
УДК 621.315.592.4:535.231.15

Экраны электромагнитного излучения на основе порошкообразных отходов производства чугуна

Бойправ О. В. *, Борботько Т. В. **, Лыньков Л. М., Соколов В. Б.

Белорусский государственный университет, БГУИР, ул. П.Бровки, 6, 220013, Минск,

Беларусь

**e-mail: boipravolga@rambler.ru*

***e-mail: kafzi@bsuir.by*

Аннотация

Разработаны конструкции экранов электромагнитного излучения на основе порошкообразных отходов производства чугуна. Исследовано влияние размера фракций порошкообразных отходов производства чугуна на их магнитные свойства, а также на экранирующие характеристики разработанных конструкций экранов электромагнитного излучения.

Ключевые слова: коэффициент отражения, коэффициент передачи, относительная магнитная проницаемость, порошкообразные отходы производства чугуна, экранирование, электромагнитное излучение

Введение

Научно-технический прогресс обуславливает увеличение общего числа радиоэлектронных средств (РЭС) и, как следствие, расширение области их применения. При помощи современных РЭС решаются задачи, связанные с получением, обработкой и передачей информации (системы локации и навигации), дистанционным управлением процессами (телемеханика), электронной идентификацией и аутентификацией (системы распознавания) и пр. [1]. Для обеспечения полноты решения задач, возлагаемых на РЭС, следует обеспечивать корректные условия для работы последних. Для этого необходимо снижать степень воздействия на РЭС внешних помех, источником которых является электромагнитное излучение (ЭМИ) функционирующих вблизи устройств и систем как аналогичного, так и иного на-

значения. Одним из направлений снижения степени такого воздействия является уменьшение на этапе конструирования уровней мощности ЭМИ РЭС до предельно допустимых. При этом измерения данных уровней следует проводить в безэховых камерах, стены которых облицованы радиопоглощающими материалами (РПМ), необходимыми для защиты измерительных приборов, а также персонала от переотраженного ЭМИ.

В настоящее время в качестве основных компонентов при разработке РПМ для безэховых камер широко используются материалы, обеспечивающие ослабление ЭМИ за счет магнитных потерь, например, порошки из ферритов различного состава [2]. Они закрепляются в связующих веществах, в результате чего формируются композиционные РПМ. Кроме того, данные порошки могут засыпаться в специальные емкости, выполняемые из радиопрозрачного материала. В формируемых таким образом РПМ возможно как увеличивать, так и уменьшать массу используемого порошка (а значит, управляемого изменять экранирующие характеристики), что в случае композиционных РПМ является более сложной задачей ввиду быстрого изменения со временем у них фазы связующего вещества.

Цель работы состояла в разработке конструкций экранов ЭМИ на основе порошкообразных отходов производства чугуна (шлам очистки ваграночных газов (ШОВГ)), представляющих собой, так же, как и ферриты, соединения оксидов металлов. Одним из преимуществ ШОВГ по сравнению с ферритами является его низкая стоимость.

1. Характеристика шлама очистки ваграночных газов

ШОВГ представляет собой порошкообразные отходы, являющиеся результатом фильтрации и обработки в осевом циклоне газов, поступающих из вагранок. Содержание окиси углерода в таких газах допускается не более 0,1 %, пыли – не более 150 мг/м³.

Очистка ваграночных газов от оксида углерода осуществляется путем их дожигания. В вагранках холодного дутья дожигание окиси углерода производится, главным образом, в трубе вагранки выше завалочного окна. Очистка ваграночных газов должна выполняться одновременно с созданием воздухоподогревателей. В существующих системах газоочистки применяются:

- а) сухие футерованные циклоны;
- б) мокрые скрубберы, пенные аппараты и трубы Вентури.

В первом случае газы очищаются от пыли на 80 %, а в случае дополнительной их мокрой очистки в скрубберах, пенных аппаратах или трубе Вентури степень очистки газов может быть доведена до допустимого нормами содержания пыли.

Пенные аппараты дают более тонкую очистку, чем мокрые скрубберы. На вагранках предусматривается работа двух параллельно включенных осевых циклонов, в нижней части которых устанавливается футерованный бункер для сбора задержанной в циклоне пыли (первая ступень очистки газов). Из осевых циклонов по футерованным патрубкам газы направляются в камеру дожигания. После дожигания они поступают в мокрый скруббер, откуда дымососом подаются в атмосферу. В мокром скруббере отходящие газы проходят вторую ступень очистки и освобождаются от мелких фракций пыли [3, 4].

Состав ШОВГ представлен в таблицах 1 и 2 [5, 6].

Таблица 1. Состав ШОВГ, полученного на первой ступени очистки

Оксид	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	FeO	MgO	CaO	SO ₃	Fe	Na ₂ O	K ₂ O
Содержание, % по масс.	41,17	8,65	5,96	4,45	3,87	3,64	1,25	1,2	0,5	0,38

Таблица 2. Состав ШОВГ, полученного на второй ступени очистки

Оксид	SiO ₂	CaO	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SO ₃	K ₂ O
Содержание, % по масс.	24,35	22,66	11,37	3,38	3,57	3,25	2,68	1,96

На основании результатов анализа данных, представленных в таблицах, можно сделать вывод о том, что ШОВГ, как первой, так и второй ступеней очистки, представляет собой соединения оксидов металлов с оксидами кремния и серы.

2. Описание разработанных конструкций

В настоящей работе разработаны конструкции экранов ЭМИ, одна сторона которых имеет геометрические неоднородности поверхности пирамидальной формы, другая – плоскую поверхность. В процессе формирования таких конструкций в емкость прямоугольной формы, выполненную из радиопрозрачного материала и содержащую вкладыш, изготовленный из прессованной целлюлозы и имеющий углубления в виде четырехугольных усеченных пирамид высотой 40 мм и площадями оснований 625 мм² и 100 мм², засыпался ШОВГ. Для формирования конструкции №1 использовался ШОВГ с размером фракций 5 мкм (ШОВГ,

полученный после второй ступени очистки), конструкций №2 и №3 – 20 мкм и 30 мкм соответственно (ШОВГ, полученный после первой ступени очистки).

Общий вид изготовленных конструкций экранов ЭМИ представлен на рис. 1.

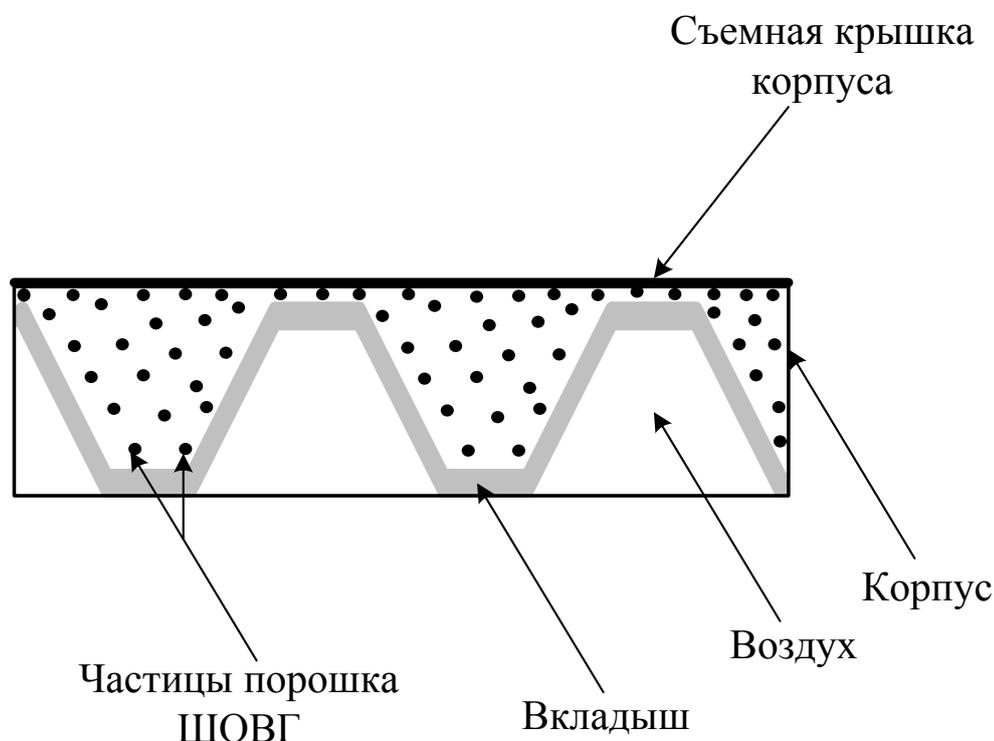


Рис. 1. Общий вид изготовленных конструкций экранов ЭМИ

3. Методика измерения магнитных характеристик шлама очистки ваграночных газов

Измерения параметров магнитных характеристик ШОВГ (зависимостей относительной магнитной проницаемости (μ) от величины индукции внешнего магнитного поля и температуры) проводились с использованием вибрационного магнитометра Cryogenic 14T VIBRATING SAMPLE MAGNETOMETER (рис. 2). Основными его узлами являются генератор механических колебаний, электронный измерительный блок, соленоид, измерительные катушки, датчик поля Холла, шток с кварцевым держателем образца. В конструкцию генератора механических колебаний входит емкостной датчик, стабилизирующий амплитуду колебаний образца. Электронный измерительный блок имеет модульную структуру. В его состав входят источник питания, генератор синусоидального сигнала с усилителем мощности для питания генератора механических колебаний, модуль управления, фазовый детектор, усилитель сигнала, поступающего с измерительных катушек, измеритель поля Холла, регистрирующий значения магнитной индукции исследуемого образца.

В процессе измерений исследуемый образец помещался в пластиковую трубку и закреплялся между фиксаторами штока. Источником магнитного поля служил соленоид. Направление колебаний образца – вертикальное, а магнитный момент образца, индуцированный внешним магнитным полем, был ориентирован горизонтально. Сигнал от измерительных катушек после фазового детектирования и усиления поступал на вход измерителя поля Холла. Генератором механических колебаний выступал электродинамический громкоговоритель, движение образцу передавалось от него посредством штока. Амплитуда колебаний образца была постоянной и составляла 0,0344 м.

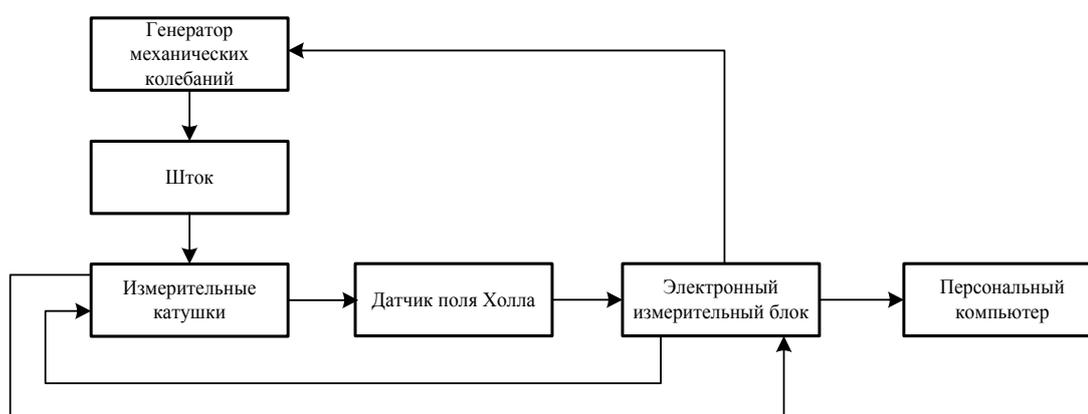


Рис. 2. Структурная схема вибрационного магнитометра

Измерения значений магнитной индукции образцов ШОВГ проводились при комнатной температуре и значениях индукции внешнего магнитного поля, изменяющихся с шагом 0,02 Тл в пределах диапазона –3 Тл...3 Тл.

Кроме того, были проведены измерения значений магнитной индукции образцов ШОВГ в диапазоне от комнатной температуры до гелиевой при постоянном значении B , равном 0,5 Тл. При этом измерительные катушки помещались в резервуар с жидким гелием.

Согласно сведениям, представленным в разделе «Технические данные» руководства по эксплуатации вибрационного магнитометра Cryogenic 14T VIBRATING SAMPLE MAGNETOMETER, относительная погрешность проводимых при помощи него измерений составляет $\pm 1\%$. Источником погрешности является нестабильность частоты колебаний образца, составляющая 10^{-2} Гц. Возникновение данной нестабильности может быть связано с дрейфом электрических параметров схемы, питающей генератор механических колебаний [7].

По виду зависимости относительной магнитной проницаемости материала от величины внешнего магнитного поля, а также от температуры окружающей среды (рис. 3) можно сделать вывод о том, к магнетикам какого типа он относится.

Относительная магнитная проницаемость диамагнетика чуть меньше единицы ($\mu \sim 0,998$) и не зависит от величины внешнего магнитного поля и температуры.

У парамагнетиков в процессе их воздействия с внешним магнитным полем происходит слабая ориентация магнитных моментов атомов, поэтому относительная магнитная проницаемость данным материалов незначительно превышают единицу ($\mu \sim 1,03$). От величины внешнего магнитного поля при обычных температурах магнитная проницаемость парамагнетиков зависит слабо. Парамагнитный эффект по физической природе во многом сходен с дипольно-релаксационной поляризацией диэлектриков.

Ферромагнетикам присуще большое значение μ ($10^2 \dots 10^6$), которое сильно зависит от величины внешнего магнитного поля и температуры. Важная особенность ферромагнетиков заключается в их способности намагничиваться до насыщения в слабых магнитных полях (до 10 Тл).

Относительная магнитная проницаемость ферримагнетика ниже относительной магнитной проницаемости ферромагнетика ($1 \dots 10^2$), но при этом тоже сильно зависит от величины внешнего магнитного поля и температуры. Максимум относительной магнитной проницаемости ферро- и ферримагнетиков при высоких температурах соответствует точке Кюри (T_K). Однако в ряде случаев основные магнитные параметры ферримагнетиков характеризуются более сложной зависимостью от температуры окружающей среды по сравнению с ферромагнетиками. У некоторых ферримагнетиков в области низких температур (обычно в интервале от нуля до температуры жидкого азота) обнаруживаются аномалии температурного хода относительной магнитной проницаемости и ряда других параметров [8–12].

Антиферромагнетиками являются вещества, в которых ниже некоторой определенной температуры T_N (точка Нееля) спонтанно возникает антипараллельная ориентация магнитных моментов одинаковых атомов или ионов кристаллической решетки. При нагревании антиферромагнетик переходит в парамагнитное состояние [2].

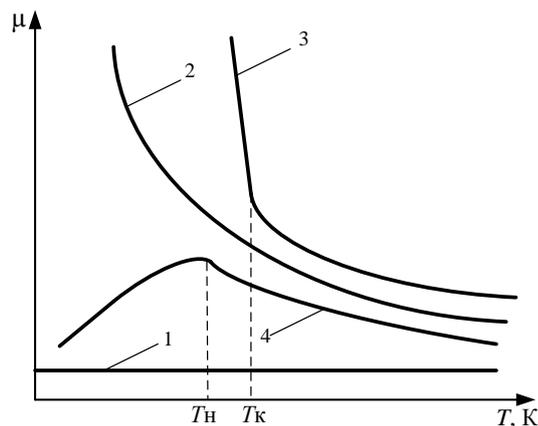


Рис. 3. Общий вид температурной зависимости относительной магнитной проницаемости диамагнетиков (1), парамагнетиков (2), ферро- и ферримагнетиков (3), антиферромагнетиков (4)

4. Методика измерения коэффициентов передачи и отражения конструкций экранов электромагнитного излучения

Для измерения коэффициентов передачи и отражения разработанных конструкций экранов ЭМИ использовался панорамный измеритель коэффициентов передачи и отражения SNA 0,01–18, работающий по принципу отдельного выделения и непосредственного детектирования уровней падающей и отраженной волн. В состав панорамного измерителя входят:

- генератор качающейся частоты (ГКЧ);
- блок обработки измерительных сигналов;
- передающая и приемная антенны;
- блоки направленных ответвителей (блоки В и А/В), предназначенные для выделения и детектирования падающей, отраженной и прошедшей электромагнитных волн и соединяющиеся с каналами блока обработки измерительных сигналов и антеннами.

Рабочий диапазон частот панорамного измерителя – 0,01...18 ГГц. Измерения выполнялись в автоматическом режиме. Для задания начальных параметров измерений (диапазона частот, вида измеряемого параметра) и систематизации его результатов использовалось специальное программное обеспечение. Сам процесс измерений подразумевал выполнение трех этапов.

На первом этапе осуществлялась калибровка, во время проведения которой устанавливался оптимальный уровень мощности для работы детекторов измерителя.

Второй этап заключался в измерении коэффициентов передачи по схеме, изображенной на рис. 4. При этом ГКЧ измерителя формировал сигнал в заданной полосе частот и че-

рез блок А/Р подавал его в передающую антенну. Блок обработки измерительных сигналов регистрировал ЭМИ, прошедшее через исследуемый образец.

Третий этап заключался в измерении коэффициентов отражения. При этом на выходе вместо приемной антенны устанавливался короткозамыкатель, ГКЧ измерителя формировал сигнал в заданной полосе частот и через блок А/Р подавал его в передающую антенну. Блок обработки измерительных сигналов регистрировал ЭМИ, отраженное от исследуемого образца. Согласно сведениям, представленным в разделе «Технические данные» руководства по эксплуатации панорамного измерителя коэффициентов передачи и отражения SNA 0,01–18, относительная погрешность проводимых с его помощью измерений составляет $\pm 1\%$.

Измерения параметров проводились на частотах диапазона 0,7...18 ГГц. ЭМИ данного частотного диапазона сопровождается работа систем мобильной связи, радиолокационных станций, средств вычислительной техники и пр.

При измерениях в пределах диапазона 0,7...3 ГГц значения частот изменялись с шагом 0,009 ГГц, а в пределах диапазона 3...17 ГГц – с шагом 0,063 ГГц. Измерения параметров на каждой из частот проводились трехкратно.

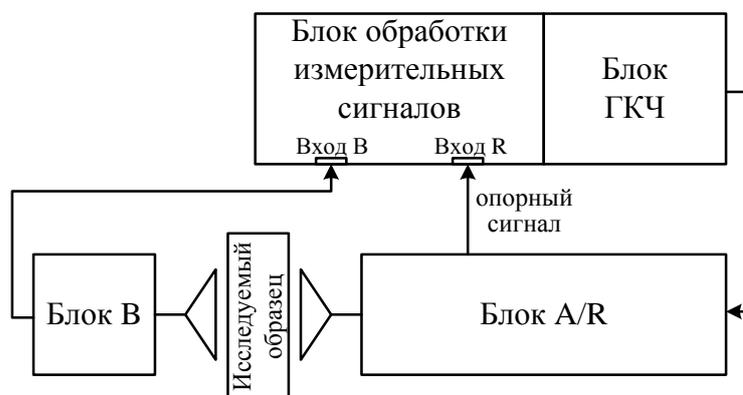


Рис. 4. Структурная схема измерительной установки SNA 0,01–18 при измерении коэффициентов передачи экранов ЭМИ

5. Методика измерения уровней мощности электромагнитного излучения, проходящего через конструкцию экрана электромагнитного излучения

Измерения уровней мощности ЭМИ, проходящего через разработанные конструкции экранов ЭМИ, производились при помощи информационно-измерительной системы (ИИС), включающей в себя:

– ГКЧ, встроенный в конструктив панорамного измерителя коэффициентов передачи и отражения SNA 0,01–18;

– передающую и приемную антенны;

– измеритель мощности ЭМИ.

ГКЧ соединялся с передающей антенной посредством волновода, измеритель мощности с приемной антенной – посредством кабеля.

Для управления параметрами ГКЧ (амплитудой и частотой) использовалось специальное программное обеспечение. Согласно сведениям, представленным в разделе «Технические данные» руководства по эксплуатации измерителя мощности ЭМИ, погрешность установки его параметров посредством данного программного обеспечения составляет $\pm 0,1 \dots \pm 0,5 \%$.

Порядок соединения устройств ИИС и расположение исследуемых образцов в процессе измерений показаны на рис. 5.

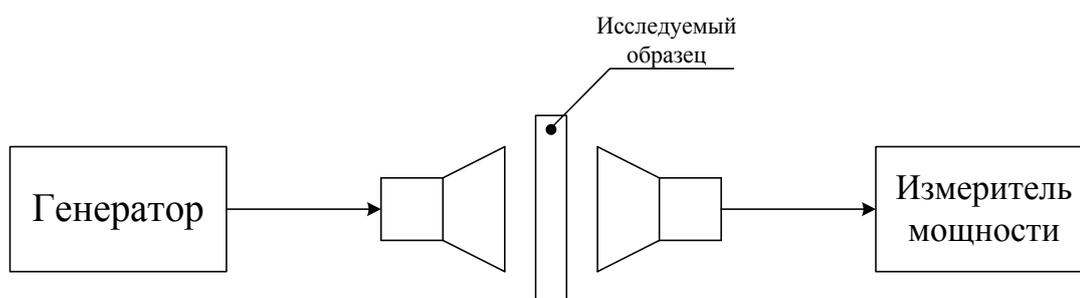


Рис. 5. Структурная схема установки для измерения уровня мощности ЭМИ, пропускаемого конструкциями экранов

Перед проведением измерений выполнялась калибровка ИИС, при которой передающая и приемная антенны устанавливались друг напротив друга. Цель калибровки заключалась в том, чтобы поочередно для каждой из выбранных для проведения измерений частот определить, какого уровня мощности ЭМИ (в дБ) следует сгенерировать и подать на передающую антенну, чтобы зарегистрировать на приемной антенне ЭМИ уровня мощности 1 мВт, 2 мВт, 3 мВт, 4 мВт либо 5 мВт (максимальное значение уровня мощности, которое может быть зарегистрировано измерителем мощности составляет 10 мВт).

В процессе измерений на каждой из частот указанного диапазона генерировалось ЭМИ с уровнем, определенным на этапе калибровке, после чего снимались показания измерителя мощности.

6. Результаты и обсуждение

На основании измеренных значений магнитной индукции образцов ШОВГ выполнены расчеты их относительной магнитной проницаемости. По данным расчета построены графические зависимости относительной магнитной проницаемости ШОВГ от температуры окружающей среды (рис. 6) и величины индукции внешнего магнитного поля (рис. 7).

Для описания характера изменения магнитных свойств материала при изменении температуры окружающей среды используется температурный коэффициент магнитной проницаемости (TK_{μ}) [13]:

$$TK_{\mu} = \frac{\mu_2 - \mu_1}{\mu_1} \cdot \frac{1}{T_2 - T_1},$$

где μ_1 и μ_2 – значения относительной магнитной проницаемости материала при температурах T_1 и T_2 соответственно.

Относительная магнитная проницаемость ШОВГ изменяется с изменением температуры окружающей среды. В диапазоне отрицательных температур (169 К...6 К) среднее значение температурного коэффициента магнитной проницаемости (TK_{μ}) ШОВГ составляет $0,055 \text{ К}^{-1}$. В области гелиевых температур (27 К...6 К) значение относительной магнитной проницаемости ШОВГ начинает резко возрастать и TK_{μ} при этом составляет $0,2 \text{ К}^{-1}$. Подобное поведение присуще температурным зависимостям относительной магнитной проницаемости ферромагнетиков (в частности, ферритов) [14].

Установлено, что относительная магнитная проницаемость ШОВГ увеличивается по мере увеличения индукции внешнего магнитного поля и зависит от размера его фракций. Значение начальной относительной магнитной проницаемости (при $B=0$) для ШОВГ с размером фракций 5 мкм составляет 0,28, с размером фракций 20 мкм – 0,53, с размером фракций 30 мкм – 1,1; значения максимальной относительной магнитной проницаемости (μ_{\max}) равны 4,04; 7,18; 41,1 соответственно. Кроме того, для ШОВГ характерны явления остаточной намагниченности. Изложенное позволяет сделать вывод о том, что ШОВГ является ферромагнитным порошком.

На основании измеренных значений коэффициентов передачи и отражения изготовленных конструкций экранов ЭМИ, а также уровней мощности ЭМИ, проходящего через каждую из них, построены графические зависимости, представленные на рис. 8–12.

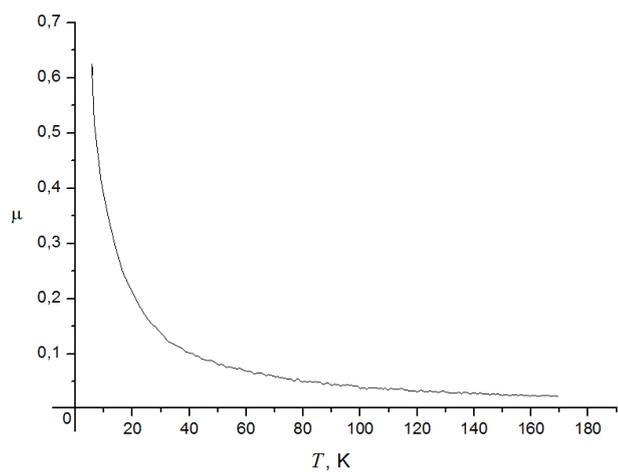
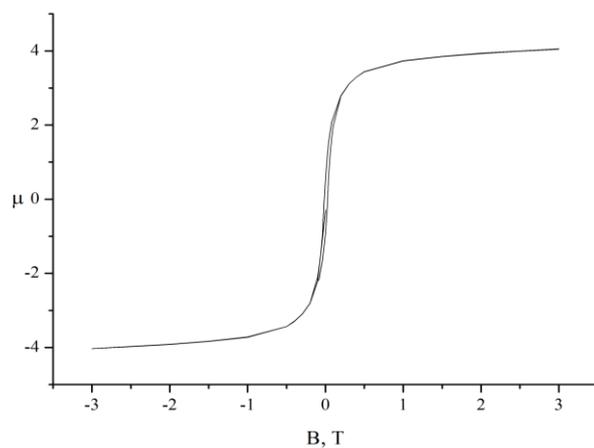
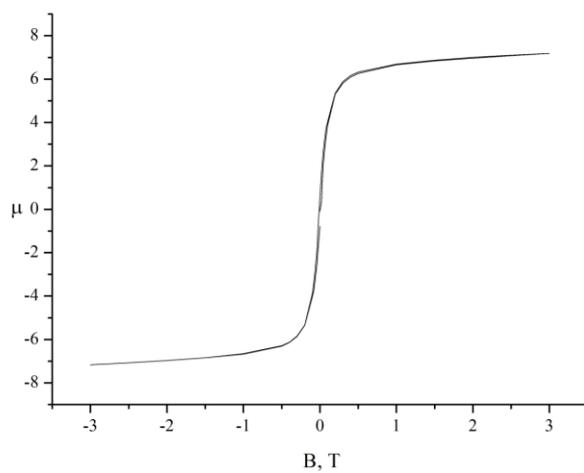


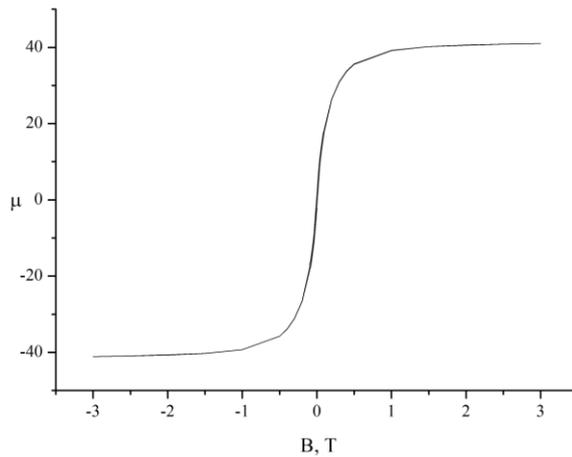
Рис. 6. Зависимости относительной магнитной проницаемости ШОВГ с размером фракций 5 мкм от величины температуры окружающей среды



a



б



в

Рис. 12. Зависимость относительной магнитной проницаемости от величины индукции внешнего магнитного поля для ШОВГ с размером фракций 5 мкм (а), 20 мкм (б), 30 мкм (в)

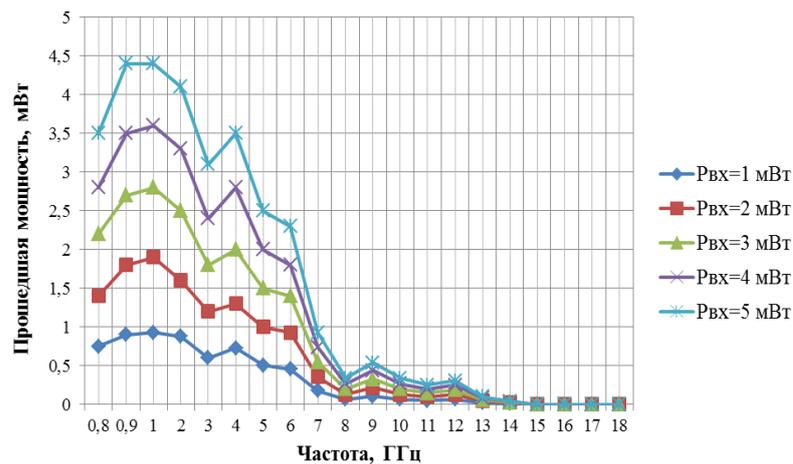


Рис. 6. Частотные зависимости уровней мощности ЭМИ, прошедшего через конструкцию экрана, изготовленную на основе ШОВГ с размером фракций 5 мкм

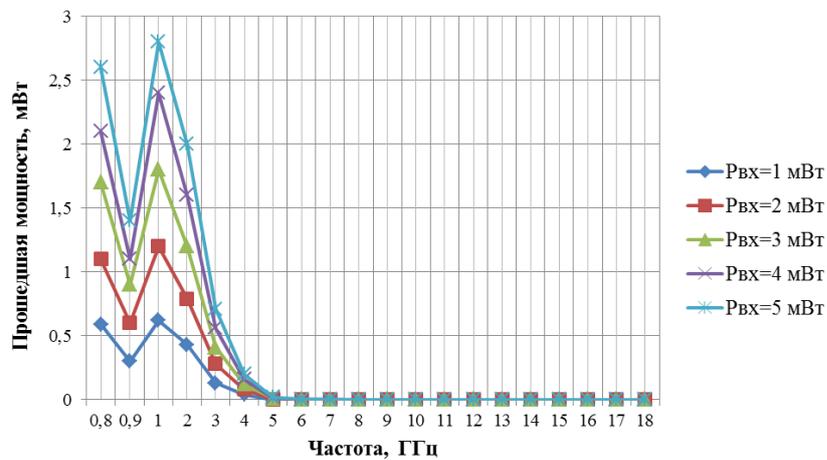


Рис. 7. Частотные зависимости уровней мощности ЭМИ, прошедшего через конструкцию экрана, изготовленную на основе ШОВГ с размером фракций 20 мкм

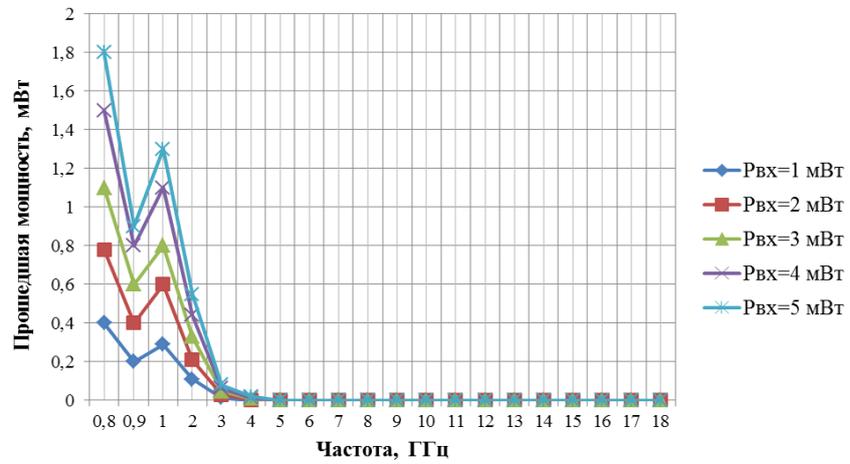


Рис. 8. Частотные зависимости уровней мощности ЭМИ, прошедшего через конструкцию экрана, изготовленную на основе ШОВГ с размером фракций 30 мкм

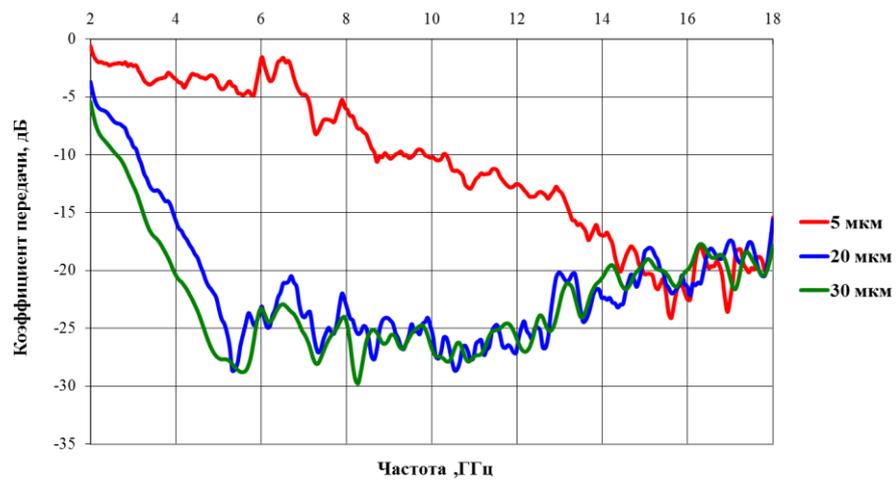


Рис. 9. Частотные зависимости коэффициентов передачи разработанных конструкций экранов ЭМИ

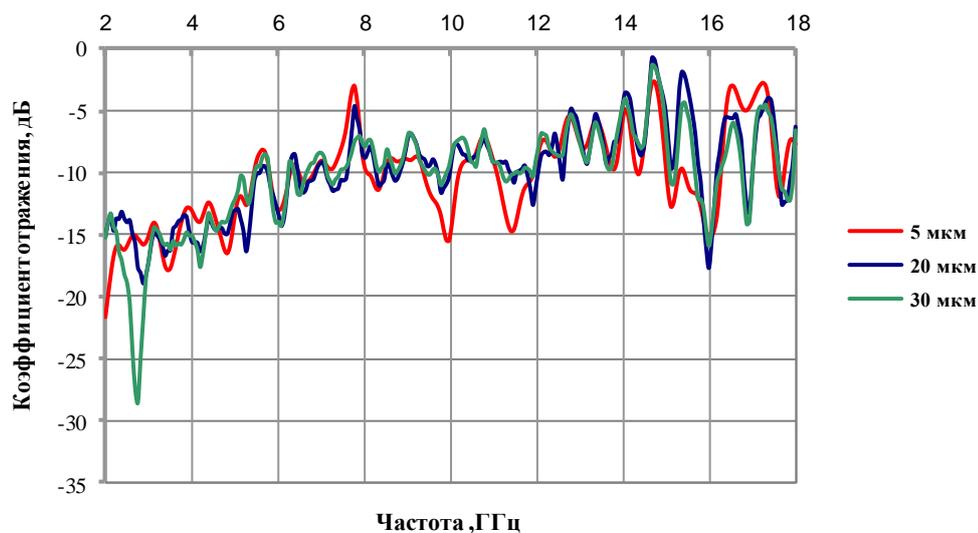


Рис. 10. Частотные зависимости коэффициентов отражения разработанных конструкций экранов ЭМИ

Таким образом, магнитные свойства и размер фракций порошкообразного ШОВГ в большей степени оказывают влияние на значения коэффициентов передачи изготавливаемых на их основе конструкций экранов ЭМИ, чем на значения коэффициентов отражения.

В частности, если для изготовления конструкции экрана ЭМИ вместо ШОВГ с размером фракций 5 мкм использовать ШОВГ с размером фракций 20 мкм, то значения ее коэффициентов передачи в диапазоне частот 0,7...14 ГГц уменьшатся с $-1...-20$ дБ до $-5...-30$ дБ, а в диапазоне 14...18 ГГц практически не изменятся. При этом приращение значений коэффициентов отражения в диапазоне частот 0,7...18 ГГц по модулю будет составлять не более 3 дБ.

При падении электромагнитных волн (ЭМВ) на границу раздела двух сред (воздух – поверхность конструкции экрана ЭМИ), значения диэлектрической и магнитной проницаемостей которых отличаются, имеют место явления отражения и преломления волн, при котором последние частично проходят во вторую среду. Геометрические неоднородности поверхности конструкции экрана ЭМИ влияют на поляризацию отраженной волны, которая не совпадает с поляризацией падающей волны. Данное явление носит название деполяризации (рассеяния) отраженных волн. Его взаимосвязь с наличием у поверхности экрана ЭМИ неоднородностей можно доказать в том случае, если рассмотреть рассеянное поле как сумму полей, излучаемых равномерной и неравномерной частями электрического тока [15]. Дальнейшее их ослабление обусловлено явлением поглощения их энергии материалом второй сре-

ды [16]. Оно связано с тем, что ЭМВ в процессе своего распространения в среде вызывают, независимо от ее природы, вынужденные колебания свободных и связанных зарядов, магнитных диполей, квадрупольей. Это приводит к созданию первичного и вторичного ЭМИ. Характер параметров последнего зависит от электрических и магнитных свойств среды, величин коэффициента ее преломления, а также длины ЭМВ. В случае если среда содержит наполнитель в виде частиц определенного размера, параметры вторичного ЭМИ определяются также соотношением размера частиц (l) и расстояния между ними (d) с длиной падающей волны (λ). Если наполнителем среды являются микродисперсные ферро- или ферритмагнетики, то в ней возможно наличие агломератов частиц. В подобных случаях размер единичного препятствия для ЭМВ следует считать несколько большим, чем размер частицы. Однако, как правило, при проведении теоретического анализа вследствие случайного характера распределения ферро- и ферритмагнитных частиц в среде принимается упорядоченная структура их размещения – в виде кубической решетки, в узлах которой размещены данные частицы.

Когда размер частиц много меньше длины волны, т.е. d/λ мало, распространение волн в среде определяется величиной l/λ , которая может быть больше или меньше 1.

Случай, при котором $l/\lambda \geq 1$, соответствует малонаполненным средам, когда расстояние между частицами больше длины волны. При этом волны свободно проникают через слои частиц и почти не взаимодействуют с ними, т. е. фазовый сдвиг волн после их прохождения через частицы крайне незначителен. Рассеянием волны на частицах можно пренебречь и, следовательно, фазовый фронт волны не изменяет своего положения относительно направления распространения в любой точке материала. При этом среду можно считать радиопрозрачной.

Случай, при котором расстояние между частицами меньше длины волны ($l/\lambda \leq 1$) аналогичен дифракции волн на мелкой решетке. При этом как коэффициент поглощения, так и коэффициент отражения ЭМВ зависят от размера частиц, расстояния между частицами и слоями частиц.

В случае, когда расстояние между частицами много меньше длины волны ($l/\lambda \ll 1$), решетка частиц очень мелка и волны воспринимают ее как целое. Подобной структуре распределения частиц будет соответствовать материал с некоторыми распределенными равномерно по объему макропараметрами относительных магнитной (μ^*) и диэлектрической (ϵ^*) проницаемостей. Это соответствие можно объяснить на основании теории дифракции ЭМВ на многослойной мелкой и частой решетке, тем более что в общем случае частицы распределены по объему материала хаотично. При этом распространение волны в среде, содержащей

частицы наполнителя (сосредоточенные μ^* и ε^*), эквивалентно распространению волны в среде с равномерно распределенными μ^* и ε^* .

Вторая возможная ситуация соответствует случаю, когда d/λ сравнимо с 1 или велико, т. е. когда размер частиц соизмерим с длиной волны или больше ее. В этом случае для распространяющихся ЭМВ каждая частица будет представлять препятствие. Распространение волн в такой среде описывается законами их дифракции на единичном препятствии. Например, для единичной частицы после прохождения через нее волн будут наблюдаться кольца Френеля. Суперпозиция волн, как прошедших, так и отраженных от каждой частицы, будет давать сложную картину, характеризуемую, в общем случае, одной закономерностью: при увеличении содержания наполнителя будет расти коэффициент отражения (если частицы имеют коэффициент преломления n^* существенно отличный от n свободного пространства) [17].

В рассматриваемом случае в ходе проведения измерений коэффициентов передачи и отражения разработанных конструкций экранов ЭМИ длина ЭМВ в зависимости от их частоты составляла 0,017...428,6 м, т. е. превышала размер частиц ШОВГ, а также расстояние, которое могло образоваться между этими частицами.

Таким образом, явление взаимодействия ЭМВ с разработанными конструкциями аналогично их дифракции на мелкой решетке.

Заключение

Порошкообразный ШОВГ по своим магнитным свойствам относится к ферромагнетикам: величины его относительной магнитной проницаемости ниже 10^2 , но при этом они зависят от величины внешнего магнитного поля, характеризуются малыми значениями индукции насыщения, не превышающими 3 Тл, и достаточно высокой температурной стабильностью. Магнитные характеристики ШОВГ зависят от того, на какой ступени очистки был отобран данный порошкообразный материал, т. к. степень очистки определяет размер его фракций. На основе порошкообразного ШОВГ можно формировать различные экранирующие конструкции, которые будут обеспечивать эффективное ослабление энергии ЭМИ, обусловленное ее потерями на магнитную проницаемость [18, 19]. Один из вариантов – предложенные в рамках настоящей работы конструкции, формируемые путем засыпания порошка ШОВГ в емкости, выполненные из радиопрозрачного материала. Такие конструкции могут монтироваться на стены безэховых камер, в которых осуществляется тестирование и настройка чувствительного к внешним ЭМИ и высокоточного оборудования: спутниковых систем, георадаров, корабельных радиобуев и др. С использованием этой же технологии на основе порошкообразного ШОВГ возможно реализовать многослойные экранирующие конст-

рукции градиентного типа. В таких конструкциях относительная магнитная проницаемость будет увеличиваться по мере перехода электромагнитной волны от одного слоя к другому. При этом в качестве первого слоя должна выступать конструкция, заполненная порошком ШОВГ, обладающим наименьшим значением относительной магнитной проницаемости (с размером фракций 5 мкм), второго и третьего – порошком ШОВГ с размером фракций 20 и 30 мкм соответственно. При этом будет улучшено согласование волновых сопротивлений начальной среды распространения электромагнитных волн (т. е. воздуха) и материала подобной экранирующей конструкции, что приведет к уменьшению ее коэффициента отражения и расширению рабочего диапазона частот относительно соответствующих параметров однослойных конструкций [20]. Кроме того, ШОВГ может быть использован:

1. В качестве наполнителя при изготовлении конструкций плоских одно- и многослойных экранов ЭМИ композиционного типа [21–24], характеризующихся в зависимости от типа связующего (раствор портландцемента, силикон и т. д.) различными физическими свойствами.

2. При изготовлении покрытий либо заполняющих растворов для конструкций экранов ЭМИ с геометрически неоднородной поверхностью [25].

3. При формировании строительных материалов.

Библиографический список

1. Баканов Г.Ф., Соколов С.С., Суходольский В.Ю. Основы конструирования и технологии радиоэлектронных средств. – М.: Академия, 2007. – 368 с.
2. Гуревич А.Г. Магнитный резонанс в ферритах и антиферромагнетиках. – М.: Наука, 1973. – 593 с.
3. Справочник по чугунному литью / Под ред. Н.Г. Гиртовича. – Ленинград: Машиностроение, 1978г. – 758 с.
4. Благодоров Б.П., Грачев В.А., Сухарчук Ю.С. и др. Печи в литейном производстве: Атлас конструкций – М.: Машиностроение, 1989. – 156 с.
5. Бойправ О.В., Неамах М.Р., Соколов В.Б. Экраны электромагнитного излучения на основе порошкообразных отходов очистки ваграночных газов // Доклады БГУИР. – 2012. – № 1 (63). – С. 70–75.
6. Бойправ О.В., Неамах М.Р., Соколов В.Б., Борботько Т.В. Экраны электромагнитного излучения на основе ферромагнитных материалов / Материалы Международного научно-технического семинара «Телекоммуникации: сети и технологии, алгебраическое ко-

- дирование и безопасность данных». Минск, январь-декабрь 2012 г. – Минск, БГУИР, 2012. – С. 75–79.
7. Великанов Д.А., Юркин Г.Ю., Патрин Г.С. Стабилизация параметров механических колебаний образца в вибрационном магнитометре // Научное приборостроение. – 2008. – № 3 (18). – С. 86–94.
 8. Мишин Д.Д. Благонравов Б.П., Грачев В.А., Сухарчук Ю.С. и др. Печи в литейном производстве: Атлас конструкций – М.: Машиностроение, 1989. – 156 с.
 9. Материалы микроэлектронной техники / Под ред. В.М. Андреева. – М.: Радио и связь, 1999. – 352 с.
 10. Преображенский А.А., Бишард Е.Г. Магнитные материалы и элементы. – М.: Высш. шк., 1986. – 352 с.
 11. Восновский С.В. Магнетизм. – М.: Наука, 1971. – 1032 с.
 12. Белов К.П. Магнитные превращения. – М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1959. – 260 с.
 13. Ивлев Ю.Н. Химия радиоматериалов: курс лекций. Часть 1. – М., 2002. – 135 с.
 14. Смит Я., Вейн Х. Ферриты. – М.: Иностранная литература, 1962. – 504 с.
 15. Уфимцев П.Я. Метод краевых волн в физической теории дифракции. – М.: Советское радио, 1962. – 244 с.
 16. Ландау Л.Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика. В 10-ти т. Т. VIII. Электродинамика сплошных сред: Учеб. пособие. – 4-е изд., испр. и доп. – М.: Наука, 1987. – 607 с.
 17. Алексеев А.Г., Штагер Е.А., Козырев С. В.. Физические основы технологии Stealth – СПб.: ВВМ, 2007. – 356 с.
 18. Козловский В.В., Софиенко И.И. // Вісник ДУІКТ. – 2009. – № 7 (3). – С. 233–245.
 19. Бойправ О.В., Неамах М.Р. Использование шлама очистки ваграночных газов для изготовления экранов электромагнитного излучения // Материалы 12-ой Международной научной конференции «Сахаровские чтения 2012 года: экологические проблемы XXI века». Минск, МГЭУ им. А.Д.Сахарова, 17 – 18 мая 2012 г. – Минск, 2012. – С. 303–304.
 20. Бойправ О.В., Неамах М.Р., Тимофеева И.А. Экраны электромагнитного излучения на основе мелкодисперсных порошкообразных материалов // Материалы 8-ой международной молодежной научно-технической конференции «Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций «РТ-2012». Севастополь, 23 – 27 апреля 2012 г. – Севастополь, 2012. – С. 388.
 21. Бойправ О.В., Неамах М.Р., Аль-Саиди Р.Т. Композиционные материалы для экранирования электромагнитных излучений // Материалы международной научно-технической

- конференции «Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии». Могилев, Белорусско-российский университет, 19 – 20 апреля 2012 г. – Могилев, ГУ ВПО «Белорусско-российский университет», 2012. – С. 110–111.
22. Бойправ О.В., Неамах М.Р., Степанова Е.А., Борботько Т.В. Материалы на основе мелкофракционных металлосодержащих порошков для ослабления электромагнитных излучений // Материалы VII Международной научно-технической конференции «Современные методы и технологии создания и обработки материалов». Минск, 19 – 21 сентября 2012 г. – Минск, ФТИ НАН Беларуси, 2012. – С. 293–297.
23. Бойправ О.В., Неамах М.Р., Лыньков Л.М., Борботько Т.В., Соколов В.Б. Многослойные экраны электромагнитного излучения на основе мелкодисперсных порошкообразных материалов для защиты серверных комнат // Безопасность информационных технологий. – 2012.– №1. – С. 48–50.
24. Бойправ О.В., Неамах М.Р., Борботько Т.В. Гибкие конструкции экранов электромагнитного излучения на основе шлама очистки ваграночных газов // Материалы IX Международной научно-практической конференции «Управление информационными ресурсами». Минск, 21 ноября 2012 г. – Минск, 2012. – С. 67–68.
25. Бойправ, О. В., Неамах М.Р., Аль-Саиди Р.Т. Экраны электромагнитного излучения с геометрически неоднородной поверхностью на основе порошкообразных материалов // Материалы I Республиканской научной конференции студентов, магистрантов и аспирантов «Актуальные вопросы физики и техники». Гомель, 17 апреля 2012 г. – Гомель, ГГУ им. Ф. Скорины, 2012. – С. 16–18.