторных условиях с помощью измерительного комплекса SNA 0,01–18 с волноводным измерительным трактом и рупорными антеннами в диапазоне частот 2...17 ГГц, выбранном с учетом дальнейшего применения экранов электромагнитного излучения.

### Результаты и обсуждение

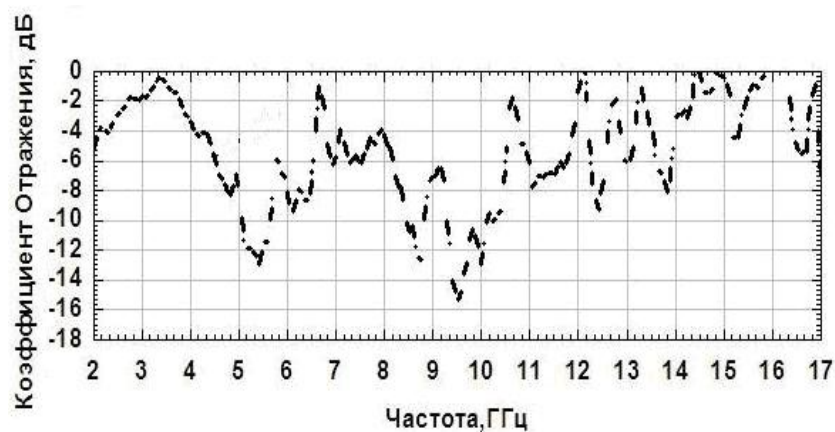
На рисунке 1 приведены внешний вид образца линейной гофрированной формы на основе целлюлозы (рисунок 1 а) и микрофотография структуры влагосодержащего целлюлозного материала, полученная с использованием металлографического агрегатного микроскопа МЕТАМ–Р1 (рисунок 1 б).

Плотность целлюлозных материалов во многом определяется фракционным составом волокон (волокна меньших размеров заполняют промежутки между большими волокнами и тем самым увеличивают плотность), в промежутках которых содержатся включения воздуха и воды. Вследствие этих морфологических особенностей целлюлозный волокнистый материал представляет собой анизотропную капиллярно-пористую систему [13].

Наличие в молекулах целлюлозы гидроксильных групп и субмикроскопических капилляров в волокнах обуславливает небольшую

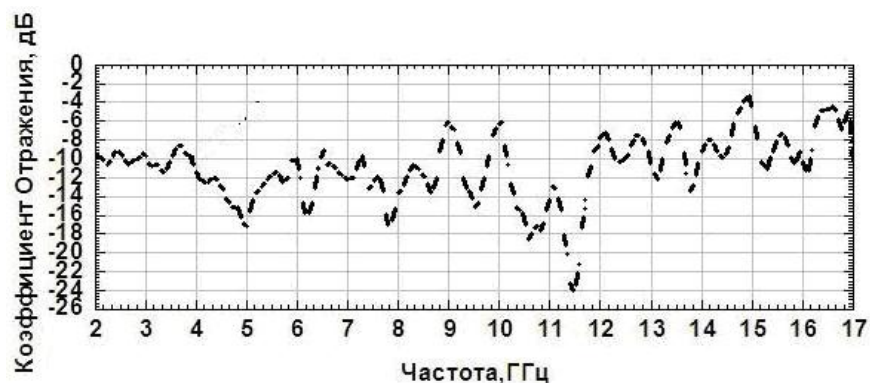
анизотропию распределения жидкости в целлюлозном материале. При взаимодействии воды и целлюлозного материала происходит не только ее продвижение в структуру волокна целлюлозы, но и, в зависимости от степени гидрофильности, распространение жидкости в большей или меньшей степени по поверхности (рисунок 1 б).

Исследования показали, что образцы на основе листа целлюлозы плоской формы толщиной 5 мм обеспечивают коэффициент отражения ЭМИ порядка -1...-12 дБ (в режиме КЗ менее -6 дБ) (рисунок 2). Как видно из результатов измерений, экран ЭМИ плоской формы с металлической подложкой обладает достаточно равномерной характеристикой отражения ЭМИ в широком диапазоне частот. Ослабление ЭМИ увеличивается с возрастанием частоты с 2 до 14 дБ за счет радиопоглощающих свойств водосодержащего наполнителя.

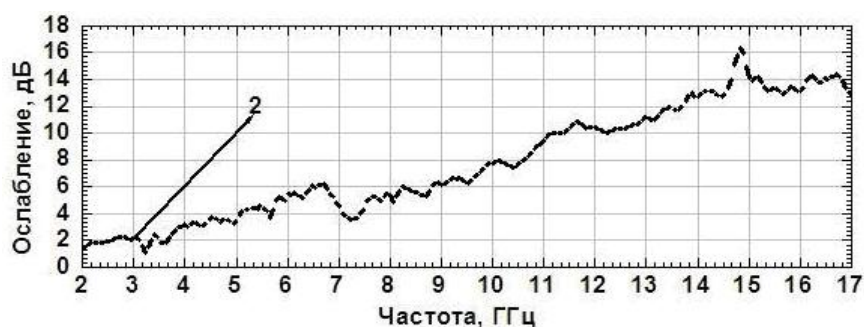


а)





б)

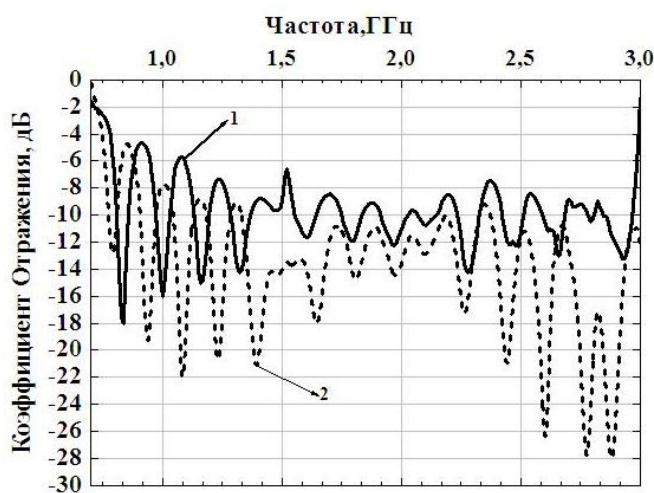


в)

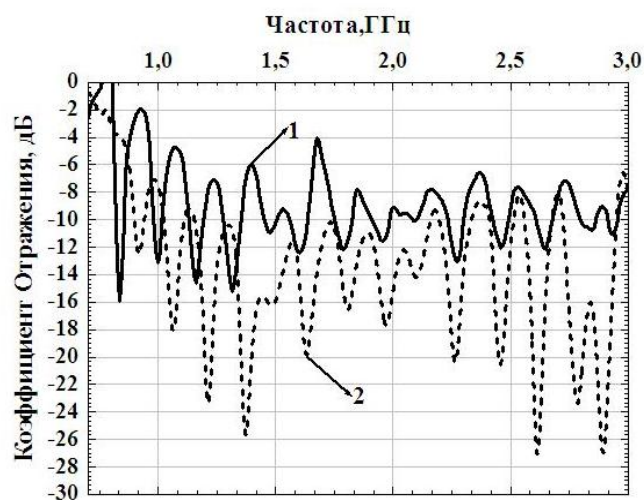
Рисунок 2 –Экранирующие характеристики (коэффициент отражения ЭМИ без металла (а), коэффициент отражения ЭМИ с металлом (б), ослабление ЭМИ (в)) образцов влагосодержащих экранов плоской формы на основе целлюлозы в частотном диапазоне 2...17,0 ГГц

Исследовались образцы с линейной гофрированной формой поверхности на основе целлюлозы. На основании измерений установлено, что в диапазоне 0,7...3 ГГц величина ослабления ЭМИ водосодержащими образцами линейной гофрированной формы с горизонтальным расположением ребер изменяется в пределах 13...31 дБ(рисунок 3, в). При вертикальном расположении ребер гофрированных неоднородностей величина ослабления ЭМИ значительно

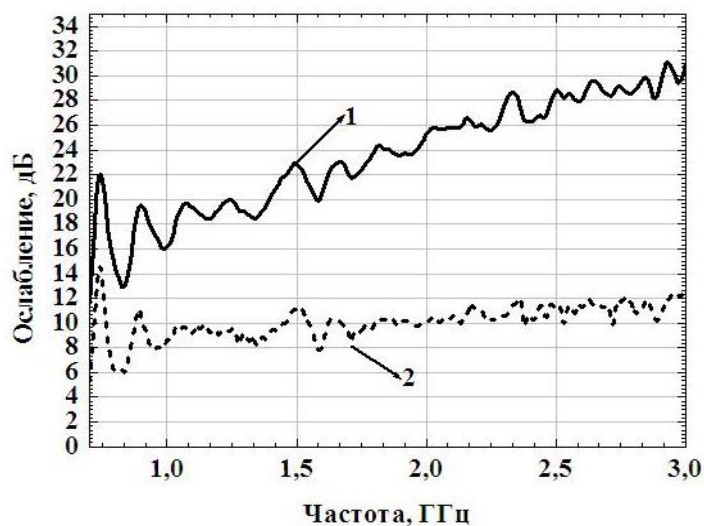
снижается и находится в пределах 6...14 дБ, что обусловлено изменением рассеяния электромагнитных волн, вектор напряженности электрического поля которых находится в плоскости ребер гофров. Характеристики коэффициента отражения ЭМИ, независимо от расположения ребер по отношению к антенне, носят резонансный характер. При горизонтальном расположении ребер линейных неоднородностей относительно антенн коэффициент отражения находится в пределах -2...-18 дБ. После изменения ориентации ребер линейных неоднородностей наблюдается снижение величины коэффициента отражения в зависимости от частоты в пределах 0...-28 дБ.



а



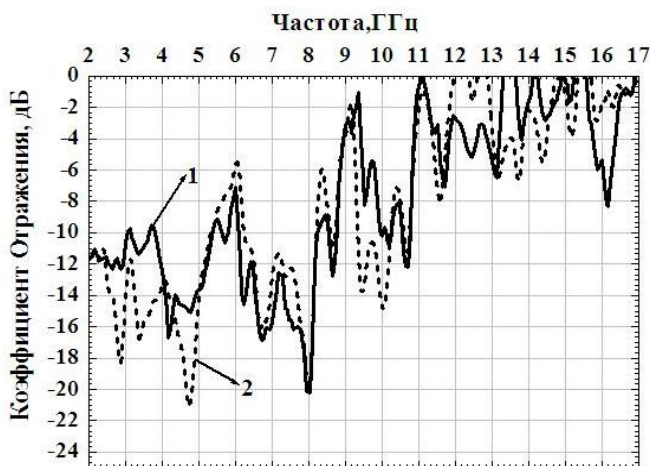
б



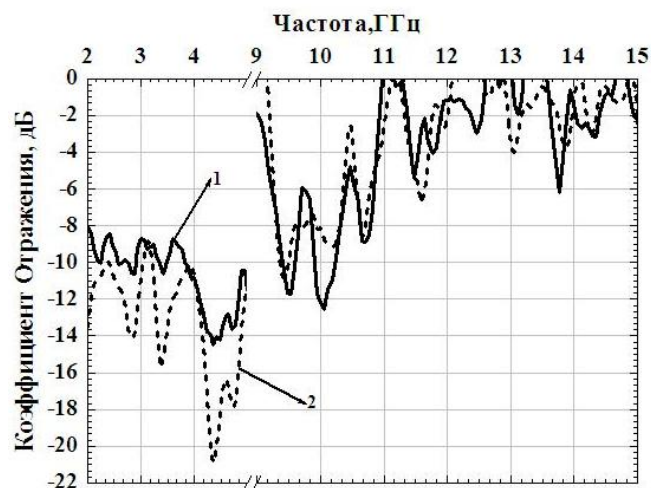
в

Рисунок 3 –Экранирующие характеристики (коэффициент отражения ЭМИ без металла (а), коэффициент отражения ЭМИ с металлом (б), ослабление ЭМИ (в)) образцов гофрированной конструкции влагосодержащих экранов на основе целлюлозы в частотном диапазоне 0...3 ГГц: 1 – горизонтальное расположение рёбер гофрированных неоднородностей образца; 2 – вертикальное расположение рёбер гофрированных неоднородностей образца

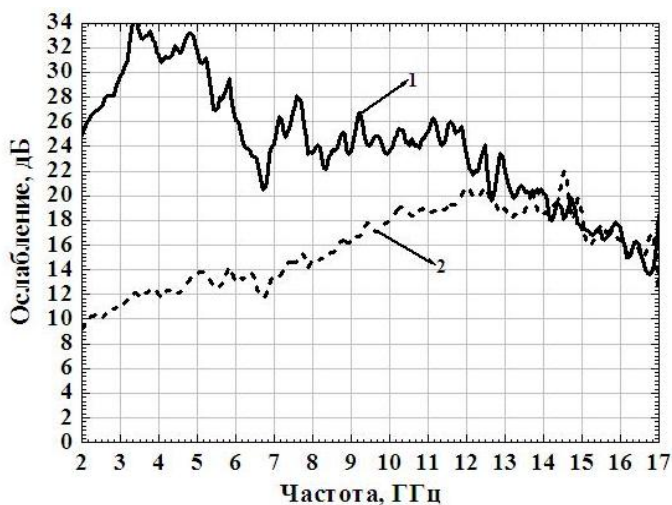
В диапазоне 2...17 ГГц наблюдается увеличение значений коэффициента отражения ЭМИ с увеличением частоты в пределах -6...-22 дБ в диапазоне 2...8 ГГц и 0...-14 дБ в диапазоне частот 8...17 ГГц. Разница значений коэффициента отражения ЭМИ в зависимости от изменения ориентации рёбер линейных неоднородностей составляет порядка 1...7 дБ в зависимости от частоты, причём в большинстве случаев резонанс характеристик обратно пропорционален.



а



б



в

Рисунок 4 –Экранирующие характеристики (коэффициент отражения ЭМИ без металла (а), коэффициент отражения ЭМИ с металлом (б), ослабление ЭМИ (в)) образцов гофрированной конструкции влагосодержащих экранов на основе целлюлозы в частотном диапазоне 2...17 ГГц: 1 – горизонтальное расположение рёбер гофрированных неоднородностей образца; 2 – вертикальное расположение рёбер гофрированных неоднородностей образца

Использование металлического отражателя за образцами не приводит к значительным изменениям характеристик независимо от диапазона частот и положения рёбер линейных неоднородностей на основе целлюлозы, что

обусловлено высоким значением ослабления ЭМИ, за счет чего электромагнитные волны, отражаемые от металла, поглощаются и рассеиваются в объеме экрана.

### **Заключение**

Исследованы особенности взаимодействия ЭМИ с конструкциями экранов ЭМИ линейной гофрированной формы, выполненных на основе целлюлозы с гигроскопичным растворным наполнителем.

Формирование гофрированных неоднородностей на основе водосодержащей целлюлозы приводит к увеличению ослабления ЭМИ во всём исследуемом диапазоне. При этом наблюдается зависимость экранирующих характеристик от ориентации рёбер линейных неоднородностей по отношению к поляризации электромагнитных волн.

### **Библиографический список**

1. Штагер Е.А. Рассеяние радиоволн на телах сложной формы. – М.: Радио и связь, 1986. – 184 с.
2. Масалов С.А., Рыжак А.В., Сухаревский О.И., Шкиль В.М. Физические основы диапазонных технологий типа “Стелс”. – Санкт-Петербург: ВИКУ им. А.Ф. Можайского, 1999. – 164 с.
3. АльАдеми Я.Т.А., Пулко Т.А., Давыдов М.В., Насонова Н.В., Лыньков Л.М. Влагосодержащие экраны для защиты пользователей бытовых и промышленных СВЧ-источников // Биомедицинская радиоэлектроника. 2013. №4. С. 50-56.

4. Поглотитель электромагнитной энергии излучения: пат. 5137 Респ. Беларусь, МПК7 Н 01 Q 17/00 / Л. М. Лыньков, Н. В. Колбун, Т. В. Борботько, Т. А. Пулко, Х. М. Альлябад, А. А. Позняк; заявитель Белорус.гос. ун-т информатики и радиоэлектроники – № и 20080547; заявл. 07.07.2008, опубл. 16.12.2008 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. 2009. – №2 – С. 208.
5. Пулко Т.А., Альлябад Х. М., Насонова Н. В. Методика стабилизации влагосодержания капиллярно-пористых материалов // Инженерный вестник. 2010. № 2(30). С.32–34.
6. Пулко, Т.А. Стабильность водосодержащих конструкций экранов электромагнитного излучения для защиты информации от утечки по техническим каналам: автореф. дис....канд. техн. наук: 05.13.19; 05.27.06 / Т.А. Пулко; Белорус.гос. ун-т информатики и радиоэлектроники. – Минск : 2005. – 24 с.
7. Выбор растворных наполнителей влагосодержащих экранирующих материалов для защиты информационных объектов от воздействия электромагнитных излучений / Т.А. Пулко, Г.А. Пухир, Н.В. Насонова // Технические средства защиты информации: материалы VIII Белорусско-российской науч.-тех. конф., Браслав / Мин. обр. РБ, Гос. центр безопасности инф.; редкол.: В.Ф.Голиков [и др.]– Минск, 2010. - С. 76.
8. Применение дисперсионных жидкостных сред для снижения электромагнитного излучения средств телекоммуникаций / Е.А. Криштопова, Т.В. Борботько, Н.В. Колбун, Т.А. Пулко, Альлябад Х.М., Л.М. Лыньков// Современные средства

связи: материалы XII Международной науч.–тех. конф., Минск-Нарочь / БГУИР, ВГКС; редкол.: М.А. Баркун [и др.]– Минск, 2007. - С. 50-51.

9. Методика стабилизации влагосодержания капиллярно-пористых материалов / Т.А. Пулко, Альлябад Хуссейн Мохамед, Н.В. Насонова // Инженерный вестник. – 2010.– №2(30). – С.32-34.

10. Кельцев, Н. В. Основы адсорбционной техники / Н. В. Кельцев. – Москва: Химия, 1984. – 592с.

11. Фурман, А. А., Неорганические хлориды / А.А. Фурман. – М.: Химия, 1980. – 416 с.

12. Основные представления о волокнах, применяемых в бумажном производстве: матер.симпозиума. – М.: Гослесбумиздат, 1962. – 356 с.

13. Поглотитель электромагнитных волн: пат. 2359374 RU, МПК Н 01 Q 17/00 / Левадный Л. Н., Хохлов В. М., Чернет Е. О., Фритче А.; № и 2008118733/09,; заявл. 14.05.2008, опубл. 20.06.2009.