

Анатолій Сатюков, Анатолій Приступа,  
Володимир Журко, Мстислав Бивалькевич

## РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ВПЛИВУ ВОЛОГОСТІ СТІНОВИХ БУДІВЕЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ НА ПРОХОДЖЕННЯ РАДІОХВИЛЬ НВЧ ДІАПАЗОНУ

**Актуальність дослідження.** Сучасні технічні та інформаційні системи значною мірою використовують надвисокі частоти (1-10 ГГц). Надійність таких систем тісно пов'язана з проходженням НВЧ сигналів крізь різні матеріали. При цьому спостерігається послаблення радіосигналу, ступінь якого великою мірою залежить від рівня вологості речовини. Тому вивчення закономірностей, що пов'язані з проходженням НВЧ радіохвиль через вологі матеріали, є дуже важливим і актуальним завданням.

**Постановка проблеми.** Умови розповсюдження радіохвиль впливають на задачі, що необхідно вирішувати при проектуванні, виготовленні і розміщенні елементів електронних систем радіоканалів. Урахування рівня послаблення сигналів перешкодами дозволяє обрати оптимальні робочі частоти, потужності генераторних елементів, параметри антенних систем та їх розташування, що, у свою чергу, впливає на надійність роботи таких систем, їх заводськість, конкурентну спроможність, економічність.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Питання розповсюдження радіохвиль у повітрі вивчені дуже ретельно і повно. Визначені частоти, на яких спостерігається найменше, а також і найбільше затухання радіохвиль. Це дозволило створити надійні й оптимально структуровані канали бездротового зв'язку.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** В останні роки все більше розвиваються системи радіозв'язку, які працюють в умовах розповсюдження радіохвиль за наявності різноманітних перешкод. Наприклад мобільний зв'язок чи бездротовий інтернет, які працюють у тому числі в приміщеннях і будівлях. Такі параметри каналів радіозв'язку, як потужність передавачів, конструкція та розміщення антен тісно пов'язані з взаємодією радіохвиль з різноманітними перешкодами. Такими перешкодами, зокрема, можуть бути різні будівельні конструкції – стіни, перекриття та ін. Вони послаблюють потужність радіохвиль, що проходять крізь них. Ступінь такого послаблення може суттєво залежати від рівня вологості матеріалу перешкоди. Наведені в різних літературних джерелах дані здебільшого не враховують цього аспекту.

**Мета дослідження** полягає у вивченні впливу вологості стінових будівельних матеріалів на рівень послаблення НВЧ сигналів та визначення частот, на яких спостерігається мінімальний рівень послаблення.

**Виклад основного матеріалу.** Нами були проведені експериментальні дослідження з визначення ступеня послаблення НВЧ сигналів стіновими будівельними матеріалами при різному рівню вологості речовини. Отримані результати порівнювались з проходженням радіохвиль крізь сухий зразок. Це дало змогу з'ясувати саме вплив зміни вологості на послаблення радіосигналу. Вимірювання проводились в діапазоні частот 2–8 ГГц та зміни вологості зразків до 10 %.

Проведено аналіз послаблення сигналу від ступеню вологості на окремих частотах. Здійснено порівняння послаблення радіохвиль різними матеріалами з однаковим рівнем вологості.

**Висновки відповідно до статті.** Для основних стінових будівельних матеріалів – бетон, цегла червона та силікатна, пінобетон – визначені експериментальні залежності послаблення сигналу НВЧ від вологості в смузі частот 2–8 ГГц: діапазони частот з найменшим та найбільшим послабленням НВЧ сигналу.

**Ключові слова:** НВЧ сигнал; послаблення радіохвиль; стінові будівельні матеріали; вологість; експериментальні дослідження.

Рис.: 4. Бібл.: 7.

**Постановка проблеми.** Питання впливу навколишнього середовища на проходження радіохвиль набули актуальності в другій половині ХХ сторіччя. Розвиток декількох напрямків електронної техніки вимагав вивчення впливу середовища на розповсюдження в ньому радіосигналів: радіозв'язок (у тому числі радіо і телебачення), радіолокація та радіонавігація, мобільний телефонний зв'язок, супутникове телебачення, телекомунікаційні системи, бездротовий інтернет, НВЧ розігрів речовини, військова електроніка тощо. Дуже великим поштовхом стала необхідність мати надійний космічний зв'язок.

Розробка електронних пристроїв, що забезпечують роботу таких систем неможлива без урахування питань, пов'язаних з розповсюдженням радіохвиль. Адже при проходженні останніх через навколишнє середовище виникає багато явищ і ефектів: це поглинання електромагнітних хвиль, дифракція на перешкодах та відбивання від різних поверхонь зі зміною (чи без зміни) фази відбитої хвилі, зміна довжини хвилі в речовині та інше.

Умови розповсюдження радіохвиль впливають на величезну кількість конструкційних завдань, що необхідно вирішувати при проектуванні, виготовленні і розміщенні елементів електронних систем відповідного призначення. Як приклад можна назвати вибір робочої частоти, потужність генераторних елементів, параметри антенних систем

та їх розташування, часові режим роботи тощо, що впливає на надійність роботи таких систем, їх завадостійкість, конкурентну спроможність, економічність.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Свого часу були проведені масштабні дослідження по вивченню проходження радіохвиль через атмосферу Землі. Для різних діапазонів були вивчені залежності проходження радіохвиль від географічних та кліматичних факторів, добових та сезонних змін, стану тропосфери та іоносфери при впливу на них космічних явищ. Були виявлені величини послаблення радіосигналів в атмосфері, визначені частоти резонансного поглинання електромагнітних хвиль. Результати висвітлені у великій кількості публікацій, наприклад огляд в [1].

Проведення таких досліджень дозволило створити високоефективні електронні НВЧ системи різноманітного призначення.

По-іншому велись пошуки оптимальної частоти для НВЧ систем, призначених для розігріву речовини, оскільки в цьому випадку потрібно не мінімальне послаблення радіохвиль, а навпаки – максимальне їх поглинання.

Визначальним фактором при цьому є наявність молекул води в різноманітних матеріалах. Відомо, що ефективність послаблення радіохвиль водою починає падати при збільшенні частоти понад 2,6 ГГц. При таких частотах суттєво зменшується коефіцієнт діелектричної проникності, оскільки починають проявлятися інерційні властивості молекули води [2].

З іншого боку, бажано використовувати максимальні частоти, оскільки кінетична енергія обертального руху молекул пропорційна квадрату частоти. Тому чим вище частота, тим більшу енергію набувають молекули води в речовині й відповідно зростає ефективність розігріву.

Для технологічних НВЧ систем нагріву обрано опорну частоту 2,45 ГГц, оскільки при такій частоті молекули води ще «встигають» орієнтуватись за напрямком електричного поля. Бурхливе зростання популярності таких систем (побутовий варіант – мікрохвильова пічка) призвело до того, що в багатьох країнах виділено частотний діапазон, в якому експлуатація НВЧ апаратури не потребує процедури ліцензування. В Україні, як і в деяких інших країнах, межі такого інтервалу відповідають частотам (2,45–2,48) ГГц.

В останній час все ширшого використання набувають бездротові IT-технології, особливо мережі Інтернет. При визначенні частотного діапазону для роботи таких систем значну роль відіграв факт наявності частот, вільних від ліцензування. Тому не випадково одним із параметрів для WI-FI є значення несучої частоти 2,45 ГГц.

За останні роки розроблено широкий асортимент пристроїв для цієї частоти – різноманітні модулі, антени, перетворювачі тощо. Вони є досить дешевими і доступними.

Однак зростання кількості пристроїв у цьому діапазоні збільшує рівні завад, що змушує виробників звертатися до інших частот. Так, зокрема, є системи WI-FI, що працюють на частоті 5,5 ГГц.

Іншим дуже бурхливим напрямом розвитку НВЧ є застосування їх у різноманітних технічних системах, наприклад, у системах позиціонування у виробничих приміщеннях [3].

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Автори свідомо не розглядають увесь велетенський перелік НВЧ пристроїв і систем. Нами виділено лише ті варіанти, в яких апаратура може працювати в закритих приміщеннях і на її надійність можуть впливати процеси взаємодії радіохвиль з перешкодами.

Вся вищезгадана електронна техніка буде ефективно функціонувати, якщо при її створенні й експлуатації будуть враховані відповідні аспекти взаємодії електромагнітних хвиль з речовиною, або з середою їх розповсюдження. Водночас можна зауважити певні суперечності в деяких підходах до цього питання.

Як вже згадувалось, питання розповсюдження радіохвиль в атмосфері вивчені ретельно і системно. Це дозволило створити телекомунікаційні системи, надійний космічний зв'язок, різноманітну НВЧ апаратуру тощо. [4] Проте робота НВЧ систем у приміщеннях з великою кількістю перешкод може суттєво відрізнятись від роботи розглянутих вище НВЧ

## TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

систем, зокрема значення несучої частоти. Перешкоди, якими можуть бути різні будівельні конструкції – стіни, перекриття, тощо, послаблюють потужність радіохвиль, що проходять скрізь них. Ступінь такого послаблення може суттєво залежати від рівня вологості матеріалу перешкоди. Наведені в різних літературних джерелах дані здебільшого не враховують цього аспекту. Ті ж публікації, які стосуються цього питання, мають багато «білих» плям.

Так у [2; 5] розглянуто зменшення діелектричної проникності в чистій воді. Проте волога, що знаходиться в реальних речовинах, зазвичай неповною мірою відповідає параметрам такої води. З цього погляду корисно мати більш детальну інформацію про вплив вологості на проходженні НВЧ радіохвиль через різноманітні будівельні матеріали, в яких вода знаходиться у зв'язаному стані з молекулами речовини.

**Мета дослідження:** визначення впливу вологості стінових будівельних матеріалів на рівень послаблення НВЧ сигналів та визначення частот з мінімальним рівнем такого послаблення.

**Виклад основного матеріалу.** При визначенні впливу вологості будівельних матеріалів на проходженні НВЧ сигналів через них були визначені такі умови:

1. За зразки були обрані стінові матеріали, які широко використовуються при спорудженні звичайних будівель, а саме – цегла червона, цегла силікатна, бетон, пінобетон.

2. Вологість зразків змінювалась у межах від 1 до 10 %. Більший вміст вологи в звичайних умовах маловірогідний. Він може існувати в поверхневих шарах зовнішніх стін під час атмосферних опадів, а також у вологих підвальних та напівпідвальних виробничих приміщеннях, деяких підземних об'єктах. Для створення апаратури, що може працювати в таких умовах, треба проводити додаткові дослідження, які авторами цієї статті за мету не ставились.

3. Обрано частотний діапазон (2–8) ГГц, який перекриває робочі частоти існуючих технічних та інформаційних систем.

Вимірювання проводились за допомогою панорамного вимірювача КСХН та послаблення Я2Р-67 за стандартною методикою з набором генераторів змінної частоти ГКЧ-52, ГКЧ-53, ГКЧ-57. Як передавальні та сприймальні елементи використовувались хвилеводно-коаксіальні переходи [6–7]. Елементи НВЧ тракту (спрямовані відгалужувачі, детекторні головки, випромінювачі, приймальні елементи, узгоджені навантаження) обирались відповідно до діапазону, в якому проводились вимірювання. Зовнішній вигляд експериментальної установки представлено на рис. 1.



Рис. 1. Зовнішній вигляд експериментальної установки:

- 1 – генератор змінної частоти ГКЧ-52; 2 – генератор змінної частоти ГКЧ-57;  
3 – генератор змінної частоти ГКЧ-53; 4 – індикатор КСХН та послаблення Я2Р-67;  
5 – передавальна антена; 6 – приймальна антена

Визначена вологість зразків досягалась таким чином. На добре висушений зразок додавалась певна кількість води відповідно до його маси. Зразок витримувався в герметичному стані декілька годин для рівномірного розподілення води в ньому. У випадках малої гігроскопічності деяких матеріалів (цегла силікатна, бетон) і великих рівнів вологості вода додавалась в декілька прийомів. Таким чином, вологість зразків змінювалась від 1 до 10 % з інтервалом через один відсоток.

В якості калібрувальної було взято залежність потужності сигналу, що пройшов через сухий зразок. На рис. 2–4 зображена різниця між потужністю сигналу при визначеному рівні вологості і калібрувальною залежністю.

На рис. 2 наведено отримані залежності послаблення НВЧ сигналів будівельними матеріалами від частоти сигналу при різній вологості зразків.

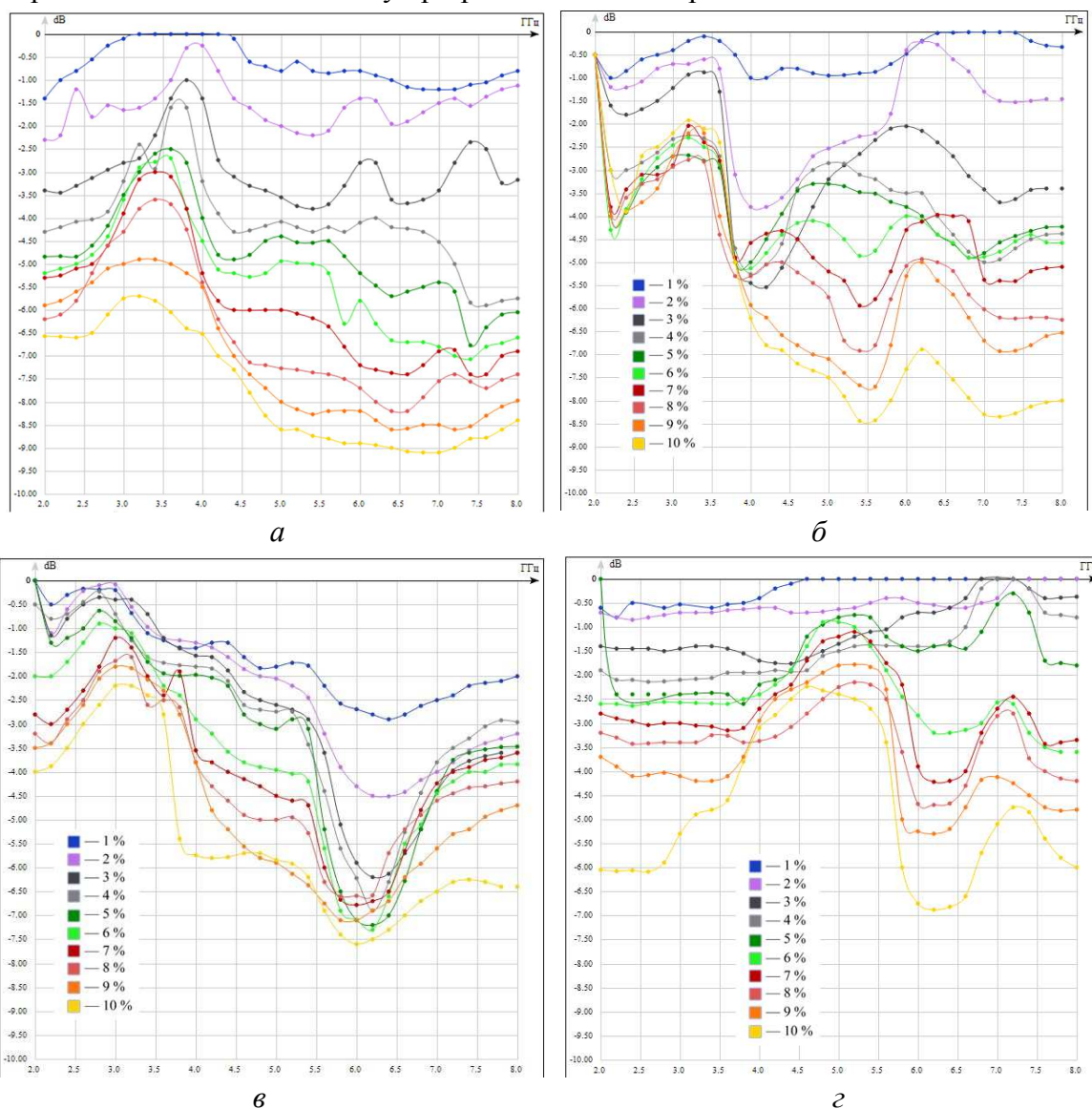


Рис. 2. Залежності послаблення НВЧ сигналу від частоти сигналу при різній вологості для: а – бетону; б – червоної цегли; в – силікатної цегли; г – піску; д – пінобетону

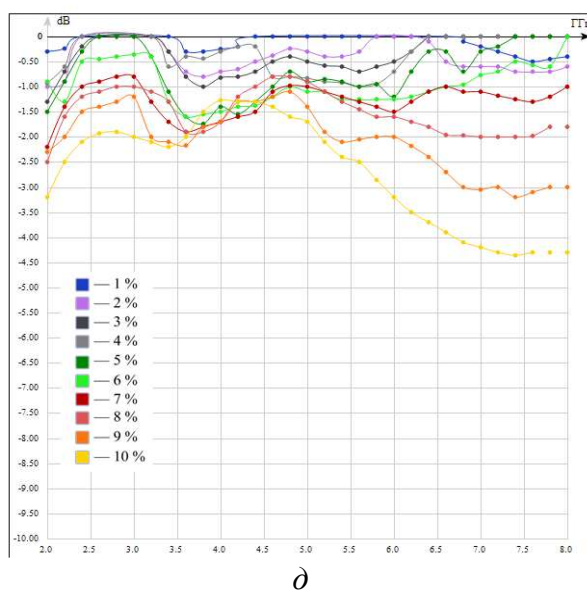


Рис. 2, аркуш 2

### Результати експериментальних досліджень.

Досить складний характер експериментальних залежностей можна пояснити наступним. У випадках, коли досліджувалась взаємодія електромагнітних хвиль з чистою водою, взаємодія хвиль з речовиною визначалась насамперед властивостями молекул саме води. На потужність радіохвиль при їх проходженні через реальне вологе середовище впливає багато чинників. Назвемо деякі з них.

Вода, що потрапляє в речовину, не є чистою водою. Це скоріше специфічний розчин з великою кількістю компонентів. Звичайно, взаємодія молекул води з хвилями має місце, але до неї ще додається взаємодія хвиль з домішками. У будівельних матеріалах вода може знаходитись у різних станах. По-перше, у процесі затвердіння багатьох будівельних матеріалів відбувається перехід молекул води у зв'язаний стан. По-друге, при зволоження речовини молекули води взаємодіють з частинками даної речовини. Це дуже істотний факт, бо тут можливий перехід електронів між існуючими енергетичними рівнями, або утворення нових рівнів. По-третє, в пористих матеріалах вода може утворювати мікрокраплі, тобто перебувати в звичайному рідкому стані.

Самі ж будівельні матеріали також являють собою досить складну систему. Вони можуть бути однорідними за густиною, наприклад, силікатна цегла, будівельний гіпс; можуть мати порожнини різної величини – пінобетон, червона цегла. При цьому слід зазначити, що будова останніх двох речовин може бути принципово різною. Якщо в першому існує велика кількість більш-менш подібних за розмірами і розподілених по всьому об'єму порожнин, то в другому процес обпалювання утворює велику кількість різних шпарин, розривів тощо. Тобто структура червоної цегли може бути досить неоднорідною.

Всі вищезгадані фактори є причиною того, що в речовині утворюється дуже складна коливальна система з різноманітним спектром частот внутрішніх коливань складових цієї системи. У таких системах можуть виникати частоти резонансних коливань, зумовлених переходами електронів між відповідними енергетичними рівнями.

Окремо слід виділити бетон. Він складається з цементного розчину і наповнювача. Останній – це гравій з різними за розмірами та формою частинками. При проходженні НВЧ сигналу через таку речовину, крім звичайних втрат енергії сигналу, може відбуватись додаткова взаємодія хвиль на межі розчин-наповнювач, а також дифракція на частинках гравію.



Як наслідок, залежності послаблення НВЧ потужності будівельними матеріалами від частоти сигналу при різній вологості зразків мають дуже складний вигляд. При одному рівні вологості на них спостерігаються як монотонні залежності, так і резонансні ділянки.

У бетонних зразків (рис. 2, а) спостерігалось досить значне послаблення сигналу зі зростанням вологості. При вологості 10 % воно досягало (6-9) дБ у широкому частотному діапазоні. Найменше послаблення спостерігалось на частотах (2,8-4,2) ГГц. Причому в інтервалі (3,2-4,4) ГГц при 1 % вологості воно було практично відсутнім.

Для бетонних зразків цікавим нюансом є наявність цілої низки локальних максимумів, які спостерігаються при певних рівнях вологості. На наведеному прикладі вони є на частотах близько 6 ГГц при (1-4) % вологості, а при (5-8) % – на частотах близько 7 ГГц. Такі ділянки частіше зустрічаються у порівняно неоднорідних матеріалів – червоної цегли, вапняку, пінобетону. Загальною рисою їх внутрішньої структури є наявність порожнин. Водночас для більш однорідних матеріалів (цементний розчин, стяжка, клей для плитки) такі локальні максимуми чи мінімуми не є характерними. Для них типовим є зростання чи зменшення послаблення в більш широкому інтервалі вологості.

У зразків червоної цегли (рис. 2, б) найкраще проходження хвиль спостерігалось на частотах (2,5–3,5) ГГц. Причому в цьому діапазоні залежність послаблення від ступені вологості не є монотонною. Відповідна графічна інформація наведена далі. Збільшення частоти (до 6 ГГц) призводило до значного послаблення сигналу. Максимальний градієнт спостерігався при частотах (3,5–4) ГГц при вологості більше ніж 2 %. Локальні максимуми спостерігались на частотах біля 6 ГГц при рівнях вологості більше 6 %, а мінімуми на частотах близько 7,2 ГГц при рівнях вологості більше 3 %.

Для силікатної цегли (рис. 2, в) найменше послаблення НВЧ сигналу спостерігається в діапазоні частот (2,7–3,3) ГГц, що є подібним для більшості досліджуваних будівельних матеріалів. Однак максимальне послаблення НВЧ сигналу в цьому випадку відбувається в діапазоні частот (5,5–6,5) ГГц, чого не прослідковується для інших будівельних матеріалів.

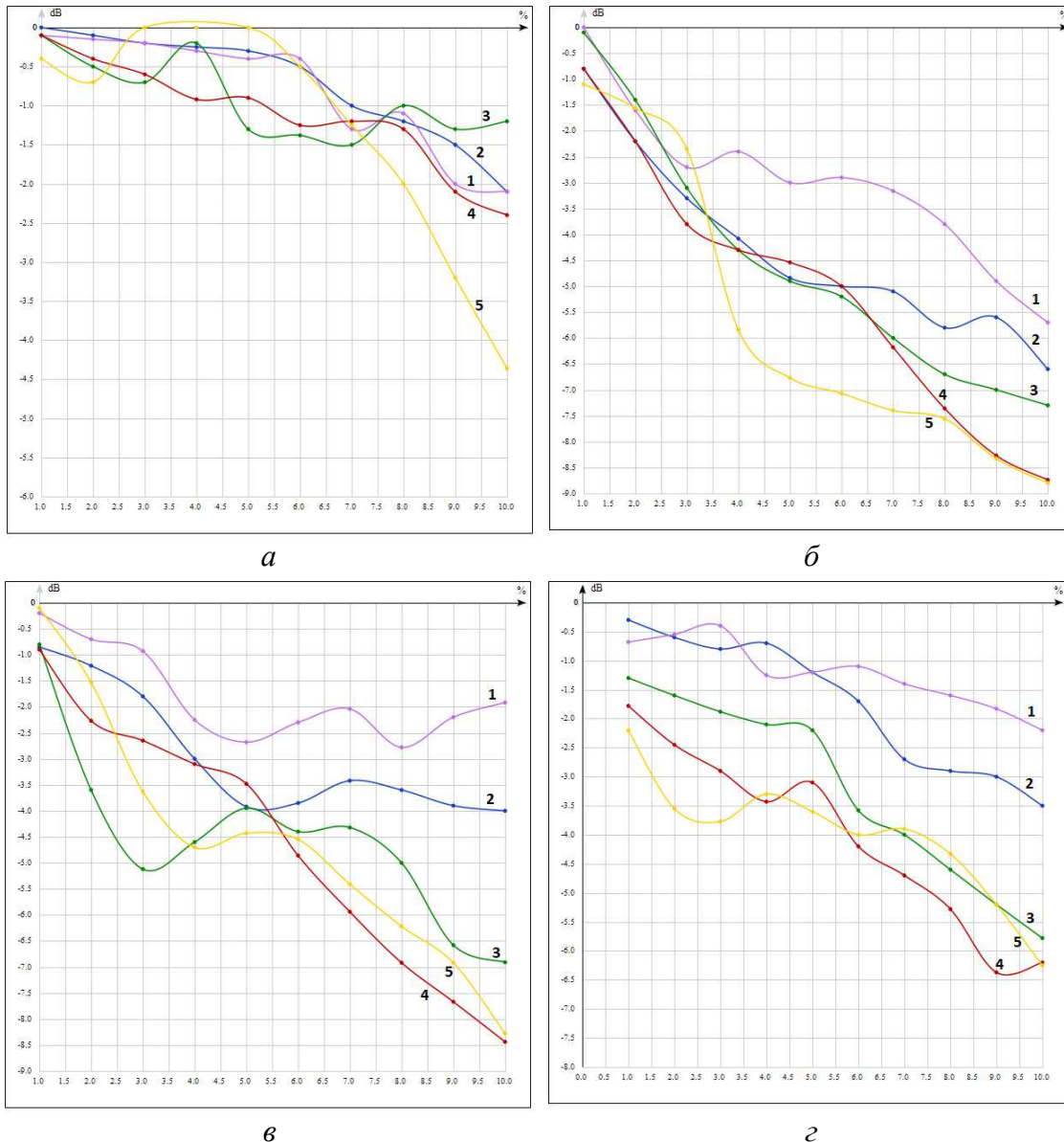
Як видно з рис. 2, г, для піску при низьких рівнях вологості до 5 % найменше послаблення НВЧ сигналу спостерігалось у діапазоні частот (6,7–7,3) ГГц. При зростанні зволоженості спостерігається два діапазони з мінімальним послабленням: один, як і для слабо зволжених зразків, – (6,7–7,3) ГГц, інший – (4,5–5,5) ГГц.

Пінобетон (рис. 2, д) послаблює сигнал значно менше ніж цегла чи бетон. Максимальне послаблення досягало 4 дБ. Найкращі умови для проходження НВЧ сигналу крізь цей матеріал спостерігаються при частотах від 2,4 ГГц до 3,3 ГГц. При рівні вологості 6 % спостерігався ще один інтервал – від 6,4 ГГц до 7,0 ГГц. Подальше зростання вологості приводить до відносно значного послаблення сигналу, особливо на частотах більше за 6 ГГц.

У деяких матеріалах на певних частотах при рівні вологості (1–2) % було зауважено відсутність послаблення сигналу. Цей факт можна пояснити тим, що незначна (близько 1 %) вологість на певних частотах покращує узгодження поверхні з повітрям. Як наслідок, зменшується відбиття хвиль від зразка. При подальшому збільшенні вологості визначальну роль починають відігравати процеси в об'ємі речовини і послаблення сигналу зростає.

За отриманими результатами, що наведені на рис. 2, були побудовані залежності послаблення сигналу стіновими матеріалами від рівня вологості на п'яти окремих частотах: 2,4 ГГц, 3,2 ГГц, 4,4 ГГц, 5,4 ГГц і 7,4 ГГц. Вони показані на рис. 3.

Частоти 2,4 ГГц та 5,4 ГГц викликають особливий інтерес, оскільки це частоти, на яких працює бездротовий Інтернет.



*Рис. 3. Залежності послаблення НВЧ-сигналу від рівня вологості стіновими матеріалами:*

*а – пінобетоном; б – бетоном; в – червоною цеглою; г – силікатною цеглою;  
 1 – при частоті 3,2 ГГц; 2 – при частоті 2,4 ГГц; 3 – при частоті 4,4 ГГц;  
 4 – при частоті 5,4 ГГц; 5 – при частоті 7,4 ГГц*

Порівнюючи ці залежності можна бачити, що для пінобетону, цегли силікатної та бетону загалом швидкість зміни послаблення сигналу не дуже сильно залежать від частоти. Проте окремі ділянки мають або незначну, або навпаки дуже велику зміну згасання сигналу при зміні вологості зразків. До них можна віднести:

Бетон – частота 3,2 ГГц в інтервалі вологості 3-7 %, та частота 2,4 ГГц при 5-9 % вологості; пінобетон – частота 4,4 ГГц в інтервалі вологості 3-8 %.

У всіх трьох матеріалів найбільші відхилення як в один так і в інший бік спостерігались на частоті 7,4 ГГц. Найбільші відмінності у таких залежностей спостерігались на зразках червоної цегли. Найбільш вірогідно, що це пояснюється дуже неоднорідною структурою цього матеріалу.

Також відповідно до результатів рисунків 2-6 були побудовані залежності послаблення сигналу стіновими матеріалами від частоти при сталих рівнях вологості – від 1 до 9 %.

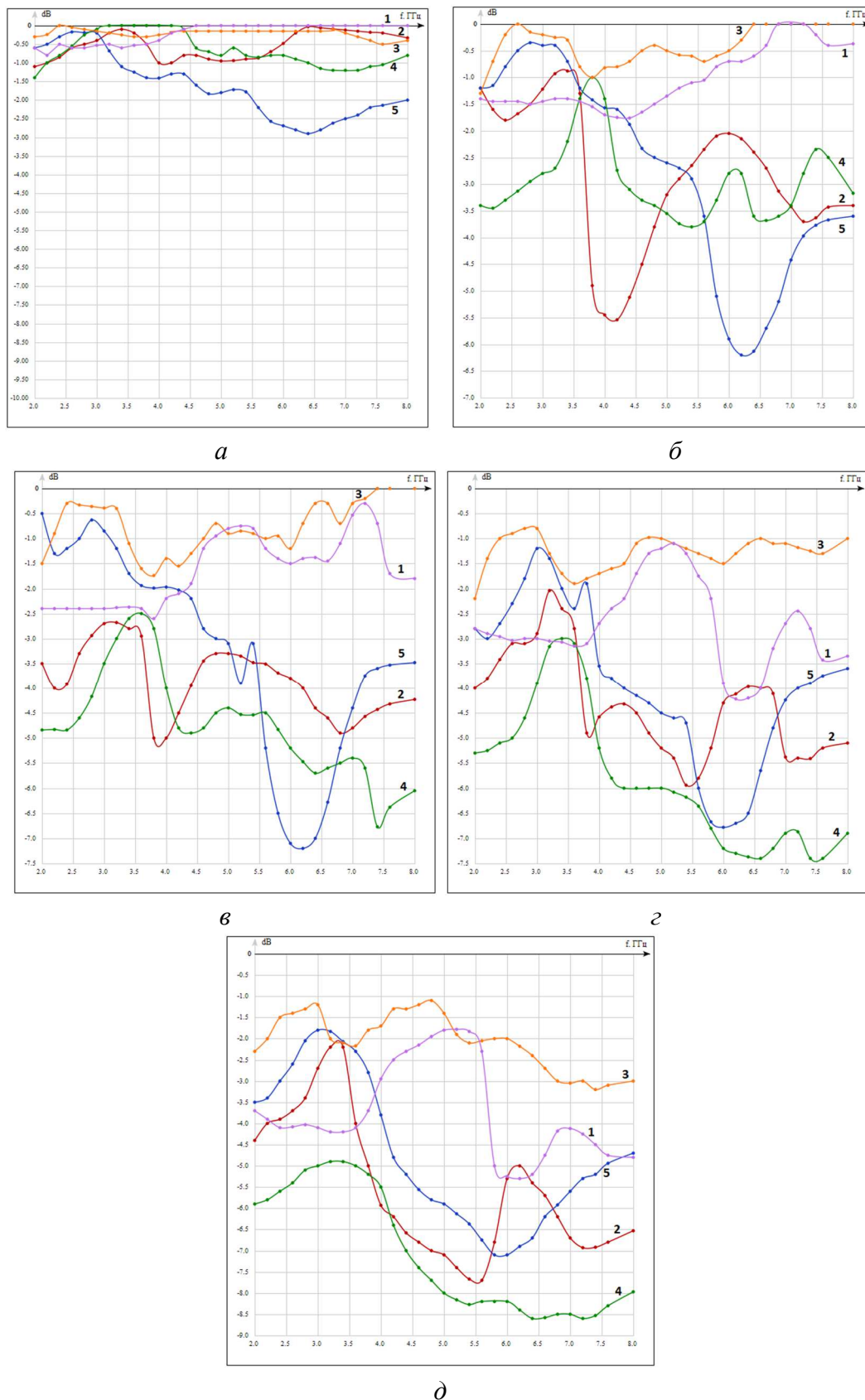


Рис. 4. Залежності послаблення сигналу стіновими матеріалами від частоти при сталих рівнях вологості:  
 а – 1 %; б – 3 %; в – 5 %; г – 7 %; д – 9 %:  
 1 – пісок; 2 – цегла червона; 3 – пінобетон; 4 – бетон; 5 – цегла силікатна



Аналіз цих залежностей показує, що для всіх досліджуваних матеріалів можна виділити два такі діапазони:

Перший діапазон: (2,9–3,5) ГГц. Саме на таких частотах у більшості матеріалів послаблення сигналу найменше. Виняток – дуже великий рівень вологості (9 %). При ньому діапазон менше – від (2,9 до 3,2) ГГц.

Другий діапазон: (5,6–6,5) ГГц. У більшості матеріалів послаблення сигналу на таких частотах найбільше.

**Висновки відповідно до статті.** Для основних стінових будівельних матеріалів: бетон, цегла червона та силікатна, пісок, пінобетон визначені експериментальні залежності послаблення сигналу НВЧ від вологості в смузі частот (2-8) ГГц. Ці залежності можуть використовуватись як інформаційні характеристики систем неруйнівного контролю чи діагностики стану технічних об'єктів та створення каналів радіозв'язку, які працюють у будівлях та спорудах.

Найменше послаблення НВЧ сигналу спостерігалось для більшості будівельних матеріалів у діапазоні частот (2,9-3,5) ГГц при рівнях вологості від 1 до 7 %. Однак хочеться зазначити, що, крім цього, для будівельних матеріалів різного ступеня зволоженості спостерігались також локальні мінімуми на інших частотах.

Загальною тенденцією для більшості будівельних матеріалів є зростання послаблення НВЧ сигналу при зростанні вологості.

Оскільки основні будівельні матеріали суттєво неоднорідні, мають у своїй структурі порожнини, то характеристики послаблення НВЧ сигналів та їх зміна при зміні зволоженості дуже сильно залежать від їх будови. Отже, у системах моніторингу обов'язковою умовою має бути калібрування вимірювальної установки в конкретних умовах контролюваного об'єкта.

#### Список використаних джерел

1. Харвей А. Техника СВЧ / А. Харвей. – М. : Сов. радио, 1965. – 775 с.
2. Пасынков В. В. Материалы электронной техники / В. В. Пасынков, В. С. Сорокин. – М. : Высш. школа, 1986. – 367 с.
3. Кудряшов А. А. Затухание радиоволн и беспроводные технологии построения промышленных сетей диапазона 2,4 ГГц / А. А. Кудряшов // Вісник ЧДТУ. – 2012. – № 4 (61). – С. 183–190.
4. Микроволновые технологии в телекоммуникационных системах / Т. Нарытник, В. Бабак, М. Ильченко, С. Кравчук. – К. : Техніка, 2000. – 298 с.
5. Вязьмитинов И. А. Результаты исследований ослабления энергии электромагнитных волн оптически непрозрачными преградами / И. А. Вязьмитинов, Е. И. Мирошниченко, О. В. Сытник // Радиофизика та електроніка. – 2007. – Т. 12, № 2. – С. 426–434.
6. Сатюков А. І. Використання хвилеводно-коаксиального переходу при вимірюванні вологості тіл з довільною геометрією / А. І. Сатюков, А. Л. Приступа // Збірник матеріалів науково-технічної конференції. – Суми, 2014. – С. 51.
7. Сатюков А. І. НВЧ метод вимірювання вологості об'єктів довільної форми / А. І. Сатюков, А. Л. Приступа, Ю. В. Ленько // Технічні науки та технології : науковий журнал. – 2017. – № 2 (8). – С. 20–28.

#### References

1. Harvey, A. (1965). *Tekhnika SVCh [Microwave technique]*. Moscow: Sov. Radio [in Russian].
2. Pasyinkov, V. V. & Sorokin, V. S. (1986). *Materialy elektronnoi tekhniki [Materials of electronic engineering]*. Moscow: Vysshaya shkola [in Russian].
3. Kudryashov, A. A. (2012). *Zatukhanie radiovoln i besprovodnye tekhnologii postroeniia promyshlennykh setei diapazona 2,4 GGts [Attenuation of radio waves and wireless technologies for building industrial networks in the 2.4 GHz]*. *Visnyk ChDTU – The Bulletin of ChDTU*, 4 (61), 183–190 [in Russian].

4. Naryitnik, T., Babak, V., Ilchenko, M., Kravchuk, S. (2000). *Mikrovolnovyie tehnologii v telekommunikatsionnykh sistemakh [Microwave technologies in telecommunication systems]*. Kyiv: Tehnika [in Russian].

5. Vyazmitinov, I. A. Miroshnichenko, E. I. & Syitnik, O. V. (2007). Rezultaty issledovaniia oslableniia energii elektromagnitnykh voln opticheski neprozrachnymi pregradami [The results of investigations of the attenuation of the energy of electromagnetic waves by optically opaque obstacles]. *Radiofizyka ta elektronika – Radio physics and electronics*, 2 (12), 426–434 [in Russian].

6. Satiukov, A. I., Pristupa, A. L. (2014). Vykoristannia khvylevodno-koaksialnogo perekhodu pri vymiriuvanni volohosti til z dovilnoi u heometrii [Use of waveguide-coaxial transition when measuring the humidity of bodies with arbitrary geometry]. *Zbirnik materialiv naukovo-tekhnichnoi konferentsii – Collection of materials from the scientific and technical conference* (p. 51). Sumy [in Ukrainian].

7. Satiukov, A. I., Pristupa, A. L., Lenko, Yu. V. (2017). NVCH metod vymiriuvanni volohosti ob'ektiv dovilnoi formy [Microwave method of measuring moisture objects of the arbitrary form]. *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii – Technical sciences and technologies*, 2 (8), 20–28 [in Ukrainian].

UDC 621.391.812

Anatoliy Satukov, Anatoliy Prystupa,  
Vladimir Zhurko, Mstislav Bivalkevich

### EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS OF THE INFLUENCE OF HUMIDITY OF WALL CONSTRUCTION MATERIALS ON THE PERFORMANCE OF RADIO WAVES OF A RANDOM LINE

**Urgency of the research.** Modern information technology is using ultrahigh frequencies to a large extent. The reliability of such systems in some cases is associated with the passage of microwave signals through the construction materials. At the same time there is a relaxation of the radio signal, the degree of which largely depends on the level of moisture content. Therefore, the study of patterns associated with the passage of microwave radio waves through wet materials is very important and topical task.

**Target setting.** The conditions for the propagation of radio waves affect the task that needs to be addressed when designing, manufacturing and deploying elements of electronic systems of radio channels. Taking into account the relaxation of signals by interference, it is possible to optimally select the working frequencies, the power of generator elements, parameters of antenna systems and their location. In turn, reliability of work, impedance protection, competitive ability, cost-effectiveness of manufacturing and operation depend on this.

**Actual scientific researches and issues analysis.** The question of the propagation of radio waves in the air and above the earth's surface has been studied very carefully and completely. The frequencies detected are the least observed, as well as the most damping of radio waves. This made it possible to create reliable and optimally structured communication channels. In recent years, radio communication systems operating in the proliferation of radio waves in the presence of various obstacles are increasingly developing. For example, mobile communications or wireless internet, which work in indoors and buildings. For them, numerous devices, antenna systems, various IT technologies have been created.

**Uninvestigated parts of general matters defining.** Radio channel parameters such as transmitter power, antenna design and placement are closely related to the proliferation of radio waves due to various obstacles. Such obstacles, in particular, may be various building constructions – walls, floors, etc. They weaken the power of radio waves passing through them everywhere. The degree of such relaxation may significantly depend on the level of moisture content of the barrier. The data presented in various literary sources do not, for the most part, take into account this aspect.

**The research objective.** Influence of moisture of wall building materials on the level of weakening of microwave signals and determination of frequencies with a minimum level of such relaxation.

**The statement of basic materials.** The authors carried out measurements of the degree of weakening of microwave radio waves by the main wall building materials - samples of red and silica brick, concrete and foam concrete. Measurements were made when changing the level of moisture content. The obtained results were compared with the passage of radio waves everywhere with a dry specimen. This made it possible to determine exactly the effect of the change in humidity on the relaxation of the radio signal. Measurements were carried out in the frequency range of 2–8 GHz. and humidity of samples of wall materials up to 10 %.

In addition, an analysis of the change in the signal attenuation from the degree of humidity at individual frequencies is carried out. Also, comparing the relaxation of radio waves with different materials with the same level of humidity is made.

**Conclusions** For the main wall building materials – concrete, brick red and silicate, foam concrete specific experimental dependence of the weakening of the microwave signal from moisture in the frequency band 2–8 GHz is determined. frequency bands with the smallest and largest relief of the microwave signal.

**Keywords:** relaxation of radio waves; microwave signal; wall building materials; humidity level; frequency range.

Fig. : 4. References: 7.

*Анатолій Сатюков, Анатолій Приступа,  
Владимир Журко, Мстислав Бивалькевич*

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ВЛАЖНОСТИ СТЕНОВИХ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ПРОХОЖДЕНИЕ РАДИОВОЛН НВЧ ДИАПАЗОНА

**Актуальность исследования.** Современные технические и информационные системы в значительной степени используют сверхвысокие частоты (1-10 ГГц). Надежность таких систем связана с прохождением СВЧ-сигналов через различные материалы. При этом наблюдается ослабление радиосигнала, степень которого в значительной степени зависит от уровня влажности вещества. Поэтому изучение закономерностей, связанных с прохождением радиоволн через влажные материалы, является очень важной и актуальной задачей.

**Постановка проблемы.** Условия распространения радиоволн влияют на задачи, которые необходимо решать при проектировании, изготовлении и размещении элементов электронных систем радиоканалов. Учет уровня ослабления сигналов препятствиями позволяет выбрать оптимальные рабочие частоты, мощности генераторных элементов, параметры антенных систем и их расположение, что в свою очередь влияет на надежность работы таких систем, их помехоустойчивость, конкурентную способность, экономичность.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Вопросы распространения радиоволн в воздухе изучены очень тщательно и полно. Определены частоты, на которых наблюдается наименьшее и наибольшее затухания радиоволн. Это позволило создать надежные и оптимально структурированные каналы беспроводной связи.

**Выделение неисследованных частей общей проблемы.** В последние годы все больше развиваются системы радиосвязи, работающие в условиях распространения радиоволн при наличии различных препятствий. Например, мобильная связь или беспроводной интернет, работающие, в том числе, в помещениях и зданиях. Такие параметры каналов радиосвязи как мощность передатчиков, конструкция и размещение антенн тесно связаны с взаимодействием радиоволн с различными препятствиями. Такими препятствиями, в частности, могут быть различные строительные конструкции – стены, перекрытия и др. Они ослабляют мощность радиоволн, проходящих сквозь них. Степень такого ослабления может существенно зависеть от уровня влажности материала препятствия. Приведенные в различных литературных источниках данные по большей части не учитывают этого аспекта.

**Цель исследования** заключается в изучении влияния влажности стеновых строительных материалов на уровень ослабления СВЧ сигналов и определения частот, на которых наблюдается минимальный уровень ослабления.

**Изложение основного материала.** Авторами проведены экспериментальные исследования по определению степени ослабления СВЧ сигналов стеновыми строительными материалами при различном уровне влажности вещества. Полученные результаты сравнивались с прохождением радиоволн сквозь сухой образец. Это позволило выяснить именно влияние изменения влажности на ослабление радиосигнала. Измерения проводились в диапазоне частот (2–8) ГГц и изменении влажности образцов до 10 %.

Проведен анализ ослабление сигнала от степени влажности на отдельных частотах. Проведено сравнение ослабления радиоволн различными материалами с одинаковым уровнем влажности.

**Выводы в соответствии со статьей.** Для основных стеновых строительных материалов – бетон, кирпич красный и силикатный, пенобетон определены экспериментальные зависимости ослабления сигнала СВЧ от влажности в полосе частот (2-8) ГГц, выделены диапазоны частот с наименьшим и наибольшим ослаблением СВЧ сигнала.

**Ключевые слова:** СВЧ сигнал; ослабление радиоволн; стеновые строительные материалы; влажность; экспериментальные исследования.

Рис.: 4. Библ.: 7.

**Сатюков Анатолий Иванович** – кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри інформаційно-вимірних технологій, метрології та фізики, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).

**Сатюков Анатолий Иванович** – кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры информационно-измерительных технологий, метрологии и физики, Черниговский национальный технологический университет (ул. Шевченко, 95, г. Чернигов, 14035, Украина).

**Anatoliy Satukov** – PhD in Physico-Mathematical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Information and Measurement Technology Department, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenko Str., 14035, Chernihiv, Ukraine).

**E-mail:** ivtmif@gmail.com

**ORCID:** <http://orcid.org/0000-0003-2901-1152>

**Приступа Анатолий Леонидович** – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри інформаційно-вимірних технологій, метрології та фізики, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).

**Приступа Анатолий Леонидович** – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой информационно-измерительных технологий, метрологии и физики, Черниговский национальный технологический университет (ул. Шевченко, 95, г. Чернигов, 14035, Украина).

**Anatoliy Prystupa** – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Head of Information and Measurement Technology Department, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenko Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).

**E-mail:** a.l.prystupa@gmail.com

**ORCID:** <http://orcid.org/0000-0001-9412-2698>

**Журко Володимир Павлович** – старший викладач кафедри інформаційно-вимірювальних технологій, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).

**Журко Владимир Павлович** – старший преподаватель кафедры информационно-измерительных технологий, метрологии и физики, Черниговский национальный технологический университет (ул. Шевченко, 95, г. Чернигов, 14035, Украина).

**Vladimir Zhurko** – Senior Lecturer of Department of Information and Measurement Technologies, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).

**E-mail:** phizika61@ukr.net

**ORCID:** <http://orcid.org/0000-0001-6533-5889>

**Бивалькевич Мстислав Олексійович** – старший викладач кафедри інформаційно-вимірювальних технологій, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна)

**Бивалькевич Мстислав Алексеевич** – старший преподаватель кафедры информационно-измерительных технологий, метрологии и физики, Черниговский национальный технологический университет (ул. Шевченко, 95, г. Чернигов, 14035, Украина)

**Mstislav Bivalkevich** – Senior Lecturer of Department of Information and Measurement Technologies, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).

**E-mail:** ivtmif@gmail.com

**ORCID:** <http://orcid.org/0000-0002-8461-9323>