XXIV Международная научная конференция

Новое в Магнетизме и Магнитных Материалах

1 – 8 июля 2021 года

Сборник трудов

Москва, 2021

УДК 537.624.9

ВЛИЯНИЕ БРОУНОВСКОЙ РЕЛАКСАЦИИ НА МАГНИТНО-ТЕПЛОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАНОЧАСТИЦ ФЕРРИТА ZnMn В ЖИДКОСТЯХ РАЗЛИЧНОЙ ВЯЗКОСТИ

Лю Н.Н.

Аспирантка, МГУ М.В.Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия

Каштанов Е.А.

Студент магистратуры, МГУ М.В.Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия

Пятаков А.П.

Д.ф.-м.н., профессор, физический факультет, Москва, Россия

Жарков М.Н.

Аспирант, Национальный исследовательский мордовский государственный университет имени Н.П. Огарева, Саранск, Россия

Пятаев Н.А.

Д.ф.-.м.н., Профессор, Национальный исследовательский Мордовский государственный университет имени Н.П. Огарева, Саранск, Россия

Сухоруков Г.Б.

Профессор, Лондонский университет королевы Марии, Лондон, Великобритания;

Сколковский институт науки и технологий, Москва, Россия

Тишин А.М.

Д.ф.-м.н., профессор, МГУ М.В.Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия;

Группа компаний AMT&C, Троицк, Россия

Аннотация. *Известно, что нагрев суперпарамагнитных частиц определяется двумя механизмами - броуновским и неелевским. Однако отделить один от другого в силу релаксационного характера обоих представляет собой не простую задачу. В данном докладе на примере нагрева наночастиц* $Zn_xMn_{1-x}Fe_2O_4$ *в воде и глицерине продемонстрирована активация броуновского нагрева в глицерине при температурах выше ~50°C.*

Ключевые слова: *Магнитная гипертермия, Броуновская релаксация, суперпарамагнитные наночастицы*

BROWN RELAXATION EFFECT ON THE MAGNETOTHERMAL PROPERTIES OF ZnMn FERRITE NANOPARTICLES IN LIQUIDS OF VARIOUS VISCOSITY

Liu N.N.

Ph.D student, Lomonosov Moscow State University, Faculty of Physics, Moscow, Russia

Kashtanov E.A.

Master student, Lomonosov Moscow State University, Faculty of Physics, Moscow, Russia

Pyatakov A.P.

Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Lomonosov Moscow State University, Faculty of Physics, Moscow, Russia

Zharkov M.N.

Ph.D student, National Research Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russia

Pyataev N.A.

Doctor medical, Professor, National Research Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russia

Sukhorukov G.B.

Professor, Queen Mary University of London, London, United Kingdom;

Skolkovo Institute of Science and Technology, Moscow, Russia

Tishin A.M.

Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Lomonosov Moscow State University, Faculty of Physics, Moscow, Russia; AMT&C Group, Troitsk, Russia

Abstract.

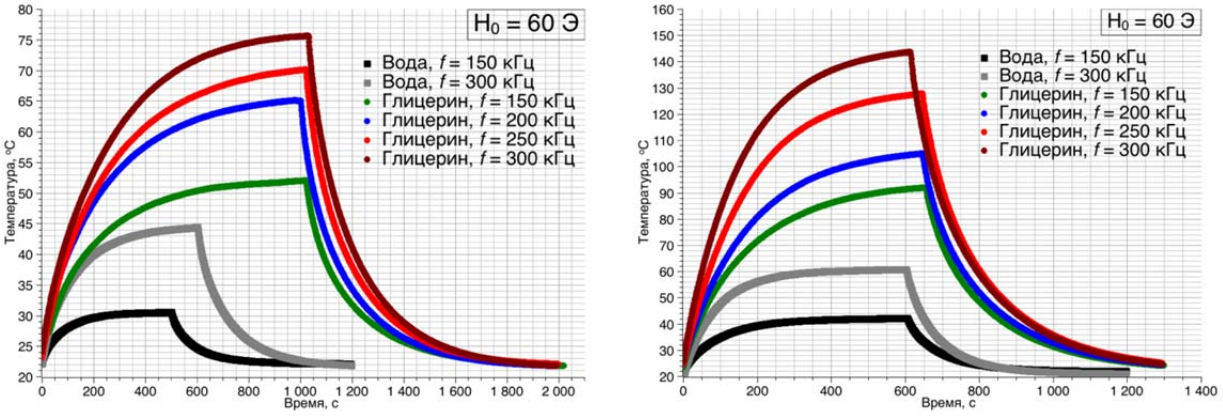
It is known that the heating of superparamagnetic particles is determined by two mechanisms – Brownian relaxation and Néel one. However, to separate the contribution of each mechanism to the overall heating is not an easy task due to the relaxation nature of both. In this report, using the example of heating $Zn_xMn_{1-x}Fe_2O_4$ nanoparticles in water and glycerin, the activation of Brownian heating in glycerol at temperatures above ~ 50°C is demonstrated.

Keywords: *magnetic hyperthermia, Brown relaxation, superparamagnetic nanoparticles*

Магнитная гипертермия – перспективный метод терапии злокачественных новообразований, использующий магнитные жидкости, содержащие наночастицы магнитных оксидов, на которые воздействуют переменным магнитным полем. Энергия магнитного поля, рассеиваемая наночастицами в тепло, приводит к локальному нагреву тканей до 42-45°C, приводя к управляемой гибели клеток перерожденной ткани. При этом минимизируется воздействие на здоровые ткани и общая нагрузка на системы организма [1]. Удельная мощность нагрева суперпарамагнитных наночастиц является важнейшей характеристикой магнитных жидкостей, используемых в магнитной гипертермии. В переменном магнитном поле с действующим значением H_0 и частотой f она определяется следующим соотношением [2]:

$$P = \pi\mu_0\chi_0 H_0^2 f \frac{2\pi f\tau}{1+(2\pi f\tau)^2}\ , \quad \frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_B} + \frac{1}{\tau_N} \qquad (1)$$

где τ – время релаксации, определяемое как сумма обратных величин от броуновского и неелевского вкладов, отвечающим соответственно, механическому вращению частиц и их перемагничиванию под действием магнитного поля. Для взвешенных в жидкости наночастиц вдали от точки Кюри и точки замерзания/стеклования жидкой среды вклады броуновского и неелевского механизмов трудно отделить друг от друга, поскольку их частотные и полевые зависимости аналогичны. Однако, можно воспользоваться тем фактом, что вязкость некоторых жидкостей, таких как глицерин меняется на три порядка в диапазоне температур от комнатной до 150°C, что позволяет выделить броуновский вклад за счет сравнения мощности, рассеиваемой наночастицами при различных температурах.



а) *б)*

Рис. 1. Кривые нагрева и остывания для наночастиц $Zn_xMn_{1-x}Fe_2O_4$ снятых в переменном магнитном поле при различных частотах и действующем значении поля 60Э: а) x=0.1 б) x=0.2.

Для изучения магнитепловых свойств наночастиц использовалась установка, разработанная в ООО «Фармаг» (группа компаний AMT&C), позволяющая перестраивать частоту переменного магнитного поля между четырьмя значениями: 150, 200, 250, 300 кГц. Действующее значение магнитного поля при этом поддерживалось равным 60 Э. В качестве объектов исследования использовались наночастицы феррита $Zn_xMn_{1-x}Fe_2O_4$, с содержанием цинка x=0.05, 0.1 и 0.2 и гидродинамическими диаметрами 111нм, 79нм и 50нм соответственно, взвешенные в воде и глицерине.

График зависимости мощность потерь (Internal Loss Power), т.е. тепловыделение в расчете на единицу массы наночастиц и нормированное на множитель $H_0^2 f$ в формуле (1) приведен на рисунке 2 (величины мощности и теплоемкости жидкостей брались в среднем диапазоне температур кривых нагрева рис. 1). Как можно видеть, ILP слабо зависит от частоты, что позволяет предположить, что характерное время релаксации в данном диапазоне частот удовлетворяют соотношению ωτ~1.

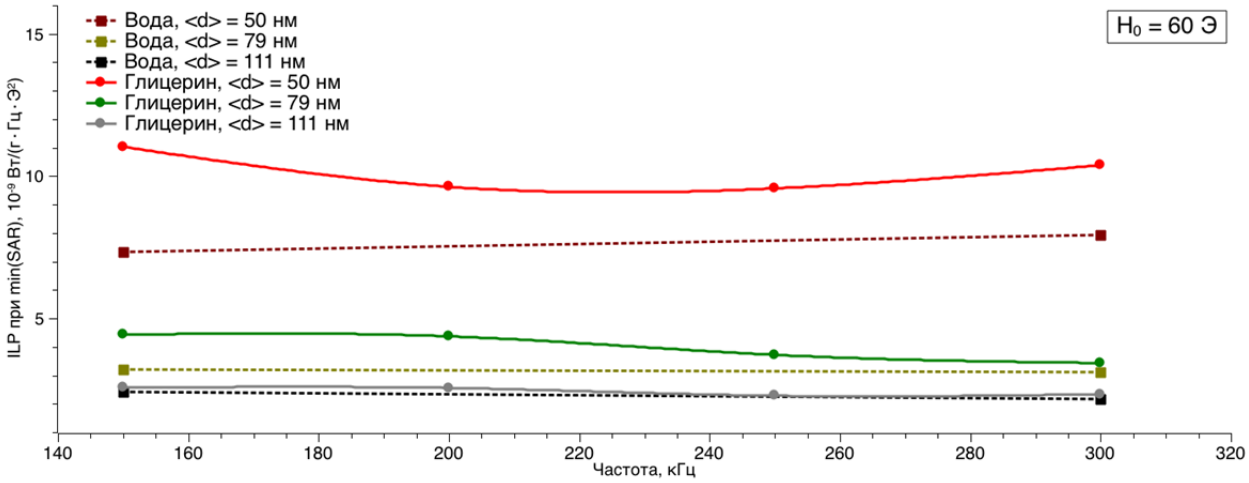
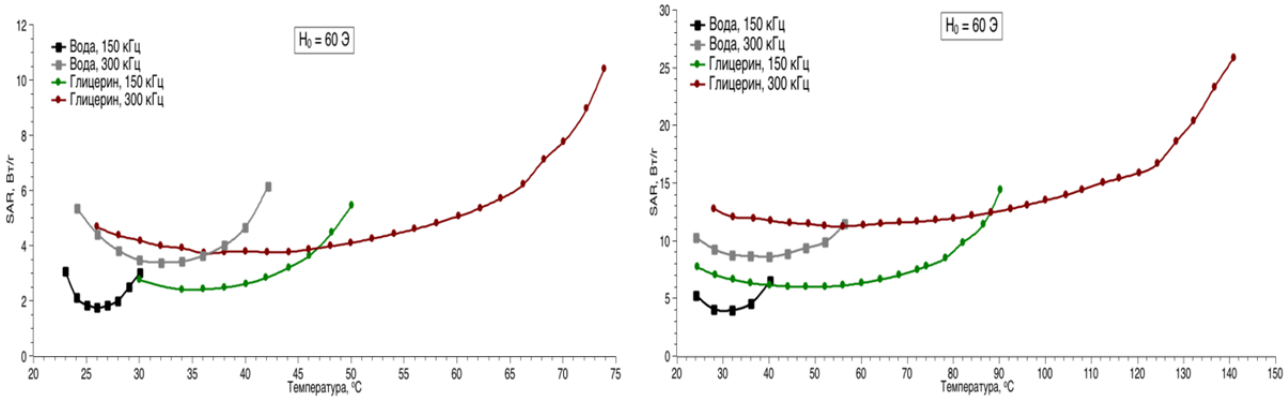


Рис. 2. ILP наночастиц $Zn_xMn_{1-x}Fe_2O_4$ *в глицерине (сплошные линии) и воде (пунктирные линии).*

Также из рис. 2 видно, что значения ILP для глицерина и воды близки друг другу, что говорит о преобладании неелевского механизма в среднем диапазоне температур. Действительно, расчет времени броуновской релаксации частиц в глицерине показывает, что при низких температурах оно велико по сравнению с временем неелевской релаксации (вследствие большой вязкости глицерина), и потому его вклад в общее время релаксации τ мал (см. формулу (1)). По мере увеличения температуры время броуновской релаксации уменьшается

и происходит активация броуновского механизма, что хорошо видно на рисунке 3, на котором показаны значения удельной мощности SAR (specific absorption rate) при различных температурах, вычисленных по методу скорректированного наклона (corrected slope) кривых нагрева/остывания [3]: правый фланг кривых SAR для глицерина уходит наверх и существенно превышает диапазон значений, характерный для частиц в воде. Данная тенденция в той или иной степени наблюдается при всех частотах полей и размерах частиц, что позволяет говорить о проявлении броуновского механизма в асимметрии кривых удельной мощности *SAR(T)*.



а) б)

Рис. 3 Величины SAR при различных температурах, рассчитанные по графикам рис.1: а) x=0.1 б) x=0.2.

Авторы признательны А.М. Салецкому и Волковой О.И. за помощь в определении размера частиц по динамическому рассеянию света на установке Photocor FC. Работы поддержаны грантом РФФИ №19-29-10013. Liu NanNan gratefully acknowledges China Scholarship Council for study support.

Список использованных источников:

1. Périgo E.A., Hemery G., Sandre O., Ortega D., Garaio E., Plazaola F., Teran F.J. Fundamentals and advances in magnetic hyperthermia // Appl. Phys. Rev. 2015, Vol.2(4): 041302. p. 21-22.
2. Rosensweig R. E. Heating magnetic fluid with alternating magnetic field // JMMM 2002, Vol. 252, p. 370-374.
3. Wildeboer R. R., Southern P., Pankhurst Q. A. On the reliable measurement of specific absorption rates and intrinsic loss parameters in magnetic hyperthermia materials // J. Phys. D: Appl. Phys. 2014, Vol.47: 495003, p. 1-14.