

Взаимосвязь магнитных и магнитотепловых свойств наночастиц феррита ZnMnН. Н. Лю^{1,*}, Ю. А. Алехина^{1,†}, А. П. Пятаков^{1,‡}, М. Н. Жарков²,Н. А. Пятаев², Н. С. Перов¹, Г. Б. Сухоруков^{3,4}, А. М. Тишин^{1,5}¹Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2²Национальный исследовательский мордовский государственный университет имени Н. П. Огарева
Россия, 430005 Саранск, ул. Большевикская, д. 68³Сколковский институт науки и технологий. Россия, 143025 Москва, Большой бульвар, д. 30⁴Лондонский университет королевы Марии, E1 4NS Лондон, Майл Энд Роуд⁵Группа компаний АМТ&С. Россия, 108840 Троицк, ул. Промышленная, д. 4

(Поступила в редакцию 27.05.2022; подписана в печать 09.06.2022)

Удельная скорость поглощения электромагнитной энергии SAR (Specific Absorption Rate) является наиболее важным параметром, характеризующим эффективность процесса нагрева при проведении процедуры магнитной гипертермии. Дальнейшее повышение эффективности преобразования электромагнитной энергии в тепловую невозможно без более глубокого понимания физических механизмов преобразования энергии и выработки новых подходов к увеличению величины SAR. Целью данной работы является экспериментальное изучение характера зависимости величины SAR от амплитуды магнитного поля для магнитных наночастиц (МНЧ) ферритов ZnMn и выявление вклада ненулевой ширины петли гистерезиса в нагрев МНЧ. МНЧ ферритов ZnMn были получены методом химического соосаждения. Проведенные экспериментальные исследования показывают, что в крупных МНЧ характер поведения величины SAR существенно изменяется по мере увеличения амплитуды электромагнитного поля (ЕМ), что связано с изменением скорости увеличения площади петли гистерезиса при возрастании амплитуды ЕМ поля. Это позволяет сделать вывод о том, что в крупных МНЧ гистерезисный механизм нагрева является доминирующим и МНЧ размером более 13 нм являются не менее перспективными, чем малые суперпарамагнитные частицы (<10 нм). Сделан вывод, что с учетом критерия Брезовича выбор величины поля на уровне 100 Э более целесообразен для клинической практики применения данных МНЧ.

PACS: 75.90.+w. УДК: 53.

Ключевые слова: удельная скорость поглощения, внутренняя мощность потерь, предел Брезовича.

ВВЕДЕНИЕ

С момента первого сообщения о экспериментах по индуцированному электромагнитным полем (ЕМ) нагреву магнитных микро- и наночастиц (МНЧ), вводимых в лимфатические узлы [1], магнитная гипертермия превратилась в клинически одобренный и хорошо зарекомендовавший себя на практике метод терапии [2]. Жидкостная магнитная гипертермия основана на преобразовании МНЧ электромагнитной энергии в тепло [3]. Для расширения клинического применения данной технологии необходимо проведение комплекса физических, биологических, химических, медицинских и радиотехнических исследований [4]. Удельная скорость поглощения электромагнитной энергии SAR (Specific Absorption Rate) является наиболее важным параметром, характеризующим эффективность процесса нагрева.

Величина SAR МНЧ сильно зависит от целого ряда различных параметров, таких как размер, распределение по размеру, форма, концентрация, химический состав, намагниченность насыщения, анизотропия, ши-

рина петли гистерезиса МНЧ, а также частота и амплитуда внешнего ЕМ поля. При этом вклад в нагрев могут давать различные физические механизмы (релаксация Нееля — вращение магнитного момента с выделением тепла за счет совершения работы по преодолению энергетического барьера, создаваемого анизотропией, без поворота частицы как целого; броуновская релаксация — вращение частицы целиком с тепловыделением за счет вязкого трения; гистерезисный механизм, связанный с выделением тепла при совершении работы по перемагничиванию ферромагнитных МНЧ, а также коллективная неелевская релаксация агрегатов МНЧ). При этом необходимо отметить, что работа по перемагничиванию заключается в преодолении энергетического барьера, создаваемого в том числе анизотропией, играющей, вместе с объемом частиц, ключевую роль в релаксации Нееля. Вместе с этим, в случае гистерезисного механизма к параметрам, напрямую влияющим на тепловыделение, в первую очередь следует отнести остаточную намагниченность и величину коэрцитивной силы, определяющих площадь петли гистерезиса. Более того, вследствие наличия определённого распределения по размеру и наличия в растворе частиц разного размера, вклад в нагрев раствора одновременно вносят различные механизмы.

Разделение вклада, например, неелевского и броуновского механизмов релаксации, является сложной

* nannan.liu@irlc.msu.ru† ya.alekhina@physics.msu.ru‡ pyatakov@physics.msu.ru

экспериментальной задачей, поскольку их частотные и амплитудные зависимости совпадают. Вместе с этим, выявление роли различных физических механизмов в нагреве является крайне важным для дальнейшего повышения эффективности тепловыделения. Исследования процессов тепловыделения в МНЧ в средах с существенно различающейся вязкостью (в воде и в растворе глицерина), выполненные в нашей работе [5], позволили экспериментально наблюдать процесс активации броуновского механизма релаксации по мере изменения вязкости глицерина (на несколько порядков величины) при его нагреве до 100°C и отделить его от неелевского. Целью данной работы является изучение характера зависимости величины SAR от амплитуды магнитного поля для МНЧ ферритов ZnMn и выявление вклада ненулевой ширины петли гистерезиса в нагрев крупных МНЧ.

С точки зрения практического применения в реальной клинической практике, важным фактором является снижение массо-габаритных характеристик и энергопотребления источников EM поля, что требует не только повышения эффективности преобразования энергии EM поля в тепло, но и нахождения оптимального соотношения частоты и амплитуды магнитного поля в рамках критерия Брезовича (произведение частоты поля на его амплитуду не должно заметно превышать уровня около 10^7 Э·Гц [6]).

Как хорошо известно, воздействие EM полей может привести как к благоприятным эффектам (в нашем случае нагрев МНЧ), так и нежелательному нагреву здоровых биологических тканей человека, поэтому особенно важно сбалансировать терапевтический эффект с побочными эффектами лечения. Таким образом, поиск оптимального соотношения между частотой и амплитудой EM поля в пределах, близких к определяемым критерием Брезовича, с одновременным повышением эффективности нагрева в данной области EM полей (определения оптимальных свойств самих МНЧ, а также их различных агломератов) является своего рода «трилеммой» магнитной гипертермии, причем не менее сложной чем трилемма в магнитной памяти [7], как по объему необходимых исследований для нахождения оптимального сочетания всех параметров, так и по глубине возможной оптимизации. Дополнительная сложность задачи, по сравнению с магнитной памятью, определяется требованием нетоксичности и биосовместимости к МНЧ, что существенно сужает круг рассматриваемых магнитных материалов и исключает применение, например, кобальта, который широко используется в производстве сред магнитной памяти для увеличения анизотропии, или редкоземельных элементов.

В работах [5, 8] нами была обнаружена нетривиальная сверхквадратичная зависимость величины SAR от амплитуды поля, что дало возможность существенно повысить нагрев МНЧ в сравнительно слабых магнитных полях на уровне 100 Э и, тем самым, понизить требуемую величину частоты поля. Проведен-

ные в данных работах исследования позволяют предложить новую стратегию магнитной гипертермии — стремиться увеличить амплитуду и уменьшить частоту поля, что является крайне важным с практической точки зрения.

Поскольку, как известно, в отличие от Неелевской и Броуновской релаксаций в суперпарамагнитных МНЧ, имеющих квадратичную зависимость от амплитуды EM поля, увеличение амплитуды магнитного поля в МНЧ, в полях меньших поля насыщения, приводит к резкому возрастанию площади частных петель гистерезиса по сверхквадратичной степенной зависимости, вплоть до пятой степени [1, 8], то данный факт создает предпосылки для существенного повышения эффективности тепловыделения в крупных МНЧ. В настоящей работе нами изучена взаимосвязь между SAR и шириной частных петель гистерезиса и сделан вывод о возможности применения крупных МНЧ в EM полях низкой частоты. Исследования проводились при амплитуде и частоте поля близким к физиологическому критерию Брезовича [6].

1. ДЕТАЛИ ЭКСПЕРИМЕНТА

1.1. Синтез

Образцы МНЧ изготавливались методом химического соосаждения [9]. Синтез проводился в инертной атмосфере аргона для предотвращения окисления ионов двухвалентных металлов. Растворяли 16 ммоль FeCl_3 и 8 ммоль MeCl_2 ($\text{Me} = \text{Mn}^{2+}, \text{Zn}^{2+}$) в 20 мл деионизированной воды, предварительно нагретой до 90°C. Затем, при интенсивном перемешивании, этот раствор медленно по каплям добавляли к 30 мл 1.7 М раствора NaOH. Суспензию МНЧ оставляли перемешиваться еще на 1 час при 100°C. Очищенные МНЧ получали магнитной декантацией и промывкой деионизированной водой. МНЧ высушивали при 80° в вакуумном шкафу в течение 24 часов. Таким образом, были получены ферритовые порошки следующих составов: $\text{Zn}_x\text{Mn}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$ ($x = 0, 0.05, 0.1, 0.15, 0.2, 0.25, 0.3$) [5]. В нашей предыдущей работе мы показали, что размер наночастиц уменьшается с увеличением содержания Zn от 36 нм при $x=0$ до 7 нм при $x=0.3$.

1.2. Измерения SAR

Для измерения магнитотепловых свойств МНЧ использовалась экспериментальная установка для измерения изменения температуры МНЧ под действием EM поля производства Группы АМТ&С (Москва, Россия). Установка включает в себя магнитный модуль: катушку индуктивности (внутренний диаметр 7 мм), последовательно соединенную с генератором переменного тока и реконфигурируемую емкостную систему,

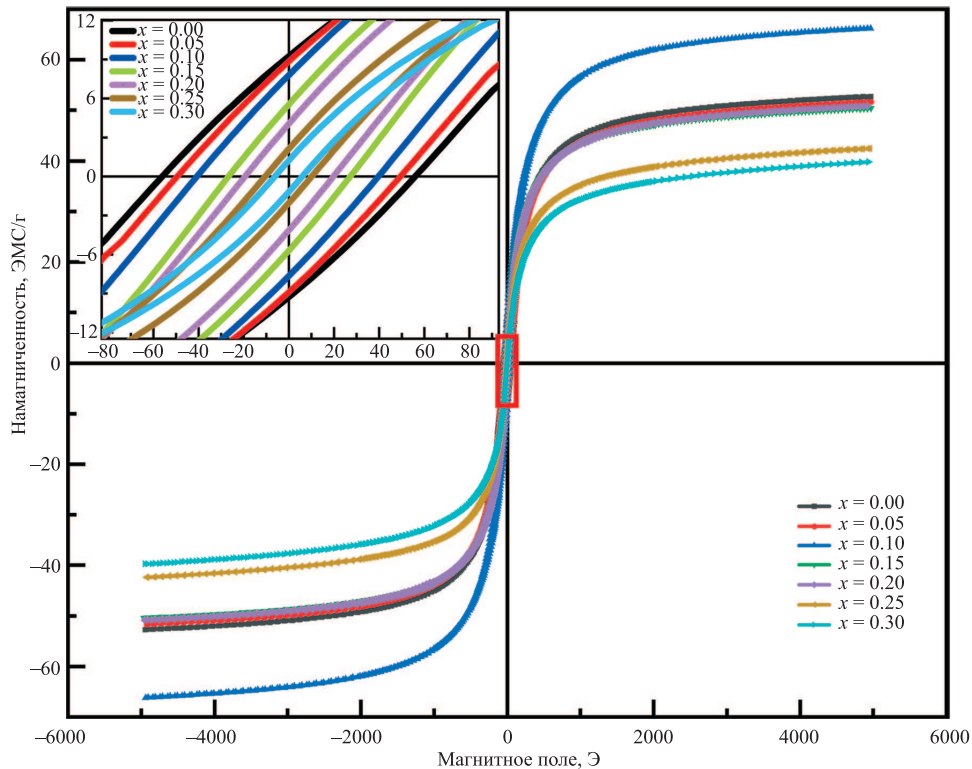


Рис. 1. Петли гистерезиса наночастиц феррита ZnMn. На вставке укрупненно показана область низких полей до 90 Э

позволяющую переключать частотный диапазон. Установка также включает систему водяного охлаждения для предотвращения паразитного нагрева МНЧ за счет вихревых токов и систему сбора данных на основе: термомпары, микровольтметра Agilent 34410A и ПК.

SAR рассчитывался на основе производной температуры по времени [10]:

$$\text{SAR} = C(dT/dt)(M/m), \quad (1)$$

где C — теплоемкость жидкости, dT/dt — скорость нагрева, которая может быть получена методом скорректированного наклона (сумма модулей наклонов для кривых нагрева и охлаждения при фиксированной температуре [11]), M/m — отношение массы воды к массе МНЧ.

SAR возможно также рассчитать, измерив площадь петли гистерезиса образца. SAR рассчитывался путем вычисления площади петли гистерезиса, умноженной на количество циклов в секунду (частоту f) и последующего нормирования на концентрацию образца (масса на единицу объема коллоидного образца) [12]:

$$\text{SAR} = f \times Am, \quad (2)$$

где A — площадь на кривой гистерезиса $M(H)$, m — общая масса МНЧ.

1.3 Магнитные измерения

Магнитные измерения проводились с использованием вибрационного магнитометра (VSM) Lake Shore модели 7407 с максимальным магнитным полем 1.5 Тл. Были измерены кривые намагничивания и петли гистерезиса наночастиц феррита ZnMn при $T = 293$ К. Для измерений образцы были упакованы в полиэтиленовые капсулы с размерами порядка $4 \times 4 \times 0.5$ мм и заламинированы, чтобы предотвратить движение частиц во время измерений. Магнитное поле прикладывалось вдоль плоскости капсулы. Сигнал от держателя является пренебрежимо малым по сравнению с сигналом образцов.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты измерений частных петель гистерезиса произведенные в диапазоне полей до 6 кЭ представлены на рис. 1. Установлено, что величина коэрцитивной силы изменялась от 5 до 55 Э, а намагниченность насыщения от 35 до 60 Гс·см³/г. Зависимость намагниченности насыщения и остаточной намагниченности от концентрации Zn носит немонотонный характер и достигает максимума при $x = 0.1$. Это можно объяснить распределением замещения катионов по А- и В-подрешеткам. Коэрцитивная сила монотонно уменьшается с увеличением концентрации Zn, что

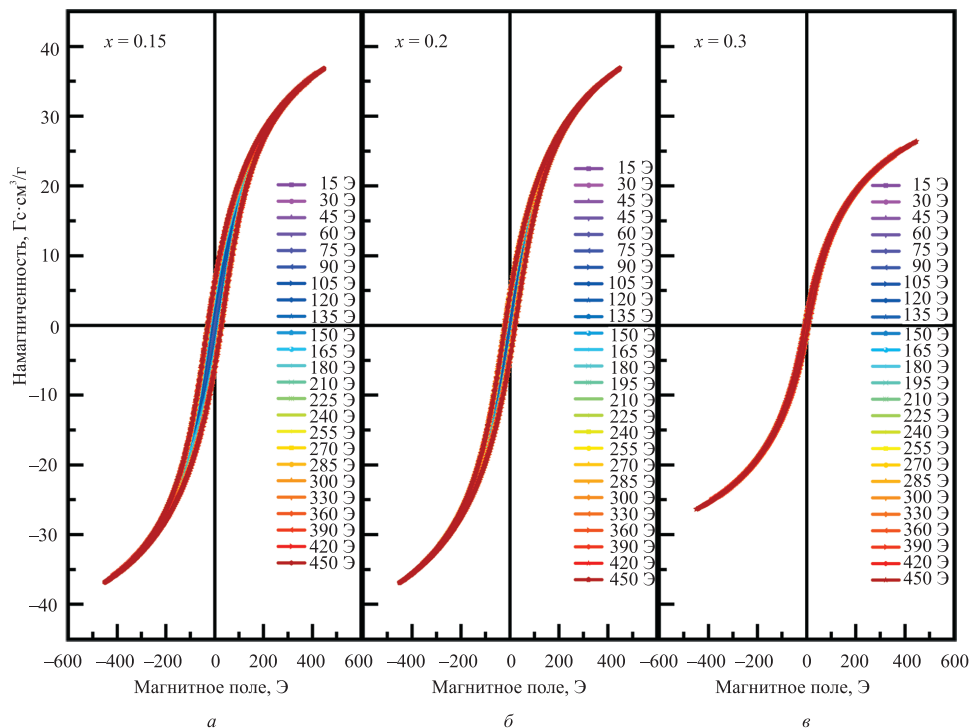


Рис. 2. Петли гистерезиса и площади петель гистерезиса МНЧ $Zn_xMn_{1-x}Fe_2O_4$ в диапазоне полей 0–500 Э: а – $x=0.15$, б – $x=0.2$, в – $x=0.3$

может свидетельствовать об уменьшении анизотропии вследствие замещения Zn .

На рис. 2 показаны результаты более детального исследования петель гистерезиса $Zn_xMn_{1-x}Fe_2O_4$ ($x=0.15, 0.2, 0.3$) (Размеры частиц в образцах с содержанием цинка $x=0.15, 0.2$ и 0.3 составляют 17, 13 и 7 нм, соответственно). Для каждого образца измерена серия частных циклов перемагничивания в диапазоне магнитных полей до 450 Э. Измерения проведены квазистатическим методом. Скорость изменения поля не превышала 5 Э/с (для максимальной амплитуды 450 Э скорость изменения поля составляла 4.5 Э/с). Результаты исследования частных петель гистерезиса использовались для расчета площади петель гистерезиса для разных магнитных полей (см. рис. 3). В силу неустойчивости датчика Холла в диапазоне малых полей некоторые из измеренных петель гистерезиса имели несимметричный вид. Такие петли были измерены повторно, затем была проведена центровка и усреднение получаемой площади для исследуемой амплитуды поля.

Для каждой петли гистерезиса была вычислена площадь (встроенная операция интегрирования Origin), построена зависимость площади от амплитуды магнитного поля. Проведено построение функции в двойном логарифмическом масштабе и аппроксимация линейной функцией для оценки показателя степени зависимости (2.5 для $x=0.15$ и $x=0.2$ и 2 для $x=0.3$). При этом, как упоминалось выше, SAR рассчитывался путем вычисления площади петли гистерезиса A , с уче-

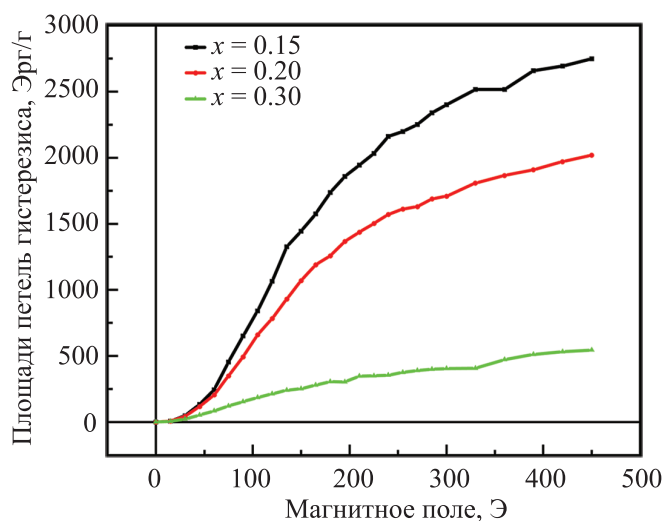


Рис. 3. Площади петель гистерезиса МНЧ $Zn_xMn_{1-x}Fe_2O_4$ ($x=0.15, 0.2, 0.3$)

том количества циклов перемагничивания в секунду f и концентрации исследуемого образца c (масса на единицу объема коллоидного образца). Как можно видеть из данного графика, площадь увеличивается с увеличением амплитуды магнитного поля.

Измерения намагниченности остальных образцов ($x=0.05, 0.1, 0.25$) подтвердили суперпарамагнитное состояние всех МНЧ, используемых в магни-

тотермических измерениях. На рис. 4 представлены петли гистерезиса для магнитных наночастиц $Zn_{0.15}Mn_{0.85}Fe_2O_4$ (размер 17 нм), характерные для исследованных в работе МНЧ $Zn_xMn_{1-x}Fe_2O_4$.

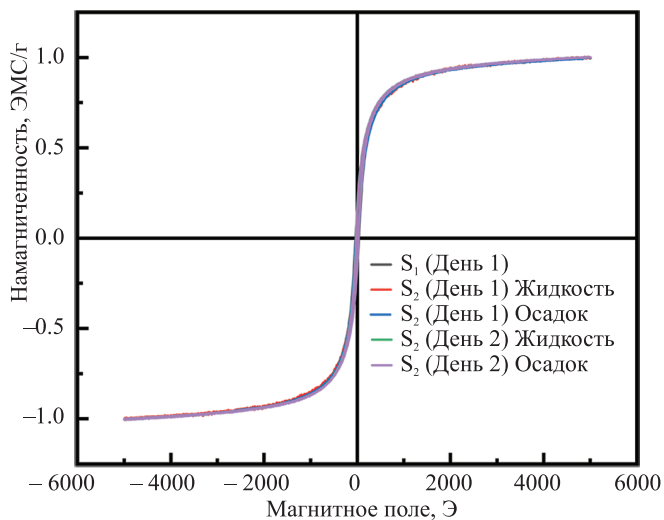


Рис. 4. Типичные петли гистерезиса МНЧ $Zn_{0.15}Mn_{0.85}Fe_2O_4$, S1: до измерения SAR. S2: после измерения SAR

Для контроля воспроизводимости магнитных свойств используемых образцов нами были проведены повторные измерения магнитных свойств суспензии МНЧ (образец 20 мг + деионизированная вода) до и после обработки ЕМ полем для расчета величины SAR. Величина расхождения между измерениями составляет 1–2%, что сравнимо с погрешностью измерения. Результаты показывают, что магнитные свойства образца не меняются в результате нагрева суспензий в процессе измерения величины SAR (т.е. до и после измерения величины SAR).

Расчет величины SAR проводился для частоты 0.1 МГц (см. рис. 5). Результаты показывают, что характер зависимости SAR(H) резко изменяется в зависимости от амплитуды магнитного поля, что связано с изменением скорости увеличения площади петли гистерезиса при нарастании поля. С увеличением поля величина SAR возрастает по нелинейной зависимости ($SAR \sim 1.5-2.1$) в диапазоне 0–100 Э (рис. 5,а), в области более высоких полей 100–200 Э (рис. 5,б) зависимость становится линейной, проявляя тенденцию к насыщению в полях выше 200 Э (рис. 5,в). При сравнении величин SAR, рассчитанных на основе площади петли гистерезиса в данной работе и ранее [8] экспериментально измеренных прямым способом величин SAR, обнаружена существенная корреляция (расчетное значение в поле 100 Э близко к экспериментальному ~ 10 Вт/г). Это позволяет сделать вывод о том, что в данных образцах гистерезисный механизм нагрева является доминирующим, а с учетом критерия Брезовича выбор величины поля на уровне 100 Э более

целесообразен для клинической практики.

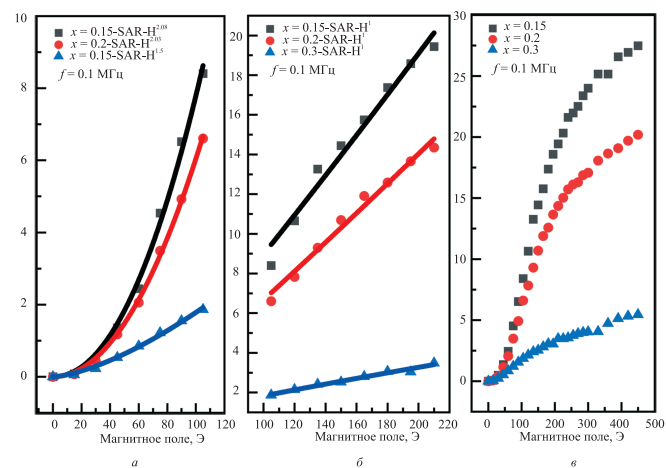


Рис. 5. Значения SAR и кривые для $Zn_xMn_{1-x}Fe_2O_4$ ($x = 0.15, 0.2, 0.3$) на частоте 0.1 МГц: а — 0–100 Э; б — 100–200 Э; в — 0–500 Э

Нами был также дополнительно изучен вопрос о влиянии химического состава и размера МНЧ на характер тепловыделения. С этой целью, нами был изучен характер зависимости размера образцов от времени синтеза и синтезированы образцы с $x=0$ и 0.2. В процессе синтеза размер частиц контролируют, изменяя время перемешивания. Целью измерений являлось выявление роли влияния химсостава МНЧ при сохранении их размера. Установлено, что для наночастиц одного размера $x=0$ и 0.2 значение SAR $x=0.2$ выше. Это указывает на то, что наночастицы с добавлением Zn обладают более высокой эффективностью магнитокалорического преобразования.

Для иллюстрации роли паразитного нагрева воды в переменном магнитном поле, не связанного с процессами перемагничивания магнитных наночастиц, были измерены кривые нагрева/охлаждения дистиллированной воды и физиологического раствора без наночастиц, а также нагрева/охлаждения модельных объектов биоткани: образец куриных мышц в физиологическом растворе, а также образец 123 мг куриных мышц, импрегнированных 21 мг магнитных наночастиц ($x = 0.25$, рис. 6).

Видно, что паразитные эффекты нагрева как в дистиллированной воде, так и в физиологическом растворе, а также в биологической ткани без наночастиц невелики: температура не превышает 30°C , а рассчитанный по этим трем кривым нагрева/охлаждения эквивалент SAR составляет около 2% от SAR для образца куриных мышц, импрегнированных магнитными наночастицами. Эти результаты показывают, что даже для условий, соответствующих $f \times H$ более 3×10^9 А/(м·с), эффект паразитного нагрева не очень высок и намного ниже эффекта нагрева, создаваемого магнитными наночастицами.

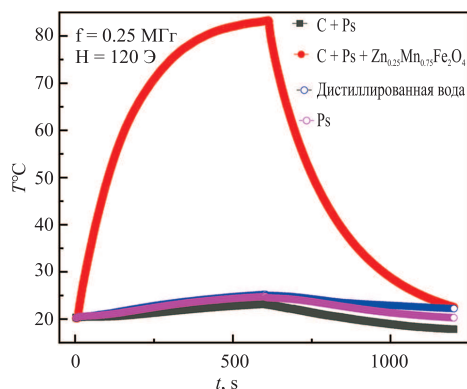


Рис. 6. Значения SAR и кривые для $Zn_xMn_{1-x}Fe_2O_4$ ($x = 0.15, 0.2, 0.3$) на частоте 0.1 МГц: $a - 0-100$ Э; $b - 100-200$ Э; $c - 0-500$ Э

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В соответствии с критерием Брезовича, произведение амплитуды и частоты остается постоянным, что означает, что уменьшение одного параметра EM поля должно приводить к увеличению другого. Поскольку, согласно нашим предыдущим исследованиям, SAR ли-

нейно увеличивается с частотой [5] и в соответствии с вышеприведенными результатами в данных образцах гистерезисный механизм нагрева является доминирующим, то наиболее целесообразным для клинической практики, с учетом критерия Брезовича, является выбор величины поля на уровне 100 Э.

Необходимо продолжение данных исследований при низких частотах таким образом, чтобы величина произведения частоты на амплитуду поля была уверенно в пределах критерия Брезовича 4.5×10^8 А/(м с) = 5.67×10^6 Э/с, а массо-габаритные показатели, энергозатраты и стоимость оборудования стали приемлемыми для массового внедрения технологии магнитной гипертермии в клиническую практику. Так, например, параметры поля 50 кГц \times 100 Э (это 5×10^6 Э/с) позволили бы оказывать воздействие на пациента существенно ниже предела Брезовича [6] и, следовательно, исключить паразитный нагрев здоровых тканей и улучшить технические характеристики источника поля с точки зрения массо-габаритных параметров и энергопотребления.

Работы поддержаны грантом РФФИ (№ 19-29-10013). Лю Н.Н. выражает благодарность China Scholarship Council за поддержку исследований.

- [1] Gilchrist R.K., Medal R., Shorey W.D., Hanselman R.C. et al. // *Ann. Surg.* 1957. **146**. P. 596.
- [2] Thiesen B., Jordan A. // *Int. J. Hyperthermia.* 2008. **24**. P. 467.
- [3] Tishin A.M. *Magnetic Materials and Technologies for Medical Applications*. 1st Edition, Woodhead Publishing, 2021, ISBN 9780128225325.
- [4] Dutz S., Hergt R. // *Nanotechnology.* 2014. **25**, 452001.
- [5] Liu N.N., Pyatakov A.P., Saletsky A.M., Zharkov M.N. et al. // *J. Magn. Mater.* 2022. **555**. P. 1.
- [6] Brezovich I.A. // *Med. Phys. Monogr.* 1988. **16**. P. 11.
- [7] Khvalkovskiy A.V., Apalkov D., Watts S. et al. // *Journal of Physics D: Applied Physics.* 2013. **46**(7). 074001.
- [8] Liu N.N., Pyatakov A.P., Zharkov M.N., Pyataev N.A. et al. // *Appl. Phys. Lett.* 2022. **120**. P. 1.
- [9] Kannan Y.B., Saravanan R., Srinivasan N., Praveena K. et al. // *J. Mater. Sci.: Mater. Electron.* 2016. **27**. P. 12000.
- [10] Pürigo E.A., Hemery G., Sandre O., Ortega D. et al. // *Appl. Phys. Rev.* 2015. **2**(4). 041302.
- [11] Wildeboer R.R., Southern P., Pankhurst Q.A. // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2014. **47**. P. 1.
- [12] Bertotti G. *Hysteresis in magnetism for physicist, material scientists, and eng.* San Diego, CA: Academic Press, 1998.

Correlation of magnetic and magnetothermal properties of ZnMn ferrite nanoparticles

N. N. Liu^{1,a}, Y. A. Alekhina^{1,b}, A. P. Pyatakov^{1,c}, M. N. Zharkov², N. A. Pyataev², N. S. Perov¹,
G. B. Sukhorukov^{3,4}, A. M. Tishin^{1,5}

¹ Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia

² National Research Ogarev Mordovia State University, Saransk, 430005, Russia

³ School of Engineering and Materials Science, Queen Mary University of London, Mile End Road, London, E1 4NS, UK

⁴ Skolkovo Institute of Science and Technology, Moscow, 143025, Russia

⁵ AMT&C Group, Troitsk, 108840, Russia

E-mail: ^anannan.liu@irlc.msu.ru, ^bya.alekhina@physics.msu.ru, ^cpyatakov@physics.msu.ru

The specific absorption rate of electromagnetic energy is the most important parameter to characterize the efficiency of the heating process during magnetic hyperthermia. Further improvements in the efficiency of converting electromagnetic energy into thermal energy are not possible without a deep understanding of the physical mechanisms of energy conversion and the development of new methods to increase SAR values. The purpose of this work is to experimentally investigate the dependence of the SAR value on the magnetic field amplitude of ZnMn ferrite magnetic nanoparticles (MNPs) and reveal the contribution of the

non-zero hysteresis loop width to the heating of the MNPs. MNPs of ZnMn ferrite were obtained by chemical co-precipitation. Experimental studies conducted have shown that in large MNPs, the behavior of SAR values changes significantly with increasing electromagnetic field (EM) amplitude, which is related to the change in the rate of area increase. The hysteresis loop increases with increasing EM field amplitude. This allows us to conclude that the hysteresis heating mechanism dominates in large MNPs, and that MNPs larger than 13 nm are not less promising than small superparamagnetic particles (<10 nm). Considering the Brezovich limitation, choosing a field value at the 100 Oe level is more suitable for clinical practice using MNP data.

PACS: 75.90.+w.

Keywords: specific absorption rate, internal loss power, Brezovich limit.

Received 27 May 2022.

Сведения об авторах

1. Лю Нань нань — магистр, аспирант, мл. науч. сотрудник; e-mail: nannan.liu@irlc.msu.ru.
2. Алехина Юлия Александровна — магистр, аспирант, мл. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-18-47, e-mail: ya.alekhina@physics.msu.ru.
3. Пятаков Александр Павлович — доктор физ.-мат. наук, профессор; e-mail: pyatakov@physics.msu.ru.
4. Жарков Михаил Николаевич — магистр, аспирант, мл. науч. сотрудник; тел.: (834) 235-24-56, e-mail: mikhail.zharkov.92@mail.ru.
5. Пятаев Николай Анатольевич — доктор мед. наук, рук. сектора «Медико-биолого-химические материалы и препараты», профессор; тел.: (834) 235-24-56, e-mail: pyataevna@mail.ru.
6. Перов Николай Сергеевич — доктор физ.-мат. наук, зав. кафедрой, профессор; тел.: (495) 939-18-47, e-mail: perov@magn.ru.
7. Сухоруков Глеб Борисович — доктор физ.-мат. наук, профессор; тел.: (495) 939-11-00, e-mail: g.sukhorukov@qmul.ac.uk.
8. Тишин Александр Метталинович — доктор физ.-мат. наук, профессор; e-mail: tishin@amtc.org.