

ВИВЧЕННЯ ВПЛИВУ РОЗМІРУ ТА СКЛАДУ НАНОКОМПОЗИТІВ Fe_3O_4 НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ГІПЕРТЕРМІЧНОЇ ТЕРАПІЇ

Нікітчина Лілія

здобувачка вищої освіти

Свиридюк Катерина

асистент

Кафедра хімії

Житомирський державний університет імені Івана Франка, Україна

Ефективність магнітної гіпертермії при онкотерапії суттєво визначається розміром і морфологією частинок Fe_3O_4 , а також їх складом і магнітними властивостями. Літературні дані свідчать, що оптимальними для досягнення високих показників питомої швидкості поглинання енергії (SAR) є кубічні наночастинки Fe_3O_4 розміром близько 19 нм, які демонструють SAR до 2452 W/g у полі 520 кГц та 29 кА/м, максимальні серед відомих водорозчинних форм (підтверджено для умов, безпечних для клінічного застосування). [1,2]

Аналогічні результати підтверджуються для кубів 30–35 нм: їх нагрівання ефективніше порівняно зі сферичними частинками > 35 нм. [2]

Дослідження форми доводять, що нанострижні (nanorods) мають значно більший SAR — до 862 W/g при 800 Ое, що в ~6 разів перевищує значення для сфер (140 W/g) і майже в 3 рази — для кубів (314 W/g). Зі збільшенням аспектного співвідношення росте й ефективність нагрівання, особливо при вирівнюванні частинок у магнітному полі. [3,4]

Щодо розміру, гіпотеза підтверджується і у роботах [2,5]: оптимум знаходиться у діапазоні ~20–30 нм, де спостерігається перехід у режим феромагнетизму з максимальним нагріванням. Частинки меншого розміру (< 10 нм) демонструють нижче SAR через переважання релаксаційних втрат, тоді як надто великі (> 30 нм) мають зменшену ефективність

Крім форми і розміру, склад та структура значно впливають на гіпертермічну здатність. Наноккомпозити “superparticles” (полікристалічні агрегати) розміром 160–400 нм зберігають суперпарамагнітні властивості й досягають SAR $\approx$ 250 W/g при 310 кГц і концентрації лише 0,5 мг/мл. [6] Інші підходи — створення $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$ структур — демонструють, що силіка-покриття підвищує Brownian-релаксацію й SAR до $\sim$ 111 W/g, проте надмірна товщина знижує ефективність наноматеріалу. [7] Також композиційні шари на основі Со-або Zn-допованих феритів здатні суттєво збільшувати тепловіддачу: $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Co}_x\text{Zn}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$ демонструє SAR до 2400 W/g під полем 80 мТ при 309 кГц. [7]

Окрім того, оболонки у вигляді кластерів з олігосахаридною оболонкою (30 нм куби), виявили SAR 2614 W/g, що значно перевищує комерційні аналоги.

$\text{ZnO}_4/\text{Co}_x\text{Zn}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$ демонструє SAR до 2400 W/g під полем 80 mT при 309 кГц. Водночас багатифункціональні нанокуби демонструють нагрівання до 5000 W/g при одночасній дії змінного електромагнітного поля та NIR-лазера, що забезпечує повне апоптозне знищення пухлини *in vivo*. [7]

Нарешті, комбінація ядро-оболонка з Fe/Fe₃O₄ дозволяє отримати значно підвищену SAR у клітинних моделях, незважаючи на певні складнощі з окислювальною стабільністю. [7]

Аналіз літературних джерел свідчить про те, що оптимальний розмір наночастинок для застосування у гіпертермії становить $\approx 19\text{--}30$ нм. Крім розмірів, на ефективність застосування впливає геометрія наночастинок, куби, стрижні, нанопалички — значно ефективніші за сфери. Підвищенню гіпертермії сприяють також модифікація поверхні, допування, полімерні оболонки тощо.

Список використаних джерел

1. From Core–Shell FeO/Fe₃O₄ to Magnetite Nanocubes: Enhancing Magnetic Hyperthermia and Imaging Performance by Thermal Annealing / T. Sojková та ін. *Chemistry of Materials*. 2023. Т. 35, вип. 16.
2. Fe₃O₄ Nanoparticles: Structures, Synthesis, Magnetic Properties, Surface Functionalization, and Emerging Applications / M. D. Nguyen та ін. *Appl. Sci.*. 2021. Т. 11, вип. 23.
3. Engineering Shape Anisotropy of Fe₃O₄- γ -Fe₂O₃ Hollow Nanoparticles for Magnetic Hyperthermia / G. Niraula та ін. *ACS Applied Nano Materials*. 2021. Т. 4, вип. 3.
4. Tunable Fe₃O₄ Nanorods for Enhanced Magnetic Hyperthermia Performance / Y. Yang та ін. *Sci Rep.*. 2020.
5. Magnetic Hyperthermia with Fe₃O₄ nanoparticles: the Influence of Particle Size on Energy Absorption / G. F. Goya та ін. *Ieee transactions on magnetics*. 2013. Т. 44, вип. 11. С. 4444–4447.
6. Superparamagnetic Superparticles for Magnetic Hyperthermia Therapy: Overcoming the Particle Size Limit / S. B. Attanayake та ін. *Applied Physics*. 2024. Т. 1.
7. Enhanced specific absorption rate in silanol functionalized Fe₃O₄ core-shell nanoparticles: study of Fe leaching in Fe₃O₄ and hyperthermia in L929 and HeLa cells / J. Majeed та ін. *Colloids Surf B Biointerfaces*. 2014.
8. Development of Novel Magnetic Nanoparticles for Hyperthermia Cancer Therapy / S. M. Cassim та ін. *Proc SPIE Int Soc Opt Eng*. 2011.