

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ МАГНИТНОГО СЕПАРАТОРА НАНОЧАСТИЦ

Наиболее перспективным и динамично развивающимся направлением исследований за последнее десятилетие являются нанотехнологии. Отмечается быстрый рост научного, промышленного и коммерческого интереса к новому классу материалов – наноматериалам. Уникальные свойства наночастиц, такие как высокая поверхностная энергия, размеры сопоставимые с биомолекулами, наличие магнитных свойств, биосовместимость, открывают новые перспективы применения наноматериалов [1,2].

Одной из приоритетных областей применения наноматериалов в медицине является онкология [3]. В настоящее время ведутся исследования возможности использования магнитных наночастиц в качестве носителя в системах доставки лекарственных препаратов в ткани и клетки-мишени [4], а также в качестве самостоятельных терапевтических агентов для создания резонансной гипертермии [5].

Для биомедицинского применения наночастиц необходимо нанести липидное покрытие на поверхность магнитного «ядра». Липидный слой защищает от агрегации, окисления, кислотной и щелочной коррозии, а также служит для присоединения фармацевтических агентов [6].

После процесса нанесения липидного слоя на поверхность наночастиц раствор будет содержать магнитоуправляемые липосомы и частицы липида не содержащие магнитной сердцевины, которые необходимо разделить. Для этого целесообразно применить магнитную сепарацию по следующим причинам: сепарируемые продукты значительно различаются по магнитным свойствам, что обеспечит высокую эффективность процесса сепарации; традиционные методы центрифугирования достаточно сложны, малоэффективны в данном случае, и требуют дорогостоящего оборудования.

Для осуществления магнитного разделения в рабочем пространстве сепаратора необходимо создать неоднородное магнитное поле, напряженность которого была бы неодинаковой в различных его точках. Неоднородные поля обуславливают появление магнитных сил, действующих на магнитные липосомы. Кроме неоднородности магнитное поле должно иметь достаточную напряженность.

В однородном магнитном поле частицы подвергаются воздействию только вращающего момента, ориентирующего их параллельно силовым линиям поля. Однако перемещение частиц к полюсам магнитной системы при этом не происходит. Для того чтобы это осуществить, необходимо иметь направленную магнитную силу, которая может быть получена только в неоднородном поле. Чем выше неоднородность поля, тем сильнее магнитная частица притягивается к полюсу в направлении сходимости магнитных силовых линий. Для получения неоднородных магнитных полей применяются магнитные системы, которые подразделяются на две группы: открытые и замкнутые.

Открытые магнитные системы (рис. 1, а) имеют ряд полюсов, края которых могут быть расположены в плоскости или по цилиндрической поверхности. Такие системы применяются в сепараторах со слабым магнитным полем напряженностью до 240 кА/м для сильномагнитных материалов. В замкнутых магнитных системах (рис. 1, б, в) магнитное поле образуется в пространстве между двумя противоположными полюсами различной формы. Такие системы применяются в сепараторах с сильным магнитным полем для слабомагнитных материалов. Напряженность магнитного поля в этом случае может достигать 1600 кА/м.

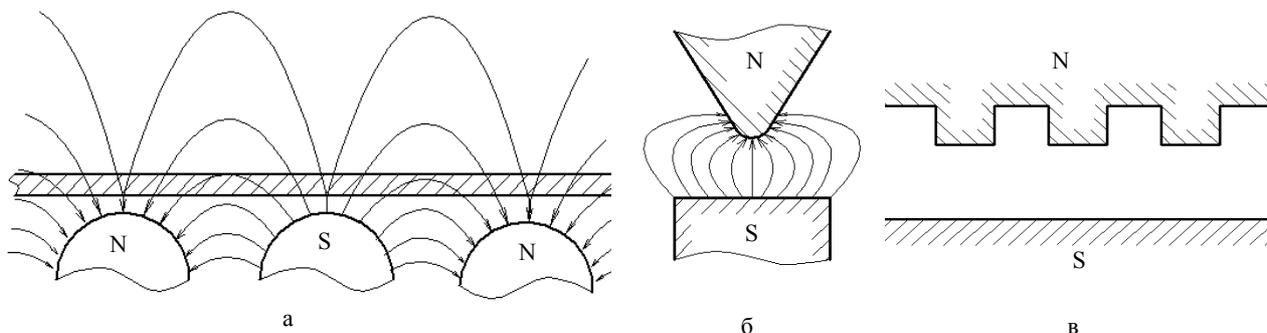


Рис. 1 Схемы расположения полюсов в открытых (а) и замкнутых (б, в) магнитных системах.

Открытую магнитную систему нецелесообразно применять для сепарации наночастиц так как напряженность магнитного поля может оказаться недостаточной. Применение замкнутой магнитной системы связано с конструктивными сложностями размещения сепарационного канала. Предлагаемая магнитная система сепаратора наночастиц представляет собой нечто среднее между вышеописанными типами. Такая компоновка обусловлена спецификой сепарируемого продукта. Магнитные полюса расположены под определённым углом относительно друг друга, при этом форма обоих полюсов одинакова.

В настоящее время наблюдается тенденция замены магнитных сепараторов с традиционным электромагнитным источником магнитного поля системами выполненными на базе постоянных магнитов высоких энергий (типа Nd-Fe-B, Sm-Co). Такая тенденция обусловлена достижениями последних лет в разработке и освоении массового производства постоянных магнитов с энергетическим произведением  $W$  до  $400 \text{ кДж/м}^3$ . Постоянные магниты не уступают принципиально по максимальной интенсивности поля в рабочем объеме сепаратора.

Применение в сепараторе постоянных магнитов позволит получить следующие преимущества: отсутствие источников электроснабжения, аппаратуры коммутации и защиты, средств электробезопасности. Разнообразие в направлении намагниченности и формы постоянных магнитов даёт возможность широкого формирования топологии магнитного поля.

Схема предлагаемого сепаратора показана на рис. 2. Постоянные магниты генерируют неоднородное магнитное поле в зоне сепарационного канала. Требуемые параметры магнитного поля достигаются формированием особенностей магнитной системы. Камера отделения размещена между полюсами и наполнена магнитной жидкостью.

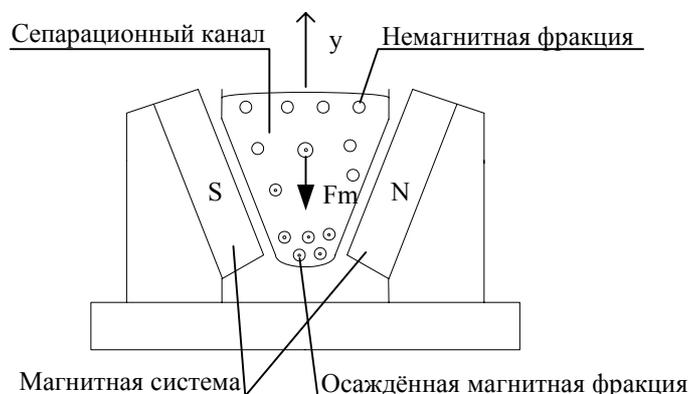


Рис. 2 Схема процесса сепарации.

При такой конфигурации магнитной системы градиент магнитного поля направлен вдоль вертикальной оси  $y$ , т. е. вдоль направления отделения. Для эффективной сепарации магнитная сила ( $F_m$ ) должна быть больше сил, которые удерживают частицы, а также не должна быть настолько большой, при которой может произойти извлечение магнитной сердцевины из липидной оболочки.

Научная задача состоит в определении оптимальной конструкции магнитной системы для создания поля с требуемой силовой характеристикой ( $H \text{grad}H$ ).

Теоретическое определение напряженности и силы магнитного поля создаваемой полюсами в различных сочетаниях, связано с большими трудностями и требует экспериментальных исследований.

Решение данной задачи может быть получено при использовании современных программных продуктов основывающихся на прогрессивных численных методах. Современный рынок программного обеспечения численного решения задач прикладного характера в разнообразных сферах исследований насыщен множеством систем компьютерной математики.

Анализ предлагаемой магнитной системы сепаратора проводился с помощью компьютерной программы FEMM (Finite Element Method Magnetics – магнитные расчёты методом конечных элементов (МКЭ)). Данный метод является сеточным, предназначенным для решения задач микроуровня, для которого модель объекта задаётся системой дифференциальных уравнений в частных производных с заданными краевыми условиями [7]. В последние десятилетия он занял ведущее положение и получил широкое применение.

Модель магнитной системы создана в двухмерной расчётной области. Полюса выполнены из высококоэрцитивных постоянных магнитов Nd-Fe-B, держатели полюсов из магнитомягкой стали. Окружающее пространство – воздух. После создания конечноэлементной сетки (триангуляция) выполняется расчёт и построение плоскопараллельного поля. На рис. 3 представлена визуализация картины напряженности магнитного поля.

Анализ картины поля подтверждает целесообразность выбранной конструкции магнитной системы – магнитное поле сфокусировано в сепарационном канале между полюсами, напряженность поля находится в требуемых границах. Неоднородность магнитного поля вдоль оси  $y$  сепарационного канала наглядно демонстрирует график представленный на рис. 4.

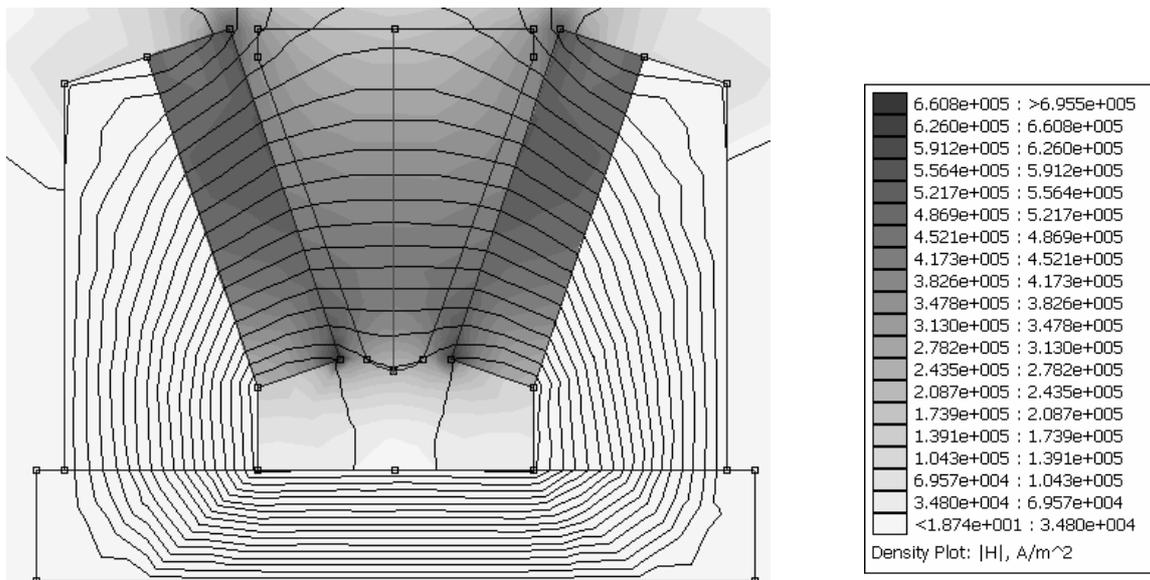


Рис. 3 Визуализация напряженности магнитного поля.

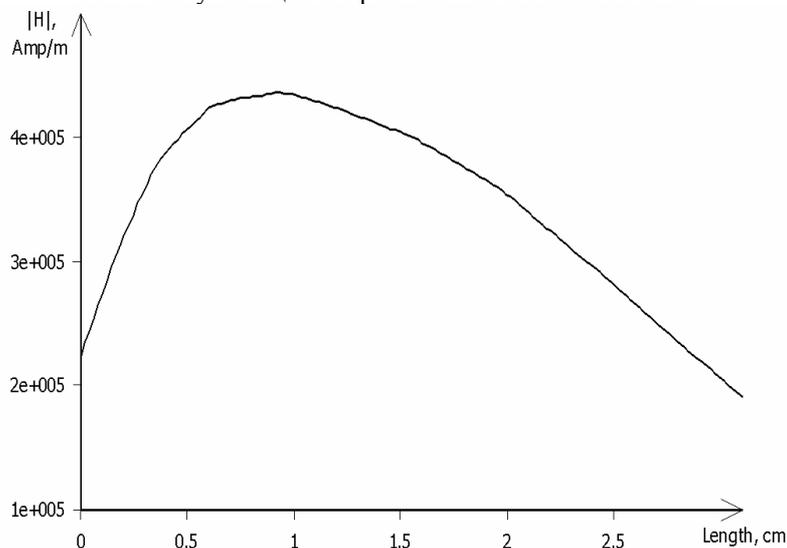


Рис. 4 График изменения напряженности поля вдоль вертикальной оси симметрии.

Представленная методика компьютерного расчета магнитных систем, позволяет создавать такую топологию магнитного поля, которая дает возможность оптимально использовать массу магнитов и максимально концентрировать магнитную энергию в рабочей зоне сепаратора. Таким образом, используя метод конечных элементов, есть перспектива рассчитать необходимые параметры магнитного поля и конфигурацию сепаратора для конкретного случая (размер и материал наночастиц, размер магнитного липида, вязкость раствора, объем продуктов).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Kevin O'Grady. Biomedical applications of magnetic nanoparticles.
2. Lu A.-H., Salabas E.L., Schuth F. Magnetic nanoparticles: synthesis, protection, functionalization, and application // *Angew. Chem. Int. Ed.* 2007. V. 46. P. 1222—1244.
3. Berry C., Curtis A. Functionalisation of magnetic nanoparticles for applications in biomedicine // *J. Phys. D. Appl. Phys.* 2003. V. P.
4. Ovidiu Rotariu, Norval J.C. Strachan // Modelling magnetic carrier particle targeting in the tumor microvasculature for cancer treatment // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials.* -2005.- N293. – Pp.639-645
5. Andreas Jordan, Regina Scholz, Peter Wust, Hermann Schirra // Endocytosis of dextran and silan-coated magnetite nanoparticles and the effect of intracellular hyperthermia on human mammary carcinoma cells in vitro// *Journal of Magnetism and Magnetic Materials.* - 1999.- N194. – Pp.185-196
6. Bruce I.J., Sen T. Surface Modification of magnetic nanoparticles with alkoxy silanes and their application in magnetic bioseparations // *Langmuir.* 2005. V. 21. P. 7029—7035.
7. Буль О.Б. // Методы расчета магнитных систем электрических аппаратов. Магнитные цепи, поля и программа FEMM // Москва 2005.