

МАГНИТОДИНАМИКА И ДИССИПАЦИЯ ЭНЕРГИИ В СУСПЕНЗИЯХ ВЫСОКОКОЭРЦИТИВНЫХ ЧАСТИЦ ДЛЯ МАГНИТНОЙ ГИПЕРТЕРМИИ

С.Б. Кашевский, И.В. Прохоров

Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь

Введение. В последние годы заметно вырос интерес к давней идее локальной магнитной гипертермии злокачественных новообразований [1-2], суть которой составляет термическое разрушение опухоли за счет нагревания переменным магнитным полем вводимых в нее малых ферромагнитных частиц. Для практической имплементации локальной магнитной гипертермии требуется решить множество задач физико-технического и медицинского характера. Ключевой вопрос, определяющий пути технической реализации метода, заключается в выборе типа магнитных частиц. Наибольшее внимание в литературе (см. [1-2]) уделяют ультрамалым (~ 10 нм) однодоменным суперпарамагнитным частицам магнитных оксидов железа (магнетит, маггемит), терапевтически значимое поглощение энергии в которых достигается в радиочастотных полях субмегагерцового диапазона с относительно малой (~100 Э) амплитудой. Альтернативу им составляют более крупные субдоменные частицы с магнитным гистерезисом, требующие применения более сильных (превышающих коэрцитивную силу частиц) полей гораздо меньшей частоты. Работы в этом направлении, на наш взгляд, сдерживались отсутствием до недавнего времени обоснованных представлений о процессах магнитодинамики и поглощения энергии в жидких дисперсиях частиц с магнитным гистерезисом, обладающих дополнительными (механическими) ориентационными степенями свободы. Необходимые сведения получены в предшествующих исследованиях [3-4], выполненных с промышленными и специально синтезированными ферромагнитными частицами.

Как показано в [3] для систем невзаимодействующих частиц, моделируемых разбавленными взвесями частиц в высоковязкой жидкости, большое влияние на поглощение энергии оказывает механическая подвижность частиц в жидкой матрице, благодаря которой частицы в условиях гистерезиса приобретают стационарное ориентационное упорядочение в направлении переменного поля, а интенсивность поглощения энергии поля резко увеличивается. В экспериментах с мелкими животными [5] полученная таким образом зависимость удельной мощности поглощения используется для планирования сеансов гипертермии и анализа ее результатов. Однако предположение о том, что частицы, вводимые в составе суспензии в опухоль, имеют такую же возможность ориентироваться и поглощать энергию, как и в разбавленной суспензии, требует проверки. Цель настоящей работы – экспериментальное исследование магнитодинамики и поглощения энергии дисперсиями специально изготовленных для гипертермии высококоэрцитивных частиц, взвешенных в жидкостях с разными реологическими характеристиками, а также исследование влияния на поглощение энергии концентрации частиц в жидкости.

Материалы и методы. Частицы с оптимальными для гипертермии свойствами получали из водных растворов двух- и трехвалентных соединений железа и кобальта в которых не более 25% атомов металлов имеют трехвалентную форму, а остальные – двухвалентную. Металлосодержащий раствор содержал 0.4 моля гептагидрата сульфата железа (II) $FeSO_4 - 7H_2O$, 0.04 моля сульфата железа (III) $Fe_2(SO_4)_3 - 9H_2O$ и 0.013 моль гептагидрата сульфата кобальта (II) $CoSO_4 - 7H_2O$ в одном литре дистиллированной воды. Осаждение проводили 500-ми миллилитрами 8.5%-ого раствора аммиака. Для дальнейшего

окисления к смеси добавляли 1 моль гидроокиси натрия $NaOH$ и 0.1 моль нитрата натрия $NaNO_3$. Полученные частицы извлекались из раствора, промывались и высушивались. После чего, частицы прокачивались при температуре $300^{\circ}C$ для достижения оптимальной величины коэрцитивной силы.

Переменное магнитное поле частотой 430 Гц и амплитудой до 1100 Э создавали в соленоиде, включенном в резонансный колебательный LC-контур. Динамическую намагниченность I определяли путем интегрирования ЭДС, вырабатываемой парой помещенных в соленоид скомпенсированных измерительных катушек, в одну из которых помещали цилиндрический контейнер с исследуемым материалом. Индукцию магнитного поля измеряли датчиком Холла. Сигнал с измерительных катушек и датчика Холла регистрировали в ПК с последующим восстановлением динамической петли гистерезиса.

Для приготовления суспензий использовали диспергатор ИКА Т 10 basic с насадкой S10N-10G. Диспергирование проводили два раза по 5 минут при скорости вращения 14500 об/мин с перерывом 5 минут.

Исследование влияния вязкости несущей среды. Суспензия готовилась на базе стандартных частиц для гипертермии, объемная концентрация частиц в суспензии составляла 1%, в качестве несущих жидкостей выбраны

- керосин, вязкость 0.018 Пз,
- масло АМГ-10, вязкость 0.18 Пз,
- минеральное трансмиссионное масло 80W-90, вязкость 2 Пз.

На рисунке 1 представлены динамические петли гистерезиса для полей с амплитудами 400Э (рис.1,а), 570Э (рис.1,б) и 1130Э (рис.1,в).

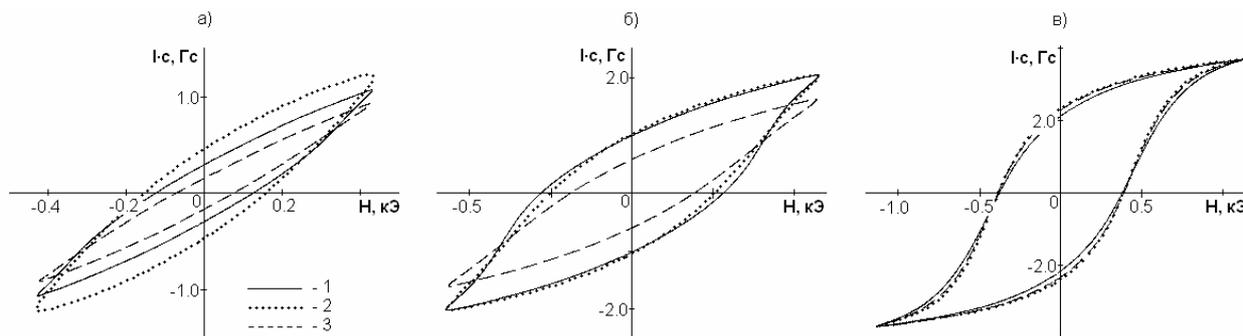


Рисунок 1 – Влияние вязкости жидкости на динамические петли гистерезиса (1 – керосин, 2 – масло АМГ-10, 3 – трансмиссионное масло)

Прежде всего, отметим, что в большом поле (рис.1,в) петли динамического гистерезиса всех трех суспензий практически одинаковы и не зависят от вязкости несущей среды. Интересные кривые зафиксированы в поле 570Э. По форме динамических кривых можно видеть (рис.1,б), что для менее вязкой жидкости (керосин) потери на гистерезис начинают превалировать над вязкими потерями в меньшем поле, чем для более вязкой жидкости (масло АМГ-10 и трансмиссионное масло). Из кривых, полученных в малых полях (рис.1,а), можно видеть, что чем меньше вязкость суспензии, тем больше потери на перемагничивание. В керосине потери получаются заниженными вследствие агрегирования частиц, которое сдерживает их механическую подвижность.

На рис.2 изображена зависимость удельной диссипации в одном цикле перемагничивания от амплитуды переменного магнитного поля.

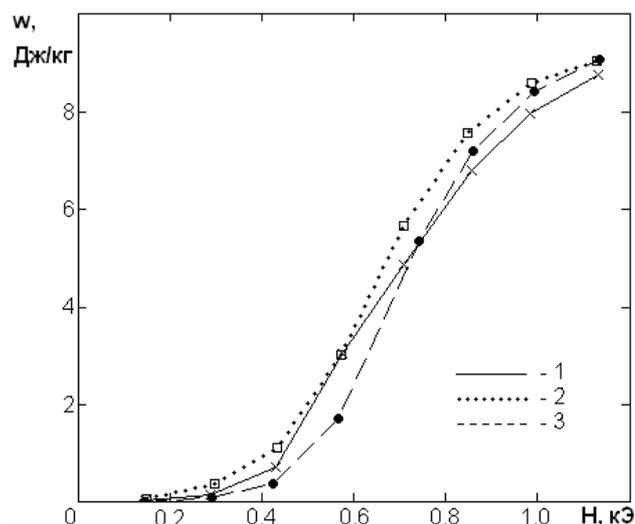


Рисунок 2 – Удельное поглощение энергии переменного магнитного поля за один цикл перемагничивания в зависимости от амплитуды поля (1 – керосин, 2 – масло АМГ-10, 3 – трансмиссионное масло).

Исследование влияния концентрации наполнителя. Исследования выполнены в суспензиях на основе трансмиссионного масла и раствора для инфузий «Гемодез» при концентрациях наполнителя 1, 5 и 10%. Зависимости диссипации от амплитуды переменного магнитного поля представлены на рис. 3. Можно отметить, что в диапазоне полей 400-1000Э эффективность тепловыделения из расчета на единицу массы несколько уменьшается с ростом концентрации.

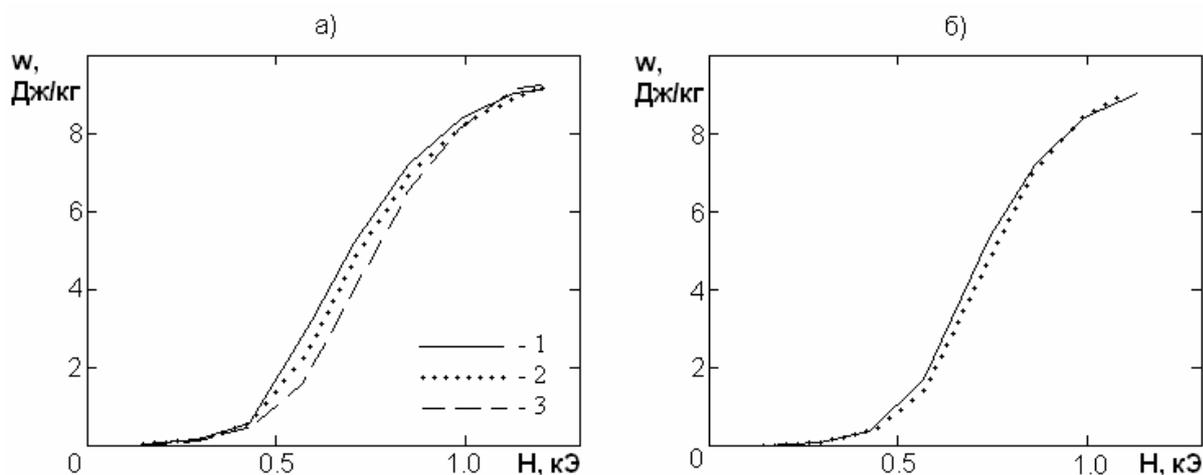


Рисунок 3 – Диссипация энергии переменного магнитного поля за один цикл перемагничивания в зависимости от амплитуды поля (а – раствор для инфузий «Гемодез», б – трансмиссионное масло; 1 – 1%-ная суспензия, 2 – 5%-ная, 3 – 10%-ная).

Заключение. Результаты экспериментального исследования магнитодинамики и поглощения энергии дисперсиями специально изготовленных для гипертермии высококоэрцитивных частиц, взвешенных в жидкостях с разными механическими характеристиками, а также исследования влияния на поглощение энергии концентрации частиц в жидкости показывают, что свойства среды и концентрация частиц в суспензии не оказывают существенного

влияния на магнитодинамику высококоэрцитивных частиц, а также на диссипацию энергии в области полей, превышающих коэрцитивную силу частиц и используемых в сеансах низкочастотной локальной гипертермии.

Обозначения

I – динамическая намагниченность, Гс; \tilde{n} – объемная концентрация; w – удельная энергия, поглощаемая в одном цикле перемагничивания.

Литература.

1. Pankhurst Q.A., Connolly J., Jones S.K. and Dobson J. Applications of magnetic nanoparticles in biomedicine // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2003. Vol. 36. P. R167– R181.
2. Pankhurst Q.A., Thanh N.K.T., Jones S.K., Dobson J. Progress in applications of magnetic nanoparticles in biomedicine // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2009. Vol. 42. N. 224001 doi:10.1088/0022-3727/42/22/224001.
3. Kashevsky B.E., Kashevsky S.B., Prokhorov I.V. Dynamic magnetic hysteresis in a liquid suspension of acicular maghemite particles // *Particuology*. 2009. Vol. 7. P. 451—458.
4. Kekalo K.A., Kashevsky B.E., Agabekov V.E. et al. Influence of Co amount on the efficiency of energy absorption of Fe-Co ferrite nanoparticles // *JMMM*. 2009. Vol. 321. P. 1514—1516.
5. Kashevsky B.E. Istomin Yu.P., Ulashchik V.S. et al. Low-frequency ferromagnetic hyperthermia is feasible // *AIP Conference Proc.* 2010. No1311. P. 280—287.