

В. Р. Сердюк

О. С. Сідлак

## АКТУАЛЬНІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ НВЧ ВИПРОМІНЮВАННЯ В ТЕХНОЛОГІЇ БУДІВЕЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ

Вінницький національний технічний університет

*В даній статті наведені результати аналітичних досліджень щодо використання надвисокочастотних електромагнітних випромінювань (НВЧ) в різних галузях економіки. Показані переваги використання НВЧ випромінювання в якості джерела теплової енергії в різноманітних технологічних процесах. Розглянуті сучасні наукові концепції використання НВЧ енергії для селективного руйнування природних мінералів. Приведені результати експериментальних досліджень активації енергією НВЧ золи-винос, що використовується як добавка в цементних матеріалах. Наведена інформація щодо питань безпеки використання НВЧ випромінювання*

**Ключові слова:** НВЧ випромінювання, активація золи-винос, питання безпеки використання надвисокочастотних електромагнітних випромінювань

### Вступ

Вперше надвисокочастотний діапазон частот (НВЧ) електромагнітних випромінювань почали використовувати в кінці 30-х років минулого століття в радарних установках для виявлення літаків і кораблів противника [1]. На сьогодні з використанням НВЧ енергії працюють різноманітні численні пристрої. Перевагою НВЧ нагріву є високий ККД перетворення НВЧ енергії в теплову в об'ємі тіл, які нагріваються. Теоретичне значення цього ККД близько до 100%. Теплові втрати в підвідних трактах зазвичай невеликі, і стінки хвилеводів і робочих камер залишаються практично холодними. На думку [2] при НВЧ-нагріванні тепловиділення відбувається безпосередньо в об'ємі самого матеріалу, тому такий нагрів є більш ефективним і легко керованим.

Другий перспективний напрям використання НВЧ випромінювання став його термомеханічний вплив на різні природні мінерали. У 1988-1990 роках гірське бюро США провело дослідження щодо впливу НВЧ-енергії на деякі мінерали, яке послужило поштовхом досліджень в цьому напрямку [3]. За допомогою НВЧ-енергії досягається селективне руйнування мінералів з питомою витратою енергії в багато разів менше ніж у традиційних способів руйнування (дробарки, кульові млини і т.д.).

**Мета роботи.** Проведення досліджень використання НВЧ випромінювання в технології виробництва будівельних матеріалів, зокрема активації золи-винос для цементних матеріалів.

### Виклад основного матеріалу

Техніко-економічні аспекти нових фізичних методів разупрочнення руд поки що знаходяться в стадії вивчення [4]. Спостерігається підвищення температури окремих мінералів до 1000°C [5]. Нагрівання відбувається на поверхні рудного мінералу, при цьому на кордоні руда-порода (мінерал-мінерал) виникають сильні термомеханічні напруги.

Не менш важливим напрямком використання СВЧ випромінювання є використання «Нетеплового ефекту НВЧ» для різних цілей. Наприклад, застосування надвисокочастотної електромагнітної установки для модифікації полімерних плівок [6]. Використання НВЧ технологій в технологічних процесах проявляється в інтенсифікації полімеризації і деполімеризації термореактивних полімерів, коли НВЧ випромінювання виступає каталізатором хімічних реакцій, прискорюючи їх в 5-200 разів. [7].

Електромагнітні хвилі НВЧ діапазону поширюються і відбиваються за законами світла. Глибина проникнення НВЧ випромінювання визначається його частотою, діелектричними властивостями матеріалу і може істотно змінюватися в залежності від насипної щільності матеріалу [8]. НВЧ-обробка дозволяє здійснювати такі технологічні операції як нагрів, сушка, вулканізація та девулканізація, зміцнення і деструкція матеріалів.

Проведений аналіз літературних даних дозволяє зробити висновок, що різні способи фізико-хімічної модифікації вихідних матеріалів активно застосовуються для отримання полімерних матеріалів з поліпшеним комплексом властивостей. За допомогою НВЧ-технологій здійснюють реакції полімеризації і деполімеризації, затвердіння зі швидкістю в десятки разів більшою, ніж в звичайних умовах.

### Технологічні особливості використання НВЧ випромінювання

У сучасному житті НВЧ хвилі використовуються досить активно в стільниковому телефоні, системах радіолокації і радіонавігації, технології Wi-Fi, бездротової Wi-Max, LTE (LongTermEvolution), радіоінтерфейс малого радіусу дії Bluetooth. НВЧ випромінювання знайшло застосування в промисловості і медицині.

По-іншому НВЧ хвилі в науковій літературі отримали поширену назву мікрохвиль. Мікрохвильовим випромінюванням називають діапазон частот 300 ГГц до 300 МГц (довжина хвилі від 1 мм до 1 м) в електромагнітному спектрі розташований між інфрачервоними і радіочастотами [11]. Міжнародною угодою для використання у побутовій і промисловій нагрівальній апаратурі регламентований ряд частот: 915, 2450, 5800, 22125 МГц [12], але в більшості мікрохвильових установок використовується частота 2450 МГц, на якій працюють промислові та побутові мікрохвильові печі. Діапазон НВЧ випромінювання умовно ділять на піддіапазони дециметрових хвиль (частоти від 300 МГц до 3 ГГц, довжини від 0,1 м до 1 м), сантиметрових хвиль (частоти від 3 ГГц до 30 ГГц, довжини від 0,01 м до 0,1 м), міліметрових хвиль (частоти від 30 ГГц до 300 ГГц, довжини від 0,001 м до 0,01 м).

Поглинання НВЧ-випромінювання обумовлено дією двох факторів. По-перше, при накладенні НВЧ-випромінювання рух диполів (полярних молекул або інших відокремлених груп атомів) набуває певну орієнтацію, пов'язану з характером поля, що накладається. При частоті 2,45 ГГц орієнтація диполів молекул і їх розупорядкування може відбуватися кілька мільярдів разів в 1 секунду, що і призводить до швидкого розігріву зразка.

Виробництво будівельних матеріалів є високоенергоємною галуззю економіки, пов'язаної з випалюванням, дроблення, подрібнення, помелом різних природних і техногенних продуктів. Житлово-будівельний комплекс споживає 30-40% від всієї енергії, що використовується в країні.

Розробка сучасних потужних мегатронів дозволяє використовувати їх для розігріву мерзлого ґрунту, сушки деревини. В роботі [13] була вивчена можливість модифікації поверхні глинистих мінералів з високим вмістом монтморилоніту в електромагнітному полі високої частоти для підвищення міцності керамічних виробів. Більш вузький розподіл частинок по радіусах в зразках глини, обробленої НВЧ-випромінюванням, доводить наявність ефекту диспергації частинок.

Як об'єкт досліджень впливу НВЧ випромінювання на властивості золи-винесення нами була вибрана зола-винос Ладижинської ТЕС з вмістом основних оксидів, %: SiO<sub>2</sub> - 52,1; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - 23,1; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - 15,6; CaO - 3,16; MgO - 1,08; K<sub>2</sub>O - 0,4; Na<sub>2</sub>O - 1,2; SO<sub>3</sub> - 0,57 [14].

### Вплив НВЧ випромінювання на дисперсність і властивості золи-винесення

Вміст в золі незгорілих вуглецевих частинок залежать від способу спалювання вугілля і коливається в досить широкому діапазоні. Основним компонентом золи-винесення є склоподібна алюмосилікатна фаза, вміст якої становить 40-65% від її маси. З кристалічних фаз в золах можуть бути присутніми а-кварц і муліт, а при підвищеному вмісті Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> також гематит. Кальцій в золі може бути присутнім у вигляді вільного оксиду, а також у складі силікатів, сульфатів та інших сполук.

Після НВЧ обробки золи-винесення проводилася порівняльна оцінка дисперсності активованої і неактивованої золи-винесення, шляхом оцінки залишку на ситі 008 після просіювання. Насипна щільність золи-винесення склала для активованої і неактивованої відповідно 1170 кг/м<sup>3</sup> і 1205 кг/м<sup>3</sup>, залишок на ситі для звичайної золи-винесення - 22%, активованої - 16%.

Активация золи-винесення проводилася в лабораторній установці при температурі 600°C і частоті 2450 МГц. Активовану золу-винесення було досліджено як «умовний цемент» та випробувано за аналогією цементу. На рис.1 і 2 наведені порівняльні дані випробувань водно-зольної суміші при В/Т = 0,6 за методологією випробування термінів твердіння цементу з активованою і не активованою золою-винесення.

Як видно з рис. 1 і 2 динаміка структурної міцності (аналог початку термінів твердіння цементу)

водо-зольної суміші з активованою золю настає через 4 години, для неактивованої золи-винесення - через 5 годин 12 хв. Кінець умовного «тужавіння» водно-зольної суспензії з активованою золю настає через 5 ч 12 хвилин, а з неактивованою - через 6 годин 50 хв.

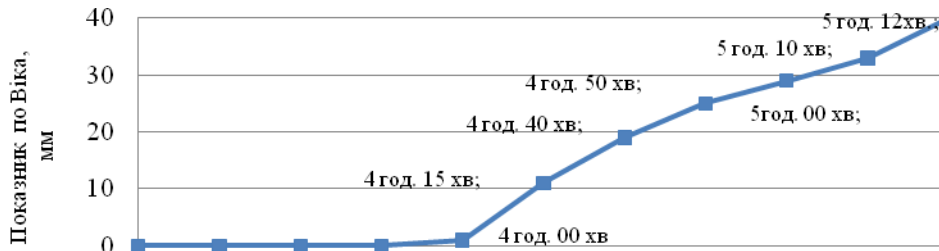


Рис. 1. Динаміка проникнення голки в водно-зольний розчин, аналогія тужавіння цементу по прибору Віка (зола активована)

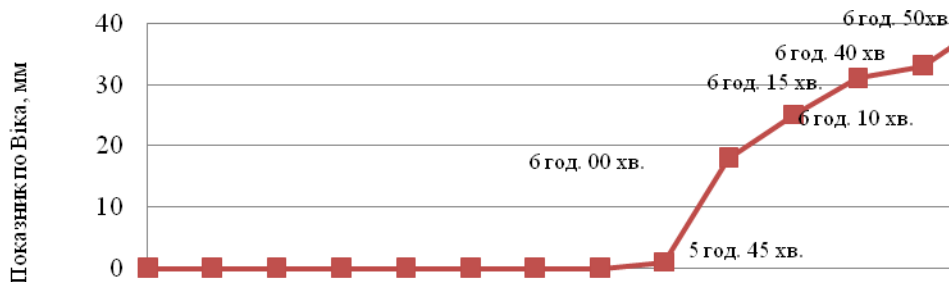


Рис. 2. Динаміка поглиблення голки в водно-зольний розчин, аналогія тужавіння цементу по прибору Віка (зола не активована)

Виявлений ефект приросту структурної міцності активованої золи-винесення, очевидно є ідентичним процесам контактної-конденсаційного твердіння, за рахунок утворень каменеподібних тіл при виникненні контактів в результаті фізичних поверхневих явищ між мікрочастинками речовини без зміни її хімічного складу.

Цілком очевидно, що в процесі короткотривалого НВЧ опромінення, металева складова золи-винесення, головним чином ( $F_2O_3$ ), і вуглецева складова, миттєво нагріваються в порівнянні з діелектричними складовими ( $SiO_2$ ;  $Al_2O_3$ ;  $CaO$ ) в результаті чого відбувалось руйнування макроструктури частинок золи, яка стає більш хімічно активною.

В роботі [15] автори підтверджують, що ефективно нагріваються в НВЧ-полі вуглець і метали. Якщо вугілля і оксиди перехідних металів нагріваються до високих температур то оксиди титану і цирконію - тільки в помірних, а оксиди алюмінію, магнію і кремнію практично не вдається розігріти до температур вище 100-150 °С.

Активована зола-винесення була випробувана, як цементно-зольно піщана суміш в якій частина цементу замінювалася активованою золю-винесення. В проведені раніше нами роботі [14] наведені результати використання золи-винесення, активованої НВЧ випромінюванням. Активована зола-винос забезпечує додатковий приріст міцності золю цементних будівельних матеріалів.

Аналіз рентгенограм золю цементних складів показує, що композиції з 20-60% золи містять складові, як клінкеру, так і зольних мінералів. Поява абсолютно нових новоутворень, характерних для гідратаційного твердіння таких композицій, не відбувається. Проте інтенсивність ліній, характерних для  $Ca(OH)_2$  ( $d / n = 2,61$  10-10 м) і  $\beta-C_2S$  ( $d / n = 3,03; 2,76; 2,72; 1,92$  10-10 м) зменшується, а ліній, які відносяться до  $CaO$  ( $d / n = 2,39$  10-10 м),  $Fe_2O_3$  ( $d / n = 2,68$  10-10 м) і  $\alpha-SiO_2$  ( $d / n = 3,34$  10 10 м), - збільшується, що свідчить про те, що вільна  $Ca(OH)_2$  в більшій мірі хімічно зв'язується в гідросилікатний гель.

Наявність в складі золи-винесення близько 16%  $Fe_2O_3$  і диспергуючого ефекту при її опроміненні НВЧ робить можливим отримання з неї необхідних елементів, наприклад, оксидів заліза.

На рис. 3 наведено вихідні інструменти (активована НВЧ випромінюванням зола - винесення і магніт).



Рис. 3. Вихідні матеріали для оцінки магнітних властивостей і вилучення магнітних фракцій із золи-винесення



Рис. 4. Візуальна оцінка вмісту оксидів заліза в складі золи – винесення Ладижинської ТЕС

На рис. 3 показана вихідна зола-винесення і магніт, які були використані для оцінки магнітних властивостей золи-винесення. Як видно з рис. 4 на поверхні золи - винесення залишився «кратер», що свідчить про те, що частинки заліза через його магнітні властивості притягують і частину діелектричної складової золи-винесення.

Магнітна сепарація золи-винесення дозволяє вилучати магнітну фракцію для її подальшого використання в якості компонента штукатурок (бетонів) для захисту від іонізуючих випромінювань та інших цілей.

Таким чином обробка золи-винос НВЧ випромінюванням дозволяє розглядати побічний продукт енергетичної галузі, як цінний продукт, що забезпечує зростання міцності цементних матеріалів.

### Питання безпеки використання НВЧ випромінювання

Однією з перешкод широкого впровадження НВЧ технологій є часто підвищена «уявна» небезпека для людини від впливу НВЧ випромінювання. Тривала дія високочастотного електромагнітного випромінювання (ЕМВ) шкідлива для здоров'я людини і ніким не заперечується. Для зменшення впливу ЕМВ при роботі комп'ютерів, НВЧ-печей, холодильників з системами NoFrost, телевізорів і багатьох інших приладів необхідно керуватися існуючими санітарно-гігієнічними нормами.

Основними з них є Санітарні правила і норми СанПіН2.2.4/2.1.8.055 96 «Електромагнітні випромінювання радіочастотного діапазону (ЕМВ РЧ)». Діють і вторинні документи по відношенню до СанПіН 2.2.4 / 2.1.8.055 96: Гігієнічні нормативи ГН 2.1.8./2.2.4.019-94 «Тимчасові допустимі рівні (ТДР) впливу електромагнітних випромінювань, що створюються системами стільникового радіозв'язку» і ін.

Оцінюваним параметром для умов непрофесійного впливу на населення, яке проживає на територіях, прилеглих до Базових станцій стільникового зв'язку, які випромінюють радіосигнал НВЧ-діапазону, є значення щільності потоку енергії еквівалентної (ЩПЕ) плоскої хвилі, вираженої в мкВт/см<sup>2</sup>. Гранично допустимий рівень (ГДР) ЩПЕ при цьому становить 10 мкВт/см<sup>2</sup>. Значення 10 мкВт/см<sup>2</sup> також зустрічається в санітарних нормах при встановленні гранично допустимого рівня для ЩПЕ НВЧ-печей.

Неоднозначність ситуації полягає в тому, що на виробництві працівнику, що професійно експлуатує технічні засоби, які є джерелами високочастотного ЕМВ, встановлена ідентична межа

ЩПЕ високочастотного випромінювання - 10 мкВт/см<sup>2</sup>. У той же час людина в квартирі або на робочому місці може піддаватися високочастотному випромінюванню від стільникового телефону з величиною ЩПЕ до 100 мкВт/см<sup>2</sup>.

Для НВЧ-печей, що працюють, як і стільникові телефони в високочастотному діапазоні-2450 МГц санепідгляд колишнього СРСР (СН № 2666-83 «Гранично допустимі рівні щільності потоку енергії, що створюється мікрохвильовими печами») була встановлена ГДК витоку НВЧ-випромінювання мікрохвильової печі на рівні 10 мкВт/см<sup>2</sup>, на відстані 0,5 м від печі. За тривалістю щоденного використання НВЧ-печі і стільникові телефони приблизно однакові.

Другим важливим параметром, що характеризує ступінь впливу на організм людини, є SAR (Specific Adsorption Rate) - питома поглинена потужність, яка припадає на одиницю маси тіла або тканини. В системі CI SAR визначається в ватах на 1 кг (Вт/кг).

У США Сертифікат видається Федеральною комісією зв'язку (FCC) на стільникові апарати, максимальний рівень SAR яких не перевищує 1,6 Вт/кг (при чому, поглинена потужність випромінювання приводиться до 1 грама тканини органів людини). В Європейських країнах, згідно з міжнародною директивою Комісії із захисту від неіонізуючого випромінювання (ICNIRP), значення SAR мобільного телефону не повинно перевищувати 2 Вт/кг (при цьому поглинена потужність випромінювання наводиться до 10 грам живої тканини органів людини). Значення SAR також залежить і від частоти, на якій проводиться вимірювання.

### Висновки

При використанні НВЧ-нагрівання тепловиділення відбувається безпосередньо в об'ємі самого матеріалу, тому такий нагрів є більш ефективним і легко керованим, що дозволяє використовувати його в різноманітних галузях техніки і на самперед в енергозатратних технологіях виробництва будівельних матеріалів. НВЧ випромінювання є дієвим інструментом економії енергетичних ресурсів в сучасних технологіях виробництва. За рахунок селективного нагріву золи-винос зростає її дисперсність та гідравлічна активність в цементних матеріалах. За допомогою магнітної сепарації з опроміненої золи-винос простіше вилучати магнітну фракцію для її подальшого використання.

При використанні НВЧ нагрівачів необхідно керуватися нормативними документами, контролювати щільність потоку енергії і питому поглинену потужність, що припадає на одиницю маси тіла.

Парадоксальність ситуації полягає в тому, що чинні Санітарні правила і норми які стосуються електромагнітних випромінювань радіочастотного діапазону по суті встановлюють ГДК витоку НВЧ-випромінювання для професійних працівників, що експлуатують технічні засоби (джерела високочастотного ЕМВ), ідентичну межу щільності потоку енергії еквівалентної 10 мкВт/см<sup>2</sup>. Цей показник відповідає показнику для мікрохвильової печі (10 мкВт/см<sup>2</sup>), на відстані 0,5 м від печі, і за тривалістю щоденного використання НВЧ-печі і стільникових телефонів в середовищі (Wi-Fi) та іншого «електромагнітного смоку» є приблизно однаковим.

На пострадянському просторі НВЧ випромінювання, на відміну від розвинених країн, поки що знайшло обмежене застосування в будівельній галузі. З огляду на зарубіжний досвід, крім технічних проблем, значною перешкодою впровадження НВЧ випромінювання є ототожнення його переважною більшістю населення з іонізуючим випромінюванням, до якого населення через «Чорнобиль» відноситься з великою насторогою.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Рахманкулов Д.Л., Шавшукова С.Ю. История науки и техники, 2007, т.12, №3, - С. 3-8.
2. Завражин Д.О. Кинетика и интенсификация процессов твердофазной технологии обработки модифицированных полимер-углеродных материалов на основе СВЧ-нагрева: автореф. дис. канд. техн. наук. – Тамбов, 2011. – 150 с.
3. Walkiewicz I. W., Kazonich. G., McGill. S.L.// Minerals and metallurgical processing. 1988. v5.№1 p.19.
4. Ревнивцев В.И. Селективное разрушение минералов. - М.: «Недра». 1988 г. -285с.
5. Соловьёв В.И. Взаимодействие мощных СВЧ полей метрового диапазона с рудными породами различного состава. // Обогащение руд. 2001 №2, - С.13-14.
6. Абакачева Е.М. // Башкирский химический журнал. – 2010. – Т. 17. –№ 5. – С.79–81.
7. Микроволновая обработка термореактивных и термопластичных полимеров / Г.А. Морозов [и др.] // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2011. – Том 14. – № 3. – С. 114–121.
8. Побединский В.С. Активирование процессов отделки текстильных материалов энергией электромагнитных волн ВЧ, СВЧ и УФ диапазонов. – Иваново: ИХР РАН, 2000. – 128 с.

9. Низкоинтенсивные СВЧ–технологии (проблемы и реализации) / Г.А. Морозов [и др.]. – М.: Радиотехника, 2003. – 112 с.
10. Thuery J. *Microwaves: Industrial, Scientific and Medical Applications*. Artech House Boston London, 1992. – 673 p.
11. Mings D. M. P., Baghurst D. R. // *Chem. Soc. Rev* 1991 № 20 - P.1.
12. Strauss C. R., Triano R. W. // *Austral. J. Chem* 1995.- № 48.- P. 1665.
13. Прохина А.В., Шаповалов Н.А., Латыпова М.М. Модификация поверхности глинистых минералов с высоким содержанием монтмориллонита в электромагнитном поле высокой частоты // *Современные наукоемкие технологии*. – 2011. – № 1 – С. 135-136.
14. Сердюк В.Р., Сидлак А.С. Теоретические предпосылки внедрения СВЧ излучений при активации золы-выноса для бетонных смесей. // *Науково-технічний збірник “Будівельні матеріали, вироби та санітарна техніка” Випуск № 56 (2015).* – С.104-110.
15. Кустов Л.М., Синев И.М. СВЧ-активация катализаторов и каталитических процессов // *Журнал физ. химии*. – 2010. – Т. 84, № 10. – С. 1835–1856.

*Сердюк Василь Романович* – д.т.н., проф. завідувач кафедри інженерних систем у будівництві Вінницького національного технічного університету.

*Сідлак Олександр Сергійович* – магістр Вінницького національного технічного університету.

**V. Serdyuk**

**A. Sidlak**

## THE RELEVANCE OF THE USE OF MICROWAVE RADIATION IN BUILDING MATERIALS TECHNOLOGY

Vinnitsia National Technical University

*This article presents the results of analytical studies on the use of microwave electromagnetic radiation (microwave) in various sectors. The advantages of using microwave radiation as a source of thermal energy in various technological processes. The modern scientific concept of using microwave energy for selective destruction of natural minerals. The results of experimental studies of microwave activation energy of fly ash removal, which is used as an additive in cement materials. The information on security issues using microwave radiation*

**Keywords:** *microwave radiation, activation of fly ash removal, the issue of safety of microwave electromagnetic radiation*

*Serdyuk Vasilii* – prof. Head of Systems Engineering in construction Vinnitsia National Technical University.

*Sidlak Alexander* – Master, Vinnitsia National Technical University.

**V. P. Сердюк**

**O. C. Сідлак**

## АКТУАЛЬНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СВЧ ИЗЛУЧЕНИЯ В ТЕХНОЛОГИИ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Винницкий национальный технический университет

*В данной статье приведены результаты аналитических исследований по использованию сверхвысокочастотных электромагнитных излучений (СВЧ) в различных отраслях экономики. Показаны преимущества использования СВЧ излучения в качестве источника тепловой энергии в различных технологических процессах. Рассмотрены современные научные концепции использования СВЧ энергии для селективного разрушения природных минералов. Приведены результаты экспериментальных исследований активации энергией СВЧ золы-выноса, которая используется, как добавка в цементных материалах. Приведена информация по вопросам безопасности использования СВЧ излучения*

**Ключевые слова:** *СВЧ излучение, активация золы-выноса, вопросы безопасности использования сверхвысокочастотных электромагнитных излучений*

*Сердюк Василий Романович* - д.т.н., проф. заведующий кафедрой инженерных систем в строительстве Винницкого национального технического университета.

*Сідлак Олександр Сергеевич* - магистр Винницкого национального технического университета.