

УДК 666.97.033+681.5.015.8:519

Ю.В. ЧОВНЮК

Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины
М.Г. ДИКТЕРУК, М.С. КОБЕЦ

Киевский национальный университет строительства и архитектуры

ВЫБОР РАБОЧЕЙ ЧАСТОТЫ ГЕНЕРАТОРА ПРИ МОНИТОРИНГЕ И КОНТРОЛЕ ПРОЦЕССОВ ВЛАГОПЕРЕНОСА В МУЗЕЙНЫХ ЭКСПОНАТАХ/КАРТИНАХ МЕТОДОМ ПОГЛОЩЕНИЯ СВЧ/КВЧ ЭНЕРГИИ

Для мониторинга и контроля процессов влагопереноса в экспонатах, помещённых в музеях (например, в картинах художников – мастеров прошлых веков, в гобеленах, в скульптурах и пр.) предложено использовать метод поглощения энергии электромагнитных волн (СВЧ – радиочастотного диапазона и КВЧ – диапазона миллиметровых волн) нетепловой интенсивности. Контроль за процессом влагопереноса в музейных экспонатах данным способом основан на том, что поглощение энергии СВЧ/КВЧ – электромагнитных волн нетепловой интенсивности при их прохождении через дисперсные системы (именно таковой представляется полотно художественной картины, краски, нанесенные на него, защитные слои (полировка) и пр.) определяется количеством свободной воды и удельной проводимостью исследуемого объекта. При экспонировании художественных полотен в помещениях музеев (картинных галереях) объёмное содержание воды в системе и её удельная проводимость увеличиваются, достигая порою таких значений, при которых может быть нарушена целостность полотна (ткани полотна), появляются трещины, изгибы полотна, что, в конечном счёте, ведёт к его разрушению с течением времени. При этом СВЧ/КВЧ – электромагнитные волны имеют нетепловую интенсивность именно для того, чтобы зондирующий картину/экспонат (электромагнитный) сигнал как падающий, так и отражённый, не создавал её/его повреждение при поглощении в тонком поверхностном слое. Дополнительный влагоперенос внутрь экспонатов музея вызван наличием в музейном помещении (картинной галерее) потока посетителей, особенно в те дни, когда проводятся выставки. Если имеется стабилизация поглощения СВЧ/КВЧ энергии, которую можно получить с помощью специальных систем контроля микроклимата музейных помещений, тогда процесс разрушения полотен/экспонатов можно приостановить (или, по крайней мере, существенно уменьшить). На точность определения параметров поглощаемой СВЧ/КВЧ энергии данным методом существенно влияет ряд факторов (в частности, рабочая частота генератора электромагнитных волн, точность её настройки, ширина частотного диапазона излучения и пр.), которые связаны как с точностью измерения ослабления СВЧ/КВЧ сигнала (методом СВЧ/КВЧ – рефлектометрии), так и с особенностями исследуемого экспоната/картины.

Ключевые слова: выбор, рабочая частота, генератор, мониторинг, контроль, влагоперенос, музейный экспонат, художественное полотно, метод, поглощение, СВЧ/КВЧ электромагнитные волны, нетепловая интенсивность, энергия.

Ю.В. ЧОВНЮК

Національний університет біоресурсів і природокористування України

М.Г. ДІКТЕРУК, М.С. КОБЕЦЬ

Київський національний університет будівництва і архітектури

ВИБІР РОБОЧОЇ ЧАСТОТИ ГЕНЕРАТОРА ПРИ МОНІТОРИНГУ І КОНТРОЛІ ПРОЦЕСІВ ВОЛОГОПЕРЕНОСУ У МУЗЕЙНИХ ЕКСПОНАТАХ/КАРТИНАХ МЕТОДОМ ПОГЛИНАННЯ НВЧ/КВЧ ЕНЕРГІЇ

Задля моніторингу і контролю процесів вологопереносу у експонатах, які розміщені у музеях (наприклад, у картинах художників – майстрів минулих віків, у гобеленах, у скульптурах та ін.), запропоновано використовувати метод поглинання енергії електромагнітних хвиль (НВЧ – радіочастотного діапазону й КВЧ – діапазону міліметрових хвиль) нетеплової інтенсивності. Контроль за процесом вологопереносу у музейних експонатах даним способом заснований на тому, що поглинання енергії НВЧ/КВЧ електромагнітних хвиль нетеплової інтенсивності при їх проходженні через дисперсні системи (саме такою представляється полотно художньої картини, фарби, нанесені на нього, захисні прошарки (полірування) та ін.) визначається кількістю вільної води та питомою електропровідністю досліджуваного об'єкту. При експонуванні художніх полотен у приміщеннях музеїв (картинних галереях) об'ємний вміст води у системі та її питома електропровідність збільшуються, досягаючи інколи таких значень, при яких може бути порушена цілісність полотна (тканини полотна), з'являються тріщини, згини полотна, що, у кінцевому випадку, призводить до його руйнування з плином часу. При цьому НВЧ/КВЧ електромагнітні хвилі мають нетеплову інтенсивність саме для того, щоб зондуєючи картину/експонат (електромагнітний) сигнал як падаючий, так і відбитий, не створював її/його пошкодження при поглинанні у тонкому поверхневому прошарку. Додатковий вологоперенос всередину експонатів музею, викликаний наявністю у приміщенні музею (у картинній галереї) потоку відвідувачів, особливо у ті дні, коли проводяться виставки. Якщо наявна стабілізація поглинання НВЧ/КВЧ енергії, яку можна отримати за допомогою спеціальних систем контролю мікроклімату музейних приміщень, тоді процес руйнування художніх картин/експонатів можна призупинити (або, принаймні, суттєво зменшити). На точність визначення параметрів НВЧ/КВЧ енергії, яка поглинається, даним методом суттєво впливає низка факторів (зокрема, робоча частота генератора електромагнітних хвиль, точність її налаштування, ширина частотної смуги випромінювання та ін.), які пов'язані як з точністю вимірювання послаблення НВЧ/КВЧ сигналу (методом НВЧ/КВЧ рефлектометрії), так і з особливостями експонату/картини, що досліджується.

Ключові слова: вибір, робоча частота, генератор, моніторинг, контроль, вологоперенос, музейний експонат, художнє полотно, метод, поглинання, НВЧ/КВЧ електромагнітні хвилі, нетеплова інтенсивність, енергія.

Y.V. CHOVDNYUK

National University of Bioresources and Life Sciences of Ukraine

M.G. DIKTERUK, M.S. KOBETZ

Kyiv National University of Construction and Architecture

CHOICE OF GENERATOR'S WORKING FREQUENCY DURING THE MONITORING AND CONTROL OF MOISTURE TRANSFER IN MUSEUM'S EXHIBITS/PICTURES WITH THE HELP OF UHF/EHF ENERGY ABSORPTION METHOD

In order to monitoring and control of moisture transfer in museum's exhibits (for example, in pictures of painters – masters of past centuries, hobbles, sculptures etc.), one may use the method of electromagnetic waves energy absorption (UHF – radio frequency range and EHF – range o millimeter waves) with a very low level of heat intensity of these waves. The control of moisture transfer in museum's exhibits with a help of such method is based on a phenomenon of UHF/EHF electromagnetic waves absorption, when they have non-heat intensity, during the process of transmission of such waves along dispersive systems (just so may be called the canvases of a pictures, a paints, protective layer on a canvases (polish), etc.). This value of absorption is determined by the quantity of a free water and by the conductivity of researched object, as well. When canvases are exhibited at museum's rooms (painting galleries), the volume content of a water in the system and its conductivity are increased, and that's why they may have such values which can destroy the canvases' condition of being intact (for example, their materials), there are cracks in a canvases, their bending and so on. All these phenomena destroy canvases during a certain period of time. By the way, UHF/EHF electromagnetic waves of non-heat intensity have such values of it in order to no destroy the exhibit/canvas surface during the act of absorption of incident/reflected electromagnetic search signal in the thin surface layer. The additive moisture transfer into museum's exhibits is due to the flow of visitors at museum's rooms (at painting gallery) just during those days when exhibitions are. If one has the stabilization of UHF/EHF energy absorption which may be obtained with the help of a special control system of microclimate of museum's rooms, then the process of destroying of canvases/exhibits may be suspend (or may be substantially decreased). The accuracy of determination of absorption parameters of UHF/EHF energy with the help of this method substantially depends on some factors (for example, the working frequency of electromagnetic waves generator, the accuracy of its tuning, the bandwidth of frequency range of emission, etc.). These factors are connected with an accuracy of measuring of UHF/EHF signal attenuation (with the help of UHF/EHF reflectometer method) and with a characteristic properties of the researching exhibit/canvas.

Keywords: choice, working frequency, generator, monitoring, control, moisture transfer, museum's exhibit, painting canvas, method, absorption, UHF/EHF electromagnetic waves, non-heat intensity, energy.

Постановка проблемы

Развитие технологий способствует повышению уровня жизни людей, в том числе трансформирует урбанистическую среду в сторону увеличения комфорта пребывания в помещениях, вместе с тем решая оптимизационные задачи потребления энергоресурсов и энергосбережения. В полной мере это относится и к музейным помещениям, призванным сохранять длительное время в комфортном состоянии экспонируемые в них произведения искусства.

Конечно, необходимым условием, которое следует соблюдать для поддержания в норме всех параметров экспонатов (картин художников), является существование надёжной системы управления (регулирования) воздушных потоков, температуры и влажности в помещениях музея, где расположены экспонаты и могут находиться группы людей (посетителей), вносящих свой влажностно-температурный дисбаланс. Контроль последнего является, пожалуй, одним из основных условий приемлемого содержания произведений искусства в музейных помещениях.

Поскольку полотно художественной картины (её ткань) может быть отнесена к разряду дисперсных материалов, мы в дальнейшем будем пользоваться именно этим термином, подразумевая под ним полотно картины, гобелен и пр. Для определения показателя влагосодержания в дисперсном материале можно, по мнению авторов данного исследования, воспользоваться неразрушающим дисперсный материал методом поглощения СВЧ/КВЧ энергии электромагнитных волн нетепловой интенсивности.

Контроль за влагосодержанием дисперсного материала данным способом основан на том, что поглощение энергии сверхвысокочастотных (СВЧ)/крайне высокочастотных (КВЧ) электромагнитных волн при прохождении их через дисперсные системы определяется количеством свободной воды и удельной проводимостью системы. При посещении музейных помещений посетителями, как правило, объёмное содержание воды в дисперсных материалах и их удельная (электро-) проводимость увеличиваются, достигая порой таких значений, при которых может произойти существенная деструкция дисперсного материала (появляются трещины, коробления, изгибы на полотне картины и пр.), что, в конечном итоге приводит к потере шедевра искусства в целом либо требуется специальная дорогостоящая реставрация его.

Если в музейных помещениях присутствует система контроля за их микроклиматом, которая практически мгновенно отслеживает возможные колебания влаги, температуры, скорости воздушных потоков в указанных помещениях, то для её нормальной эксплуатации необходимо обеспечить подачу в контроллеры этой системы оперативной информации, в частности, о влагосодержании помещения, чтобы сама система смогла быстро внести коррективы в параметры помещения, в соответствии с нормами его эксплуатации и нормами содержания в нём шедевров искусства.

Таким образом, влагосодержание в музейном помещении можно определять по стабилизации поглощения СВЧ/КВЧ энергии электромагнитных волн нетепловой интенсивности. Именно на таком принципе могут быть построены датчики влагосодержания помещения, оперативно передающие информацию о влагосодержании на контроллеры системы мониторинга микроклимата помещения с целью его коррекции в сторону нормальных значений, предусмотренных правилами и нормативами эксплуатации музейных помещений и содержания в них произведений искусства. На точность определения момента стабилизации поглощения СВЧ/КВЧ энергии электромагнитных волн нетепловой интенсивности, как, впрочем, и на точность определения самой величины влагосодержания в дисперсном материале влияет ряд факторов, связанных как с точностью измерения ослабления СВЧ/КВЧ сигнала, так и с особенностями исследуемого дисперсного материала.

Анализ последних исследований и публикаций

Остановимся вначале вкратце на методах контроля поглощения СВЧ энергии, которые используются в таких дисперсных материалах, как бетонная смесь. Так, для определения окончания процесса уплотнения бетонной смеси при формировании железобетонных изделий было предложено использовать метод поглощения СВЧ энергии радиоволн в работе [1]. Контроль за процессом уплотнения бетонной смеси данным способом основан на том, что поглощение энергии сверхвысокочастотных электромагнитных волн при прохождении их через дисперсные системы на основе

цементу визначається кількістю вільної води і удільною провідністю системи [2, 4]. Автор [3] обґрунтував формулу для комплексної постійної розповсюдження електромагнітних хвиль в речовині, зокрема, для немагнітних ізотропних діелектриків. В роботі [5] досліджені діелектричні явища і подвійний шар в дисперсних системах і поліелектролітах. Автори [6] розглянули діелектричні властивості води в розчинах. В [7] запропоновано метод неінвазивного контролю якості бетону за його електропровідності. Фактори, що впливають на удільне омическе опір бетонного зразка, вивчені в [8]. Вимірювання вологості бетонної суміші і її компонентів вологомірами СВЧ виконано в [9]. В [10–12] описані радіоізмірювальні прилади, техніка надвисоких частот і, зокрема, техніка СВЧ-вологомірії.

Результати цитованих вище робіт будуть частково використані в даному дослідженні, присвяченому моніторингу і контролю процесу вологопереносу в музейних експонатах/картинах методом поглинання СВЧ/КВЧ енергії електромагнітних хвиль нетеплової інтенсивності.

Ціль дослідження

Ціль роботи – створення і обґрунтування наукової концепції моніторингу і контролю процесу вологопереносу в музейних експонатах/картинах методом поглинання СВЧ/КВЧ енергії електромагнітних хвиль нетеплової інтенсивності, що дозволяє вибрати оптимальну робочу частоту генератора вказаних хвиль.

Изложение основного материала исследования

Розповсюдження електромагнітних хвиль (нетеплової інтенсивності) в речовині виражається через комплексну постійну розповсюдження [3]:

$$\gamma = \alpha + j\beta, \quad (1)$$

де γ – комплексна постійна розповсюдження; α – коефіцієнт затухання; $j^2 = -1$; β – фазова постійна.

Для немагнітних ізотропних діелектриків α і β рівні:

$$\alpha = \frac{2\pi}{\lambda_0} \cdot \left[\frac{1}{2} \varepsilon' \cdot \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \right)^2} - 1 \right) \right]^{1/2}; \quad (2)$$

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda_0} \cdot \left[\frac{1}{2} \varepsilon' \cdot \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \right)^2} + 1 \right) \right]^{1/2}, \quad (3)$$

де λ_0 – довжина хвилі в вільному просторі; ε' і ε'' – дійсна і мніма частини комплексної відносної діелектричної проникності.

Використаємо результати робіт [2, 4], де показано, що на надвисоких частотах (і більше) діелектричні характеристики дисперсних систем в залежності від складу і температури з задовільною для практики точністю можуть бути розраховані за наступними формулами:

$$\varepsilon_p' \approx \left\{ \sum_{i=1}^n \sqrt{\varepsilon_i' \left[1 + \frac{1}{4} \left(\frac{\varepsilon_i''}{\varepsilon_i'} \right)^2 \right]} \cdot P_i \right\}^2 - \left\{ \sum_{i=1}^n \frac{\varepsilon_i''}{2\sqrt{\varepsilon_i'}} \left[1 - \frac{1}{8} \left(\frac{\varepsilon_i''}{\varepsilon_i'} \right)^2 \right] \cdot P_i \right\}^2; \quad (4)$$

$$\varepsilon_p'' \approx \left\{ \sum_{i=1}^n \frac{\varepsilon_i''}{\sqrt{\varepsilon_i'}} \left[1 - \frac{1}{8} \left(\frac{\varepsilon_i''}{\varepsilon_i'} \right)^2 \right] \cdot P_i \right\} \cdot \left\{ \sum_{i=1}^n \sqrt{\varepsilon_i' \left[1 + \frac{1}{4} \left(\frac{\varepsilon_i''}{\varepsilon_i'} \right)^2 \right]} \cdot P_i \right\}; \quad (5)$$

$$\varepsilon_c'' = \varepsilon_p'' + \varepsilon_\sigma''; \quad (6)$$

$$\varepsilon_\sigma'' = \frac{\sigma}{\omega_0 \varepsilon_0}, \quad (7)$$

где ε_p'' и ε_p' – расчётные значения действительной и мнимой частей комплексной относительной диэлектрической проницаемости системы; ε_i' и ε_i'' – действительная и мнимая части комплексной относительной диэлектрической проницаемости i -ой компоненты; n – количество компонент; P_i – объёмное содержание i -ой компоненты; ε_c'' – мнимая часть относительной диэлектрической проницаемости системы, обусловленная потерями на релаксацию и сквозную проводимость; ε_σ'' – мнимая часть относительной диэлектрической проницаемости, обусловленная потерями на сквозную проводимость системы; σ – низкочастотная удельная проводимость системы, См/м; ω_0 – циклическая частота; $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$ – диэлектрическая проницаемость вакуума.

Причём низкочастотная удельная проводимость σ дисперсных материалов рассчитывается по формуле Бруггемана [5]:

$$\sigma = \sigma_0 \cdot P_0^{3/2}, \quad (8)$$

где σ_0 – удельная проводимость проводящей фазы системы, См/м; P_0 – объёмная концентрация проводящей фазы.

Таким образом, формулы (4)–(8) практически можно применять для расчёта диэлектрических характеристик дисперсных систем.

На выбор рабочей частоты СВЧ/КВЧ генератора оказывают влияние химический и минералогический состав красок, температура, гранулометрический состав наполнителей красок, погрешность измерительной аппаратуры и т.д.

Изменение химико-минералогического состава красок, нанесенных на полотно картины, влечёт за собой изменение удельной проводимости жидкой фазы красочного теста, а следовательно, и изменение коэффициента затухания (см. формулы (2), (6), (7), (8)). Как видно из формулы (7), влияние данного параметра ε_σ'' обратно пропорционально частоте. Для уменьшения влияния вариаций химико-минералогического состава красок частоту СВЧ/КВЧ генератора необходимо повышать. Кроме того, более высокую частоту следует выбирать потому, что изменение проводимости системы и перераспределение воды в дисперсном материале во времени будут сказываться на изменении α , а, значит, и на точности определения окончания процесса влагопереноса в дисперсном материале.

Изменение температуры оказывает влияние на релаксационные потери в дисперсном материале, которые определяются потерями в воде, и на потери, связанные со сквозной проводимостью системы. По данным [6], ε'' для воды в диапазоне температур от 10...20⁰С имеет отрицательный температурный коэффициент, приблизительно равный 0,02 на 1⁰С для $\lambda_0 = 3,28$ см и 0,032 на 1⁰С – для $\lambda_0 = 9,2$ см, т.е. с уменьшением частоты влияние температуры увеличивается. Таким образом, для дисперсного материала одного состава можно найти такую частоту, при которой коэффициент затухания α в рабочем диапазоне температур будет практически постоянен. При изменении состава или вида красок, нанесенных на полотно, частота температурной компенсации будет другой. Поэтому, если температура дисперсного материала в процессе мониторинга (контроля) за ним остаётся постоянной, то лучше повышать частоту СВЧ/КВЧ генератора.

Как и авторы [9] мы считаем, что отсутствует влияние гранулометрического и минералогического состава заполнителей дисперсного материала на поглощение СВЧ/КВЧ энергии ним, поэтому при выборе частоты СВЧ/КВЧ генератора влиянием гранулометрического состава заполнителей указанного материала можно пренебречь.

Для точного определения параметров поглощения СВЧ/КВЧ энергии нетепловой интенсивности дисперсными материалами необходимо фиксировать незначительные изменения ослабления СВЧ/КВЧ сигнала. Поэтому нужно иметь прибор, обладающий высокой точностью в широком диапазоне частот, и измерять величину ослабления сигнала в той области показаний прибора, где случайная относительная погрешность измерения минимальна. Данным требованиям, например, соответствует автоматический измеритель затухания типа ДІ-3 (ДІ-9), имеющий диапазон частот 0,25...16,5 ГГц, оптимальная область которого, выраженная в децибелах, составляет величину порядка 50дБ относительно 1мВт при случайной погрешности измерения 0,1 дБ [10].

Если проводимость и температура дисперсного материала в процессе влагопереноса не изменяются (например, для быстропротекающих процессов), то можно предложить следующий метод расчёта частоты СВЧ/КВЧ генератора.

Пусть нам нужно зондировать СВЧ/КВЧ сигналами нетепловой интенсивности дисперсный материал толщиной h , причём температура и состав его известны. Тогда, задаваясь оптимальной областью показаний прибора, выраженной в децибелах (обозначим эту область A_{opt}), и пренебрегая потерями на отражение от границ раздела воздух – дисперсный материал, дисперсный материал – воздух, найдём коэффициент затухания по формуле:

$$\alpha = \frac{A_{opt}}{8,686h} \text{ м}^{-1}. \quad (9)$$

Но α , как видно из формулы (2), зависит от диэлектрических характеристик дисперсного материала. Будем считать, что формулы (4)–(8) верны и для дисперсных материалов, являющихся холстом картины. Тогда, зная объёмные концентрации воды, красок, заполнителей и пр. и их диэлектрические характеристики, а также удельную проводимость теста красок σ_0 (например, из опыта) и подставляя эти значения в формулы (4)–(8), можно найти ε' и ε'' данного дисперсного материала, а по формуле (2) – величину коэффициента затухания, задавшись при этом определённым значением частоты. Варьируя последний показатель, можно подобрать такую частоту, при которой коэффициент затухания α по формуле (2), станет равным по величине α , полученному из формулы (9). Именно эта частота и является оптимальной рабочей частотой СВЧ/КВЧ генератора электромагнитных волн нетепловой интенсивности.

Потери на отражение от границ раздела воздух – дисперсный материал, дисперсный материал – воздух могут быть практически сведены к нулю путём применения четвертьволновых пластин из материала с диэлектрической проницаемостью, равной корню квадратному из показателя проницаемости исследуемой среды [3]. Диэлектрические характеристики воды для любой температуры и частоты можно найти по формулам, приведенным в работе [6]. Диэлектрические характеристики воздуха $\varepsilon' = 1$ и $\varepsilon'' = 0$. Значения диэлектрических характеристик остальных компонентов дисперсного материала могут быть рассчитаны по формулам (4), (5) на основании экспериментальных данных. Причём при расчёте рабочей частоты СВЧ/КВЧ генератора мнимой частью диэлектрической проницаемости данных компонент можно пренебречь ввиду их малости.

При расчёте α по формуле (9) не учитывались, как величина мощности СВЧ/КВЧ генератора, так и ослабление электромагнитного поля СВЧ/КВЧ, связанное с диаграммой направленности антенн и расстоянием между ними. Для этого необходимо к $A_{\text{опт}}$ прибавить величину мощности генератора, выраженную в децибелах относительно уровня 1 мВт, и отнять потери (в децибелах), связанные с диаграммой направленности антенн.

Данный метод расчёта при небольшой модификации был использован нами для расчёта оптимальных размеров измерительных ячеек при исследовании диэлектрических дисперсных систем (холстов картин художников), причём рассчитанные и экспериментальные значения α для указанных дисперсных материалов на частотах 9,24 ГГц (СВЧ – диапазон) и 56 ГГц (КВЧ - диапазон) отличались не более чем на 10...15%.

Выводы

1. Для мониторинга и контроля процессов влагопереноса в экспонатах, помещённых в музеях (например, в картинах художников – мастеров прошлых веков, в гобеленах, в скульптурах и пр.) предложено использовать метод поглощения энергии электромагнитных волн (СВЧ – радиочастотного диапазона и КВЧ – диапазона миллиметровых волн) нетепловой интенсивности.
2. Контроль за процессом влагопереноса в музейных экспонатах данным способом основан на том, что поглощение энергии СВЧ/КВЧ – электромагнитных волн нетепловой интенсивности при их прохождении через дисперсные системы (именно таковой представляется полотно художественной картины, краски, нанесенные на него, защитные слои (полировка) и пр.) определяется количеством свободной воды и удельной проводимостью исследуемого объекта.
3. При экспонировании художественных полотен в помещениях музея (картинных галереях) объёмное содержание воды в системе и её удельная проводимость увеличиваются, достигая порою таких значений, при которых может быть нарушена целостность полотна (ткани полотна), появляются трещины, изгибы полотна, что, в конечном счёте, ведёт к его разрушению с течением времени. При этом СВЧ/КВЧ – электромагнитные волны имеют нетепловую интенсивность именно для того, чтобы зондирующий картину/экспонат (электромагнитный) сигнал как падающий, так и отражённый, не создавал её/его повреждение при поглощении в тонком поверхностном слое.
4. Дополнительный влагоперенос внутрь экспонатов музея вызван наличием в музейном помещении (картинной галерее) потока посетителей, особенно в те дни, когда проводятся выставки. Если имеется стабилизация поглощения СВЧ/КВЧ энергии, которую можно получить с помощью специальных систем контроля микроклимата музейных помещений, тогда процесс разрушения полотен/экспонатов можно приостановить (или, по крайней мере, существенно уменьшить).
5. На точность определения параметров поглощаемой СВЧ/КВЧ энергии данным методом существенно влияет ряд факторов (в частности, рабочая частота генератора электромагнитных волн, точность её настройки, ширина частотного диапазона

излучения и пр.), которые связаны как с точностью измерения ослабления СВЧ/КВЧ сигнала (методом СВЧ/КВЧ – рефлектометрии), так и с особенностями исследуемого экспоната/картины.

6. Полученные в работе результаты могут быть в дальнейшем использованы для уточнения и совершенствования существующих инженерных методов расчёта систем контроля микроклимата музейных помещений, в которых экспонируются картины художников и другие произведения искусства.

Список использованной литературы

1. Атаев С.С. Об автоматизации контроля уплотнения бетонной смеси / С.С. Атаев, Н.П. Блещик, И.И. Монастырный // Бетон и железобетон. – 1972. – №12. – С. 12-18.
2. Михалевич А.А. Диэлектрические свойства цементного теста / А.А. Михалевич, Н.К. Кобляков // Тезисы сообщений к Всесоюзной конференции "Повышение эффективности и качества бетона и железобетона". – Минск, 1977. – Ч.1. – С. 45-56.
3. Хиппель А.Р. Диэлектрики и волны / А.Р. Хиппель. – М.: ИЛ, 1960. – 439 с.
4. Михалевич А.А. Диэлектрические характеристики цементно-песчаных растворов на сверхвысоких частотах / А.А. Михалевич, Н.К. Кобляков // Вопросы строительства и архитектуры. – Минск, 1979. – № 9. – С. 33-37.
5. Духин С.С. Диэлектрические явления и двойной слой в дисперсных системах и полиэлектролитах / С.С. Духин, В.Н. Шилов. – Киев: Наукова думка, 1972. – 206 с.
6. Hasted J.B. The dielectric properties of water in solutions / J.B. Hasted, S.H.M. El Sabeh // Frans. Faraday Soc. – 1953. – Vol. 49. – № 369. – P.109-123.
7. Ахвердов И.Н. Неразрушающий контроль качества бетона по электропроводности / И.Н. Ахвердов, Л.Н. Маргулис. – Минск: Наука и техника, 1975. – 174 с.
8. Малинин Ю.С. Исследование факторов, влияющих на удельное омическое сопротивление цементного теста / Ю.С. Малинин, С.Е. Ленский // Труды Всесоюзного научно-исследовательского института цементной промышленности. – 1967. – №2. – С. 116-124.
9. Берлинер М.А. Измерение влажности бетонной смеси и её компонентов влагомерами СВЧ / М.А. Берлинер, В.А. Иванов, В.А. Клоков // Бетон и железобетон. – 1969. – №2. – С. 8-15.
10. Гаврилов Ю.С. Справочник по радиоизмерительным приборам / Ю.С. Гаврилов, А.А. Ерёмченко, Л.Ю. Зубилевич и др. – М.: Энергия, 1976. – 624 с.
11. Бензарь В.К. Техника СВЧ-влагометрии / В.К. Бензарь. – Минск: ВШ, 1974. – 349 с.
12. Харвей А.Ф. Техника сверхвысоких частот / А.Ф. Харвей. – М.: Советское радио, 1965. – Т. 1. – 784 с.

References

1. Ataev, S. S., Bleschik, N. P., Monastyirnyiy, I. I. Ob avtomatizatsii kontrolya uplotneniya betonnoy smesi. Beton i zhelezobeton. **12**, 12-18. (1972)
2. Mihalevich, A. A., Koblyakov, N. K. Dielektricheskie svoystva tsementnogo testa. Tezisy i soobscheniy k Vsesoyuznoy konferentsii "Povyishenie effektivnosti i kachestva betona i zhelezobetona". Part.1. Minsk. (1977)
3. Hippel, A. R. Dielektriki i volnyi. IL. Moscow. (1960)
4. Mihalevich, A. A., Koblyakov, N. K. Dielektricheskie harakteristiki tsementno-peschanyih rastvorov na sverhvyisokih chastotah. Voprosyi stroitelstva i arhitekturyi. **9**, 33-37. (1979)
5. Duhin, S. S., Shilov, V. N. Dielektricheskie yavleniya i dvoynoy sloy v dispersnyih sistemah i polielektrolitah. Naukova dumka. Kiev. (1972)
6. Hasted, J. B., El Sabeh, S. H. M. The dielectric properties of water in solutions. Frans. Faraday Soc. **49**, 369, 109-123. (1953)

7. Ahverdov, I. N., Margulis, L. N. Nerazrushayuschiy kontrol kachestva betona po elektroprovodnosti. Nauka i tehnika. Minsk. (1975)
8. Malinin, Yu. S., Lenskiy, S. E. Issledovanie faktorov, vliyayuschih na udelnoe omicheskoe soprotivlenie tsementnogo testa. Trudyi Vsesoyuznogo nauchno-issledovatel'skogo instituta tsementnoy promyshlennosti. **2**, 116-124. (1967)
9. Berliner, M. A., Ivanov, V. A., Klokov, V. A. Izmerenie vlazhnosti betonnoy smesi i eygo komponentov vlagomerami SVCh. Beton i zhelezobeton. **2**, 8-15. (1969)
10. Gavrilov, Yu. S., Eryomenko, A. A., Zubilevich L. Yu. i dr. Spravochnik po radioizmeritelnyim priboram. Energiya. Moscow. (1976)
11. Benzar, V. K. Tehnika SVCh-vlagometrii. VSh. Minsk. (1974)
12. Harvey, A. F. Tehnika sverhvyisokih chastot. V. 1. Sovetskoe radio. Moscow. (1965)