

Повышение радиоэкранирующих свойств строительных материалов в СВЧ диапазоне

Даниил Сергеевич Подгорный , Михаил Юрьевич Елистраткин , Диана Олеговна Бондаренко ,
Валерия Валерьевна Строкова* 

Белгородский государственный технологический университет им В.Г. Шухова, Белгород, Россия

* Автор, ответственный за переписку: e-mail: vvstrokova@gmail.com

АННОТАЦИЯ

Введение. Интенсивное развитие техники в современном мире сопровождается возникновением новых типов техногенных опасностей, одной из которых является микроволновое излучение. Несмотря на значительный спектр защитных материалов, не все они пригодны для строительных целей. Основным препятствием является их достаточно высокая стоимость, а интеграция их в основные виды стеновых строительных материалов требует существенных изменений технологий их производства. Наиболее реалистичным и рациональным путем решения проблемы является введение в традиционно применяемые для получения строительных изделий бетоны и растворы специальных добавок. В статье исследовано влияние добавок тонкодисперсного технического углерода и алюминиевой пудры в составе цементной и гипсовой матриц на радиоэкранирующие свойства в диапазоне частот 1800–2800 МГц. **Материалы и методы исследования.** Порошок технического углерода добавляли в цементное и гипсовое тесто в дозировках 0, 2,5, 5%, алюминиевую пудру добавляли в гипсовое тесто в дозировках 0, 2,5, 5%. Исследованы предварительно насыщенные водой суперабсорбирующие полимеры. Изучены радиоэкранирующие свойства на разработанной экспериментальной лабораторной установке с применением векторного анализатора цепей NanoVNA. **Результаты и обсуждения.** Рассмотрено влияние на прочностные и СВЧ-защитные свойства гипсового и цементного камня добавок технического углерода и алюминиевой пудры. Установлено, что добавка технического углерода в количестве до 3–3,5% от массы цемента показывает нейтральное влияние на прочность цементного камня, обеспечивая снижение уровня сигнала около 50% (–6 дБ), наблюдаемое в диапазонах 1800–2100 МГц и 2300–2650 МГц, что делает данную добавку перспективной для решения обозначенной задачи. При введении добавок в гипсовую матрицу добавка технического углерода обеспечивает снижение уровня излучения до 60% (–8 дБ), а алюминиевая пудра до 69% (–10 дБ) в дозировке не более 5% от массовой доли вяжущего на образцах толщиной 3 см. Однако рассмотренные добавки оказывают ощутимое негативное влияние на прочностные показатели гипсового камня, что позволяет рекомендовать применение только технического углерода в количестве не более 2,5% для получения изделий, не требующих высокой прочности. **Заключение.** Обозначены проблемы создания строительных материалов для снижения уровня СВЧ излучения в исследуемом диапазоне частот. Получены данные по увеличению экранирующей способности цементных и гипсовых вяжущих с применением добавок.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: строительные материалы, СВЧ, микроволновое излучение, экранирование, защита.

БЛАГОДАРНОСТИ: Работа выполнена в рамках реализации государственного задания Минобрнауки РФ № FZWN-2023-0006 с использованием оборудования Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Подгорный Д.С., Елистраткин М.Ю., Бондаренко Д.О., Строкова В.В. Повышение радиоэкранирующих свойств строительных материалов в СВЧ диапазоне // Нанотехнологии в строительстве. 2024. Т. 16, № 2. С. 100–108. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2024-16-2-100-108>. – EDN: PVPKOA.

ВВЕДЕНИЕ

Быстрое развитие технологий в современном мире приводит к появлению новых видов техногенных опасностей, которые могут представлять угрозу для

человеческого здоровья и окружающей среды. Одной из таких опасностей является микроволновое излучение, которое используется в различных технических устройствах, начиная от микроволновых печей и заканчивая беспроводными коммуникаци-

онными сетями. В настоящее время ученые выделяют два основных принципа воздействия таких излучений на организм человека: тепловое и информационное. Под первым понимается нагрев вещества за счет взаимодействия излучения с дипольными молекулами. Второй же подразумевает изменение поведения клеток организма с последующим нарушением работы системы и увеличением риска заболеваний. Целый ряд статистических исследований указывает на то, что электромагнитное поле (ЭМП) способно провоцировать развитие онкологических, сердечно-сосудистых заболеваний и заболеваний нервной системы [1–6].

Некоторые авторы указывают на повышенный риск канцерогенеза для людей, часто использующих мобильные телефоны [2]. Отмечают, что именно импульсное СВЧ излучение оказывает отрицательное влияние на организм человека. Отдельной группой риска выделяют людей, проживающих в непосредственной близости (радиус до 400 м) к базовым станциям (БС) сотовой связи. Согласно исследованиям [2, 3], для данной группы повышается риск развития онкологии головного мозга в течение 10 лет проживания рядом с БС.

На основании вышесказанного можно сделать вывод, что создание материалов для контроля СВЧ излучения может стать одной из ключевых задач строительного материаловедения в ближайшие годы. Одним из ключевых аспектов для создания таких материалов является развитие отечественной приборной базы для проведения соответствующих исследований.

Исследователи указывают несколько аспектов, которые обуславливают высокие радиопоглощающие характеристики материалов при прохождении через них СВЧ излучений:

- релаксационные потери, характерные для дипольных молекул, например, воды;
- электрические потери, связанные с преобразованием электромагнитной волны в вихревые электрические токи в материале, а затем в тепло;
- магнитные потери (характерные для ферромагнетиков).

Классическим методом экранирования электромагнитных излучений, изоляции от них замкнутых объемов является применение клетки Фарадея, т.е. металлической сетки или листа. Этот метод обусловлен электропроводностью металлов и скин-эффектом, размер ячейки экранирующей сетки должен уменьшаться пропорционально длине волны, которую необходимо экранировать.

Однако интеграция металлических наполнителей и сеток в конструкции здания крайне затруднительна с технологической точки зрения и может способствовать созданию множественных переотражений внутри помещения с образованием «горячих» точек.

В настоящее время существует большое количество специализированных материалов с высокими радиоэкранирующими свойствами в СВЧ диапазоне:

- волокнисто-армированные полимерные композиты (например, эпоксиглепластик), которые отличаются высокими физико-механическими свойствами и степенью поглощения СВЧ волн (снижение уровня ЭМИ может достигать –51 дБ) [10];
- композиты с применением оксидов металлов (Mn, Fe, Ti, Ni, Mg, Co) [11–17]. Например, цепопочечные композиты Fe_3O_4 -поры- mSiO_2 - MnO_2 , представленные в работе [17], демонстрируют снижение уровня проходящего сигнала до 99%;
- однослойные и многослойные углеродные нанотрубки, фуллерены и графен [10, 18–23]. Например, композит с применением оксида графена и полипиррола показывает снижение проходящего сигнала до 99,8 % от базового и составляет –54,4 дБ [20];
- многомерные материалы для поглощения СВЧ излучения, имеющие высокую эффективность за счет особенностей строения их структуры. Такие материалы могут применяться для снижения излучения в широком частотном диапазоне [24–28];
- функционализированная поверхность с большим количеством дефектов на основе MoS_2 также показывает высокую эффективность при экранировании СВЧ излучения [29].

Такой широкий спектр материалов действительно позволяет снижать уровень излучения в специальных устройствах и конструкциях, однако большинство перечисленных методов имеют ряд недостатков. Как правило, они связаны с высокой стоимостью производства, невозможностью масштабирования технологического процесса, токсичностью применяемых материалов и т.д. При разработке строительных материалов со специальными свойствами необходимо учитывать вышеназванные недостатки, при этом технология должна легко интегрироваться в уже существующие производственные линии.

На наш взгляд, более реалистичным и рациональным путем является введение в традиционно применяемые для получения строительных изделий бетоны и растворы добавок с высокой проводимостью, диэлектрической или магнитной проницаемостью. Такими добавками могут являться железистые рудные порошки и нетоксичные оксиды металлов, минералы и порошки с высоким содержанием углерода. Отдельно стоит отметить, что в настоящее время проведено недостаточно исследований, связанных с изучением СВЧ-свойств кристаллогидратов цементного и гипсового камня.

Анализ научных публикаций [7–31] показал, что при большом интересе научного сообщества к во-

просам разработки специализированных материалов для поглощения, отражения и пропускания микроволнового излучения количество работ, посвященных строительным материалам, крайне мало, что обуславливает актуальность их изучения.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Исследования производились на разработанной авторами установке [32] (рис. 1).

Установка представляет собой две рупорные антенны, между которыми помещается исследуемый образец. В качестве генератора и анализатора сигнала применялся векторный анализатор цепей NanoVNA V2 (S-A-A-2), предварительно откалиброванный по методике SOLT. Измерения проводились в спектре наиболее часто применяемых частот в современной СВЧ технике (1800–2800 МГц). Анализ и вывод данных производился при помощи нативного программного обеспечения для векторного анализатора NanoVNA – VNA QT. Полученные данные представляют собой S-параметры падающей и отраженной волны, прошедшей через антенны на порты устройства. Для измерения поглощения был использован LOGMAG S_{12} (логарифмическая величина проходящего сигнала) параметр устройства.

Камера для установки образца разработана под использование образцов размерами 200×200×30 мм, что позволяет считать материал, содержащий заполнитель до 10 мм, квазиоднородным. Для исследования сыпучих и жидких материалов применяется

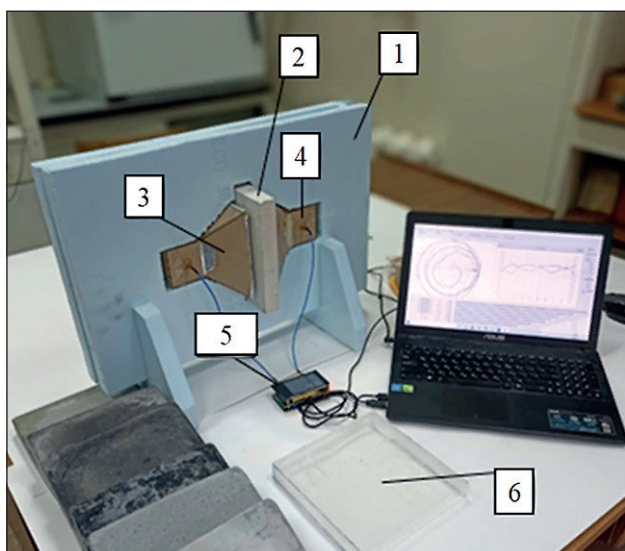


Рис. 1. Прототип установки для исследования радиозащитных свойств материалов в СВЧ диапазоне: 1 – держатель антенн (корпус), 2 – образец, 3, 4 – антенны, 5 – векторный анализатор цепей, 6 – ячейка для жидких и сыпучих материалов

Таблица 1

Элементный состав технического углерода

Элемент	Содержание, мас. %
C	90–99
H	0,3–0,5
O	0,1–7
S	0–1,5
Si	0–0,5

ся специальная ячейка размером 200×200×30 мм со стенками толщиной 1 мм, выполненная из полиметилметакрилата.

Для получения радиопоглощающих материалов применялись гипс ГВВС-16 и цемент ЦЕМ I 42,5 Н. Данные вяжущие широко используются в промышленности строительных материалов для получения широкой номенклатуры продукции.

Первая радиозащитная добавка – технический углерод по ГОСТ 7885–86 – применялась как в цементной, так и в гипсовой матрицах. Химический состав сажи представлен в табл. 1. Крупность частиц находится в диапазоне 10–1000 нм.

Вторая добавка – алюминиевая пудра по ГОСТ 5494–95 – применялась исключительно как модификатор гипса. Частицы данной пудры представляют собой лепестки толщиной 0,25–0,5 мкм и диаметром 20–30 мкм. Для материалов на основе цемента алюминиевая пудра не применялась, ввиду опасности ее взаимодействия с имеющимися в цементном растворе щелочами.

В качестве контрольных использовали бездобавочные образцы цементного и гипсового камня. Составы всех изученных образцов представлены в табл. 2. Приготовление растворов производилось в лабораторном смесителе СЛ-5.

Во всех составах водо-вяжущее отношение (В/Ц и В/Г) было равно 0,4.

Для оценки радиозащитных свойств водонасыщенных суперабсорбирующих полимеров (САП) применялась специальная ячейка. САП, по нашему предположению, может использоваться как возможный вариант создания защитных СВЧ экранов на основе воды и поглощающего наполнителя для строительных материалов.

Шары САП готовились путем помещения сухих шаров в отдельную емкость с водой до их полного насыщения. За полное насыщение принималось увеличение их диаметра с исходного $r = 2$ мм до максимального $R = 7$ мм, при этом объемное водопоглощение составляет:

$$W = \left(1 - \frac{\frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r^3}{\frac{4}{3} \cdot \pi \cdot R^3}\right) \cdot 100\% = \left(1 - \frac{\frac{4}{3} \cdot 3,14 \cdot 2^3}{\frac{4}{3} \cdot 3,14 \cdot 7^3}\right) \cdot 100\% = 97,67\%.$$

Таблица 2
Исследуемые образцы

№ состава	Вид вяжущего	Вид добавки	Дозировка, %
1	Цемент	без добавки	
2		Технический углерод	2,5
3		Технический углерод	5
4	Гипс	без добавки	
5		Технический углерод	2,5
6		Технический углерод	5
7		Алюминиевая пудра	2,5
8		Алюминиевая пудра	5

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В источниках [7, 8] приводятся результаты оценки СВЧ защитных свойств некоторых традиционных стеновых материалов, которые показывают, что классические строительные материалы обладают достаточно слабыми защитными свойствами и, следовательно, требуют дополнительных мер по их повышению за счет:

- их комбинирования со специальными материалами с высокими радиозащитными свойствами (штукатурки, краски, плитки, пленки и т.п.);
- введения в них на этапе изготовления специальных добавок, повышающих их радиозащитные свойства.

Второй способ является наиболее перспективным в связи с отсутствием необходимости внесения существенных изменений в технологии как производства материалов, так и применения в строительстве.

На первом этапе исследований была осуществлена оценка влияния радиозащитных добавок на прочностные свойства цементной и гипсовой матриц (табл. 3, 4).

Введение технического углерода (табл. 3) в количестве 2,5% повышает прочность камня на 14–17% во все сроки твердения, что при достаточных

защитных свойствах делает эту добавку пригодной для модификации цементных материалов. Следует учитывать, что в составе реальных бетонов основная доля объема материала формируется заполнителем, что делает расход данной добавки на кубометр сравнительно небольшим.

Повышение расхода добавки до 5% в ранние сроки нейтрально сказывается на прочности, однако в марочном возрасте наблюдается ее снижение более чем на 12%. Данная дозировка добавки может быть оправдана существенно более высоким достигаемым уровнем защитных свойств, при котором потеря прочности может быть скомпенсирована повышением расхода цемента в бетоне. Более высокие дозировки добавки сажи нецелесообразны, а рекомендуемым максимальным количеством, исходя из нейтрального влияния на прочность, является 3–3,5%.

Рассмотренные экранирующие добавки значительно снижают прочность гипсового камня (табл. 4). В среднем, падение прочности, в случае с добавкой алюминиевой пудры во всем диапазоне рассмотренных дозировок составляет более 70%. Это свидетельствует о необходимости существенного уменьшения ее расхода, что негативно скажется на защитных свойствах материала.

Таблица 3
Прочностные характеристики образцов на цементном вяжущем

Дозировка технического углерода в цементной матрице, %	Прочность, МПа / % изменения по отношению к контрольному		
	2 сут	7 сут	28 сут
—	21,4	42,2	61,9
2,5	25,1 / +17,6	49,7 / +17,7	70,9 / +14,5
5	21,6 / +1,1	43,3 / +2,6	54,1 / –12,5

Таблица 4
Прочностные характеристики высушенных образцов на гипсовом вяжущем в возрасте 7 сут

Вид добавки	Дозировка, %	Прочность, МПа / % изменения
—	—	33,2
Алюминиевая пудра	2,5	9,5 / –71,4
	5	7,2 / –78,3
Технический углерод	2,5	20,5 / –38,3
	5	14,4 / –56,6

Добавка технического углерода также отрицательно влияет на прочность, однако в минимальной из рассмотренных дозировок (2,5%) при условии достижения высокого уровня защитных свойств может быть рекомендована для изготовления специальных составов и изделий, к которым не предъявляются высокие требования по прочности.

Далее проведено исследование радиоэкранирующих свойств образцов. Образцы в сухом состоянии

($W_m < 0,5 \%$) помещались рядом с принимающей антенной на расстоянии 1 см, при этом расстояние между апертурами антенн составляло 34 см. При этом расстояние между волноводами составляло 50 см (рис. 2–4).

Гипс с применением технического углерода в качестве радиоэкранирующей добавки показал снижение мощности излучения от 11% (–1 дБ) до 60% (–8 дБ) в диапазонах частот 2000–2400 МГц и 2550–2800 МГц (рис. 2).

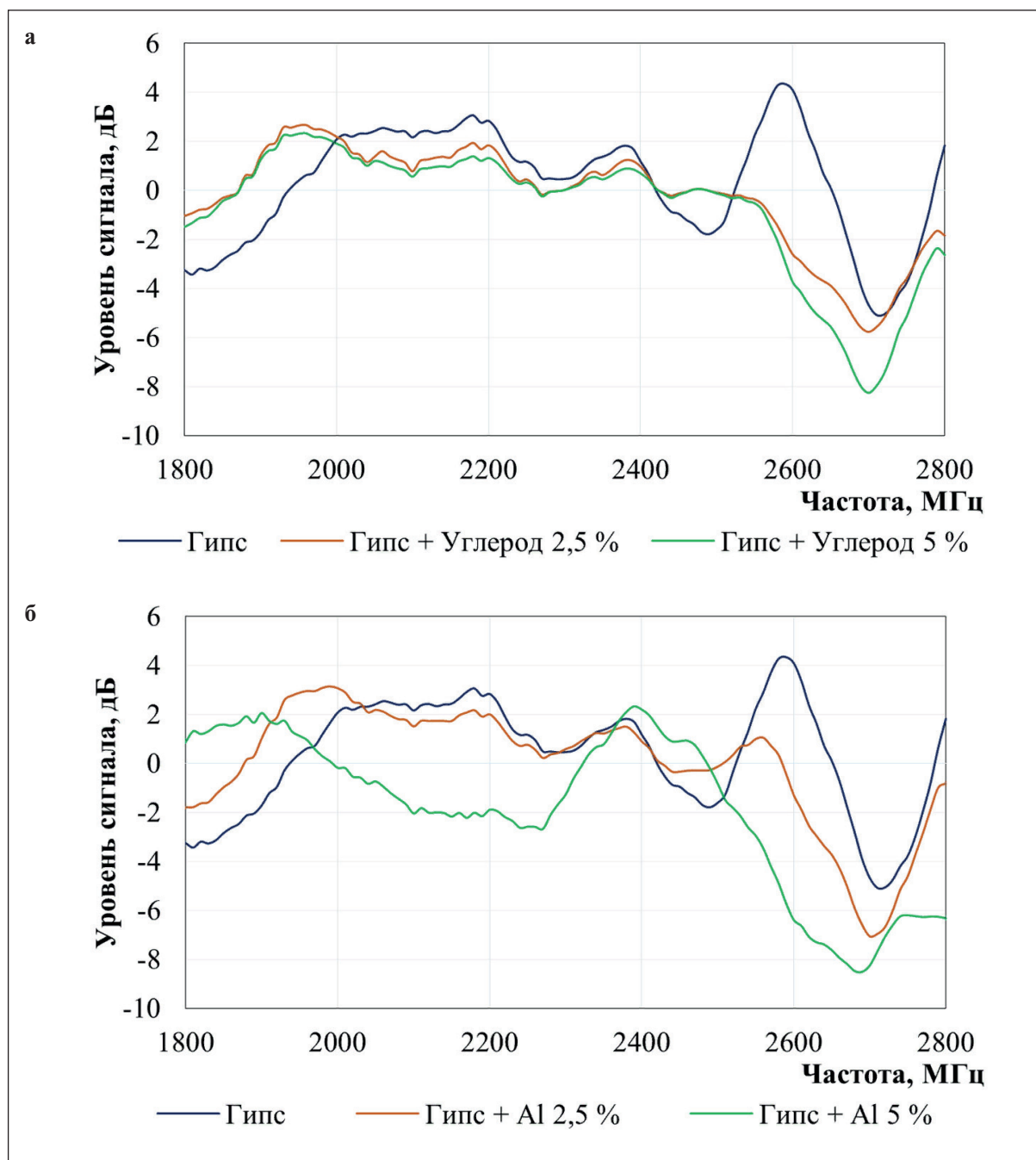


Рис. 2. Влияние добавок в гипсовой матрице на ослабление потока излучения:
а) технический углерод; б) алюминиевая пудра

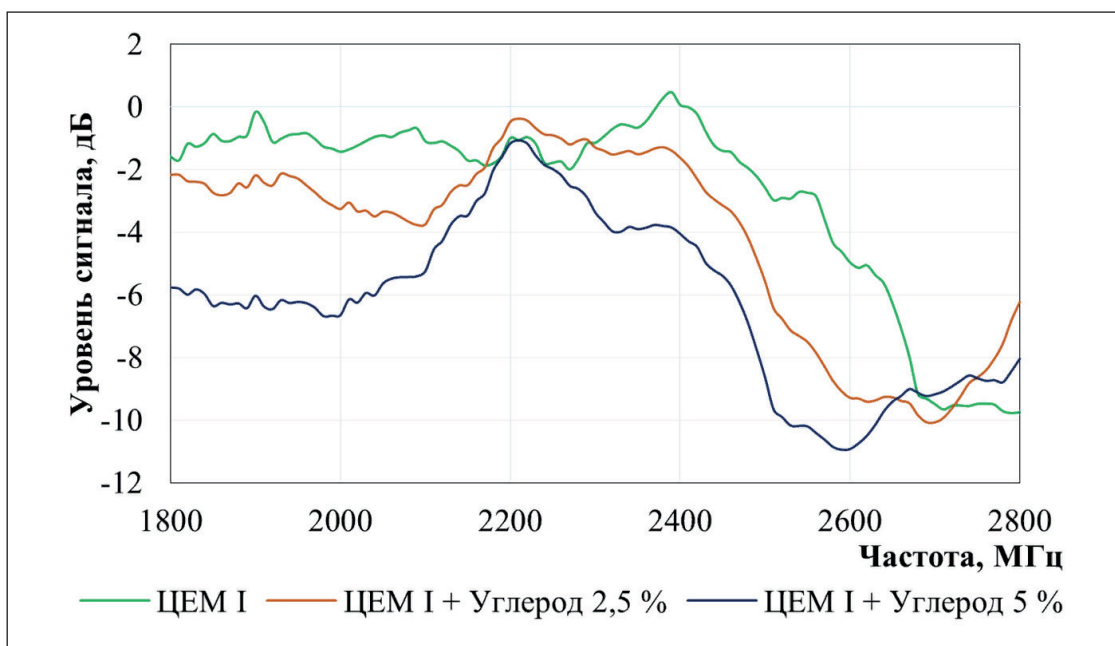


Рис. 3. Влияние технического углерода в цементной матрице на ослабление потока излучения

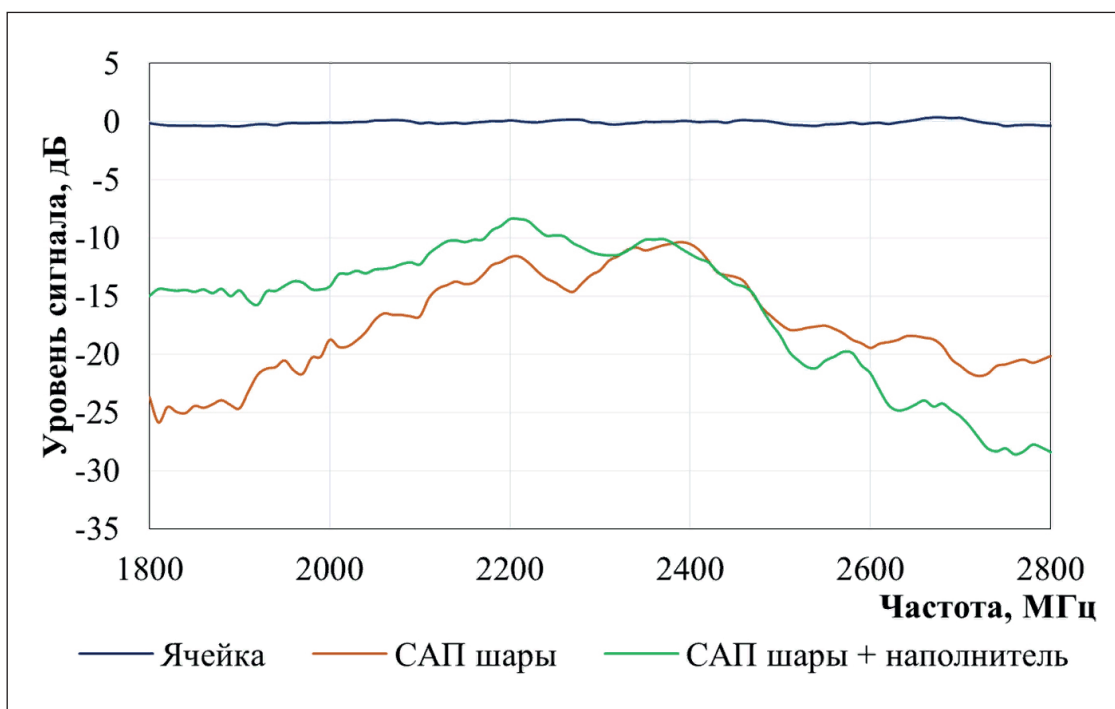


Рис. 4. Радиозэранирование водонасыщенными суперабсорбирующими полимерами

Обращают на себя внимание участки графиков, где на некоторых частотах наблюдается превышение уровня сигнала выше 0 дБ. Данная аномалия может быть связана с рядом физических эффектов: интерференцией волны, сдвигом фазы волны, генерацией вторичных волн, кроме того, гипсовый камень может выступать в качестве, так называемой,

СВЧ-линзы. Для уточнения природы данного явления необходимо проведение дополнительных исследований, однако сам факт обуславливает необходимость внимательно подходить к выбору материала для экранирования определенного диапазона, а также искать средства уменьшения данного явления.

Значительное влияние алюминиевой пудры на радиоэкранирующие свойства в гипсовой матрице наблюдается только при дозировке 5%. Снижение уровня излучения в данном случае составляет от 11% (–1 дБ) до 69% (–10 дБ) в диапазонах частот 1980–2350 МГц и 2520–2800 МГц.

Углеродная добавка к цементной матрице показывает свою эффективность в диапазонах частот 1800–2100 МГц и 2300–2650 МГц. При этом среднее снижение мощности сигнала составляет 50% (–6 дБ).

Дополнительно была осуществлена оценка экранирующих качеств водонасыщенных суперабсорбирующих полимеров, которые могут применяться в качестве замены воды в различных защитных оболочках. Использование воды в подобном имобилизованном виде позволяет полностью исключить риск ее утечек при повреждении защитной конструкции. Были рассмотрены два вида наполнения:

- только шары САП со средним диаметром 7 мм;
- шары, с заполнением межзерновых пустот гелем из суперабсорбирующего полимера (наполнитель).

Исследование помех, вносимых специальной ячейкой для жидких и сыпучих материалов, показало, что они составляют не более 2% (0,2 дБ).

Исследование САП с наполнителем (рис. 4) показало максимальное снижение уровня излучения до 96% (–28 дБ), наименьшее – 60% (–8 дБ) при толщине всего 30 мм, что обусловлено высокой диэлектрической проницаемостью воды и высокой степенью поглощения энергии ею в данном диапазоне частот. При использовании шаров без наполнителя минимальное значение снижения мощности составило 72% (–11 дБ), максимальное – 94% (–25 дБ). Наибольшая степень экранирования достигается в диапазоне частот 1800–2350 МГц. Более высокая эффективность шаров без наполнителя может быть обусловлена множественными фазовыми переходами (САП – воздух) и, как следствие, множественным преломлением вектора распространения сигнала с последующей потерей энергии.

Полученные результаты показывают, что использование САП в архитектурно-декоративных изделиях может значительно повысить их радиоэкранирующие свойства в СВЧ диапазоне, а также архитектурную выразительность, например, путем использования в качестве заполнителя для прозрачных конструкций (витражей, окон и т.п.). Важно отметить, что САП имеют свойство терять воду при

нормальных условиях и, как следствие, применимы в изолированных системах, например, при использовании их в качестве заполнителя водонепроницаемых эпоксидных смол.

ВЫВОДЫ

Контроль уровня электромагнитных излучений СВЧ диапазона в зданиях и сооружениях может стать важным шагом к снижению риска возникновения целого ряда заболеваний человека при его длительном пребывании в зонах с повышенным уровнем СВЧ излучения.

Перспективным направлением является повышение СВЧ защитных свойств традиционных строительных материалов, применяемых для возведения и отделки стен за счет введения в матрицу подобных композитов электропроводящих добавок (технического углерода и алюминиевой пудры).

Добавка технического углерода в количестве до 3–3,5% от массы цемента показывает нейтральное влияние на прочность цементного камня, обеспечивая снижение уровня сигнала около 50% (–6 дБ), наблюдаемое в диапазонах 1800–2100 МГц и 2300–2650 МГц, что делает данную добавку перспективной для решения обозначенной задачи.

При введении добавок в гипсовую матрицу добавка технического углерода обеспечивает снижение уровня излучения до 60% (–8 дБ), а алюминиевая пудра – до 69% (–10 дБ) в дозировке не более 5% от массовой доли вяжущего на образцах толщиной 3 см. Однако рассмотренные добавки оказывают ощутимое негативное влияние на прочностные показатели гипсового камня, что позволяет рекомендовать применение только технического углерода в количестве не более 2,5% для получения изделий, не требующих высокой прочности, что вполне типично для решаемых гипсом строительных задач.

Водонасыщенные САП могут использоваться как наполнитель для архитектурно-строительных композитов с повышенными радиоэкранирующими свойствами. Эффективность данного наполнителя может достигать 96% (–28 дБ) при плотной упаковке шаров диаметром 7 мм при общей толщине слоя 30 мм. Отдельно стоит отметить возможность повышения их архитектурной выразительности архитектурно-строительных форм при использовании САП, например, в качестве заполнителя для прозрачных конструкций (витражей, окон и т.п.).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Козлов А.Н. Модель для оценки поражающего действия мощного СВЧ-излучения на объекты ракетной техники // Вестник Ижевского государственного технического университета. 2007. № 3 (35). С. 109–111.
2. Durusoy R., Hassoy H. Electromagnetic fields from mobile phones and their base stations: health effects. Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences. Encyclopedia of Environmental Health (Second Edition). 2019: 300–314.
3. Kundi M., Hutter H.P. Mobile phone base stations – Effects on wellbeing and health. Pathophysiology. 2009; 16. Issue 2–3: 123–135.
4. Григорьев Ю.Г. Мобильная связь и электромагнитная опасность для здоровья населения. Современная оценка риска – от электромагнитного смога до электромагнитного хаоса (обзор литературы) // Вестник новых медицинских технологий. 2019. Т. 26. № 2. С. 88–95.
5. Григорьев Ю.Г. От электромагнитного смога до электромагнитного хаоса. К оценке опасности мобильной связи для здоровья населения // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2018. Т. 63. № 3. С. 28–33.
6. Давыдова Т.И. Защита от электромагнитных СВЧ-полей // Автоматизация процессов управления. 2008. № 3. С. 65–68.
7. Аполлонский С.М. Защита техносферы от воздействия физических полей и излучений: монография. Т. 1. Виды физических полей и излучений. Нормативно-правовые документы. М.: Русайнс, 2018. 332 с.
8. Аполлонский С.М. Защита техносферы от воздействия физических полей и излучений: монография. Т. 2. Защитные материалы от физических полей и излучений. М.: Русайнс, 2016. 339 с.
9. Беляев А.А., Беспалова Е.Е., Лепешкин В.В. Радиопоглощающие материалы на основе отделочных строительных материалов для защиты от СВЧ излучения базовых станций сотовой связи // Труды ВИАМ. 2015. № 6. С. 80–88.
10. Кулик В.И., Нилов А.С. Перспективы применения полимерных композиционных материалов, армированных углеродными наноразмерными наполнителями, для экранов электромагнитного излучения // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. 2019. № 1–2 (127–128). С. 120–127.
1. Jia H., Xing H., Ji X., Gao S. Self-template and in-situ polymerization strategy to lightweight hollow MnO_2 @ polyaniline core-shell heterojunction with excellent microwave absorption properties. Applied Surface Science. 2021; 537. Article number 147857.
2. Du Y.C., Liu W.W., Qiang R., Wang Y., Han X.J., Ma J., Xu. Shell thickness-dependent microwave absorption of core-shell Fe_3O_4 @C composites. ACS Applied Materials & Interfaces. 2014; 6: 12997–13006.
3. Liu Q.H., Cao Q., Bi H., Liang C.Y., Yuan K.P., She W., Yang Y.J., Che R.C. CoNi@ SiO_2 @ TiO_2 and CoNi@ air@ TiO_2 microspheres with strong wideband microwave absorption. Advanced Materials. 2016; 28: 486–490.
4. Kang S., Qiao S., Cao Y., Hu Z., Yu J., Wang Y., Zhu J. Hyper-Cross-Linked polymers-derived porous tubular carbon nanofibers@ TiO_2 toward a wide-band and lightweight microwave absorbent at a low loading content. ACS Applied Materials & Interfaces. 2020; 12: 46455–46465.
5. Liu X., Chen Y., Cui X., Zeng M., Yu R., Wang G.S. Flexible nanocomposites with enhanced microwave absorption properties based on Fe_3O_4 / SiO_2 nanorods and polyvinylidene fluoride. J. Mater. Chem. 2015; 3: 12197–12204.
6. Liu T.S., Liu N., Zhai S.R., Gao S.S., Xiao Z.Y., An Q.D., Yang D.J. Tailor-made core/shell/shell-like Fe_3O_4 @ SiO_2 @PPy composites with prominent microwave absorption performance. Journal of Alloys and Compounds. 2019; 779: 831–843.
7. Qiao M., Li J., Wei D., He X., Lei X., Wei J., Zhang Q. Chain-like Fe_3O_4 @void@m SiO_2 @ MnO_2 composites with multiple porous shells toward highly effective microwave absorption application. Microporous and Mesoporous Materials. 2021; 314. Article number 110867.
8. Wu Z., Pei K., Xing L., Yu X., You W., Che R. Enhanced microwave absorption performance from magnetic coupling of magnetic nanoparticles suspended within hierarchically tubular composite. Advanced Functional Materials. 2019; 29. Article number 1910448.
9. Cao M.S., Song W.L., Hou Z.L., Wen B., Yuan J. The effects of temperature and frequency on the dielectric properties, electromagnetic interference shielding and microwave-absorption of short carbon fiber/silica composites. Carbon. 2010; 48: 788–796.
10. Cao M., Wang X., Cao W., Yuan J. Ultrathin graphene: electrical properties and highly efficient electromagnetic interference shielding. Journal of Materials Chemistry C. 2015; 3: 6589–6599.

11. Meng F., Wang H., Huang F., Guo Y., Wang Z., Hui D., Zhou Z. Graphene-based microwave absorbing composites: A review and prospective. *Composites Part B Engineering*. 2018; 137: 260–277.
12. Cao M., Cai Y., He P., Shu J., Cao W. 2D MXenes: Electromagnetic property for microwave absorption and electromagnetic interference shielding. *Chemical Engineering Journal*. 2019; 359: 1265–1302.
13. Wu F., Xie A., Sun M., Wang Y., Wang M. Reduced graphene oxide (RGO) modified spongelike polypyrrole (PPy) aerogel for excellent electromagnetic absorption. *Journal of Materials Chemistry A*. 2015; 3: 14358–14369.
14. Li J., Zhou D., Wang P.-J., Du C., Liu W.F., Su J.Z., Pang L.X., Cao M.S., Kong L.B. Recent progress in two-dimensional materials for microwave absorption applications. *Chemical Engineering Journal*. 2021; 425. Article number 131558.
15. Ning M., Lu M., Li J., Chen Z., Dou Y., Wang C., Rehman F., Cao M., Jin H. Two-dimensional nanosheets of MoS₂: a promising material with high dielectric properties and microwave absorption performance. *Nanoscale*. 2015; 7: 15734–15740.
16. Huang L., Chen C., Li Z., Zhang Y., Zhang H., Lu J., Ruan S., Zeng Y. Challenges and future perspectives on microwave absorption based on two-dimensional materials and structures. *Nanotechnology*. 2020; 31 (16). Article number 162001.
17. Liu J., Zhang H., Sun R., Liu Y., Liu Z., Zhou A., Yu Z. Hydrophobic, Flexible, and Lightweight MXene Foams for High-Performance Electromagnetic-Interference Shielding. *Advanced Materials*. 2017; 29. Article number 1702367.
18. Naguib M., Kurtoglu M., Presser V., Lu J., Niu J., Heon M., Hultman L., Gogotsi Y., Barsoum M.W. Two-dimensional nanocrystals produced by exfoliation of Ti₃AlC₂. *Advanced materials*. 2011; 23(37): 4248–4253.
19. Wang H., Ma H. The electromagnetic and microwave absorbing properties of MoS₂ modified Ti₃C₂T_x nanocomposites. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 2019; 30: 15250–15256.
20. Sista K.S., Dwarapudi S., Kumar D., Sinha G.R., Moon A.P. Carbonyl iron powders as absorption material for microwave interference shielding: A review. *Journal of Alloys and Compounds*. 2021; 853. Article number 157251.
31. Графкина М.В., Нюнин Б.Н., Свиридова Е.Ю. Совершенствование системы мониторинга электромагнитной безопасности жилых помещений // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2013. № 4. С. 40–42.
32. Подгорный Д.С., Елистраткин М.Ю., Бондаренко Д.О., Алфимова Н.И., Строкова В.В. Установка для оценки экранирующих свойств строительных материалов в микроволновом диапазоне // СТИН. 2023. № 8. С. 30–33.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Подгорный Даниил Сергеевич – инженер-исследователь, Инновационный научно-образовательный и опытно-промышленный центр наноструктурированных композиционных материалов, Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Белгород, Россия, dan_podgor@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7435-5005>

Елистраткин Михаил Юрьевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Строительного материаловедения, изделий и конструкций», Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Белгород, Россия, mr.elistratkin@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3303-224X>

Бондаренко Диана Олеговна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Материаловедения и технологии материалов», Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Белгород, Россия, di_bondarenko@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9708-2791>

Строкова Валерия Валерьевна – доктор технических наук, профессор РАН, директор Инновационного научно-образовательного и опытно-промышленного центра наноструктурированных композиционных материалов, заведующий кафедрой «Материаловедения и технологии материалов», Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Белгород, Россия, vvstrokova@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-6895-4511>

ВКЛАД АВТОРОВ

Подгорный Д.С. – обработка и анализ экспериментальных данных с применением методов математического анализа; написание исходного текста статьи; составление итоговых выводов.

Елистраткин М.Ю. – проведение экспериментальной работы; сбор и систематизация экспериментальных данных; консультирование по вопросам строительного материаловедения.

Бондаренко Д.О. – литературный обзор; графическое и табличное представление результатов исследования; анализ результатов исследования.

Строкова В.В. – научное руководство; разработка концепции и развитие методологии исследования; анализ результатов исследования; составление итоговых выводов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 28.02.2024; одобрена после рецензирования 25.03.2024; принята к публикации 02.04.2024.