**Магнитная экранировка в модели «ядро – оболочка»**

**сферической наночастицы**

***Савин Владимир Петрович***

*Аспирант*

*Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова,*

*физический факультет, Москва, Россия*

*E–mail: svladimir1999@yandex.ru*

Системы сферической формы, в том числе магнитные, встречаются в различных областях науки и техники [5]. К ним можно отнести как технические устройства (сферические магнитные экраны [1]), так и объекты естественного происхождения (от наночастиц до планет и звезд). Сложность строения реальных объектов, как правило, существенно затрудняет описание их магнитных свойств. Поэтому оправдано использование достаточно простых моделей, допускающих точное решение. Например, противоречивые магнитные свойства Луны (отсутствие собственного магнитного поля и намагниченность поверхностных пород) получили объяснение в модели Ранкорна [4], согласно которой молодая Луна имела внутреннее магнитное поле дипольного типа, создавшее намагниченность магнитомягкой оболочки. Современная Луна утратила источник внутреннего магнитного поля, а сохранившаяся намагниченность поверхности не создает поля вне Луны («магнитный аннигилятор»).

Интересно, что модель, в которой сферический объект имеет «ядро» и «оболочку» с существенно различающимися магнитными свойствами, появилась и при изучении нанообъектов [3]. В настоящее время наночастицы с внутренней структурой типа «ядро-оболочка» являются предметом активных экспериментальных и теоретических исследований. Как правило, модель таких наночастиц включает магнитожесткое (однодоменное) «ядро» и «оболочку» с искаженной (по сравнению с «ядром») магнитной структурой. Теоретический расчет (как правило, численный) магнитных свойств таких моделей зависит от выбора магнитной структуры оболочки («спиновое стекло», антиферромагнетик и т.п.) и особенностей обменного взаимодействия «ядра» и «оболочки» на общей границе. Современные методы синтеза [2] позволяют (или позволят в будущем) получать наночастицы с заданными магнитными свойствами как «ядра», так и «оболочки». Сферическая магнитная частица с однодоменным ядром и магнитомягкой оболочкой может обладать интересными свойствами. Важно, что магнитные свойства такой частицы можно описать точно в рамках классической электродинамики.

В данной работе изучается модель магнитной наночастицы сферической формы, состоящей из магнитожесткого однодоменного ядра и магнитомягкой оболочки. Данная модель отличается от модели Ранкорна видом источника внутреннего поля (однодоменный магнетик вместо точечного магнитного диполя). Мы получили точные аналитические формулы, описывающие магнитные свойства (намагниченность, создаваемое внешнее поле) отдельной частицы, а также исследовали суперпарамагнитное поведение ансамбля таких частиц в классической модели Ланжевена и магнитный гистерезис в модели Стонера-Вольфарта.

Получены точные аналитические выражения для суперпарамагнитных (без учета магнитной анизотропии) кривых намагничивания. Показан эффект уменьшения суммарного магнитного момента частицы при увеличении толщины оболочки и её магнитной проницаемости. Оболочка экранирует магнитное поле «ядра», уменьшая его магнитное поле во внешнем пространстве. В результате исследования частиц в рамках модели Стонера-Вольфарта были получены неожиданные результаты. Показано, что для некоторого диапазона магнитных характеристик «ядра» (намагниченность насыщения, постоянная анизотропии) наличие магнитомягкой «оболочки» у наночастицы может приводить к увеличению коэрцитивной силы. Это объясняется экранирующим действием «оболочки», что приводит к большему значению внешнего магнитного поля, требующегося для обращения направления намагниченности.

Ожидается, что полученные результаты углубят понимание свойств реальных магнитных частиц и помогут расширить области их практического использования.

**Литература**

1. Реутов Ю. Я., Ригмант М. Б. Классические магнитные экраны. – ИФМ УрО РАН, 2006.
2. Lavín Flores A. et al. Geometry and Surface Area Optimization in Iron Oxide Nanoparticles for Enhanced Magnetic Properties //ACS omega. – 2024. – Т. 9. – №. 30. – С. 32980-32990.
3. Omelyanchik A. et al. Magnetic Anisotropy and Interactions in Hard/Soft Core/Shell Nanoarchitectures: The Role of Shell Thickness //Chemistry of Materials. – 2024. – Т. 36. – №. 16. – С. 7976-7987.
4. Runcorn S. K. An ancient lunar magnetic dipole field //Nature. – 1975. – Т. 253. – №. 5494. – С. 701-703.
5. Savin V. P., Koksharov Y. A. Еlectrostatic repulsion between an uncharged or slightly charged conductor and a point charge //Journal of Electrostatics. – 2022. – Т. 120. – С. 103769.