

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА

УДК 621.928.8

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В УСТРОЙСТВАХ ДЛЯ МАГНИТНОЙ СЕДИМЕНТАЦИИ НАНОЧАСТИЦ ИЗ ВОДНЫХ СРЕД

© 2023 г. М. С. Филинкова^{a, *}, И. В. Медведева^{a, b}, С. В. Жаков^a, Ю. А. Бахтеева^a

^aИнститут физики металлов УрО РАН, ул. С. Ковалевской, 18, Екатеринбург, 620990 Россия

^bУральский государственный горный университет, ул. Куйбышева, 30, Екатеринбург, 620144 Россия

*e-mail: filinkova-ms@yandex.ru

Поступила в редакцию 14.06.2023 г.

После доработки 04.08.2023 г.

Принята к публикации 17.08.2023 г.

Магнитная седиментация с применением устройств на основе постоянных магнитов является перспективным энергоэффективным и безопасным методом удаления наноразмерных частиц из воды. Проведено численное моделирование распределения магнитного поля в магнитных устройствах, состоящих из комбинации чередующихся плоских постоянных магнитов и вставок из магнитомягкой стали. Рассмотрены два типа устройств с разным направлением намагниченности постоянных магнитов: вертикального (V) и горизонтального (G). Предложен критерий оценки эффективности магнитного устройства R , зависящий от эффективного объема области воды, где реализуется величина произведения $|B_z dB_z/dz| > 4 \text{ Тл}^2/\text{м}$, где B_z — вертикальная компонента магнитной индукции. Варьировали размеры постоянных магнитов и магнитомягких вставок вдоль горизонтальной оси x , соотношение толщин магнитных и стальных пластин и число пластин. Показано, что магнитное устройство типа V позволяет создать эффективный объем, в котором реализуется максимально возможный параметр эффективности $R = 31\%$ при толщине магнитных элементов $L_x = 30 \text{ мм}$ и толщине стальных элементов $L_s = 2.5 \text{ мм}$. Магнитное устройство типа G с такими же магнитами, намагниченными горизонтально, позволяет реализовать эффективный объем $R = 19\%$ при значениях $L_x = 12.5 \text{ мм}$ и $L_s = 10 \text{ мм}$. Оба магнитных устройства приемлемо эффективны при выбранных размерах магнитной системы для высоты слоя воды не более 20 мм.

Ключевые слова: магнитная седиментация, наночастицы

DOI: 10.31857/S0015323023600983, EDN: CBVPWD

ВВЕДЕНИЕ

В инновационных методах водоочистки для удаления примесей предлагается использовать наночастицы с различными свойствами — наносорбенты, нанокатализаторы и т.д. [1–3], что требует параллельного развития методов их эффективного удаления из воды после выполнения функций.

Одним из перспективных направлений развития методов безопасной обработки воды является использование магнитных сепараторов [4, 5]. В этих устройствах создается неоднородное магнитное поле, которое обеспечивает процесс магнитофореза — движение магнитных частиц в водной среде. Движение происходит под дей-

ствием равнодействующей сил, действующих на частицу:

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_{\text{mag}} + \mathbf{F}_g + \mathbf{F}_b + \mathbf{F}_a, \quad (1)$$

где $\mathbf{F}_g = m\mathbf{g}$ — сила тяжести (m — масса частицы), $\mathbf{F}_b = f(\eta, S, v)$ — сила вязкого сопротивления (η — коэффициент вязкости среды, v — скорость движения частицы, S — площадь сечения частицы, перпендикулярного скорости движения), $\mathbf{F}_a = \rho g V$ — выталкивающая сила (V — объем частицы, ρ — плотность воды), $\mathbf{F}_{\text{mag}} = (\mathbf{m} \cdot \text{grad})\mathbf{B}$ — сила, действующая на частицу со стороны магнитного поля ($\mathbf{B}$ — магнитная индукция в месте нахождения частицы, $\mathbf{m}$ — магнитный дипольный момент частицы, зависящий от намагничивающего поля $\mathbf{B}$ и природы магнетизма — ферромагнетизм, суперпарамагнетизм). В процессе седиментации пре-

обладает вертикальная компонента силы F_z , для которой:

$$F_{\text{mag } z} \sim B_z \frac{dB_z}{dz}. \quad (2)$$

Сила F_{mag} должна быть достаточно большой по величине, чтобы преодолеть силы противоположного направления, главным образом, силу вязкого сопротивления среды. Для генерации магнитного поля можно использовать как электромагниты, так и постоянные магниты [6–10].

Для магнитного отделения частиц от водной среды используют два типа устройств: низкоградиентные магнитные сепараторы (НГМС) ($dB_z/dz < 100$ Тл/м) и высокоградиентные магнитные сепараторы ВГМС ($dB_z/dz > 100$ Тл/м). В НГМС градиент поля создается постоянными магнитами в комбинациях с элементами из магнитомягкой стали. Такие магнитные сепараторы уже давно применяют в горнодобывающей промышленности [11]. Преимуществом этих устройств является простота в изготовлении и эксплуатации, а также отсутствие затрат на электроэнергию для генерации магнитного поля. Поэтому представляет интерес изучение перспективы их применения для очистки воды от мелкодисперсных примесей. На сегодняшний день такие устройства используют, в основном, в лабораторных целях для отделения наноразмерных магнитных мишеней, применяемых в биомедицине [12–15]. В перспективе для технологий очистки воды эти устройства могут применяться для удаления из воды магнитных нанофлокулянтов [16] и для preconcentрования микро- и наночастиц в процессах контроля качества воды [17].

Неоднородные поля различных конфигураций в НГМС создаются с помощьюборок постоянных магнитов с различными размерами и формой, в том числе разделенных вставками из магнитомягкой стали. Низкоградиентные сепараторы могут работать как в непрерывном, так и в периодическом режиме. Сборки постоянных магнитов могут быть с радиальными и параллельными конфигурациями [18]. В радиальных сборках постоянные магниты имеют трапецевидную форму, и их одноименные полюса направлены к центру устройства. В работе [18] проведены модельные эксперименты по магнитному осаждению наночастиц магнетита в периодическом режиме с использованием магнитной системы радиальной конфигурации, и с параллельным расположением плоских постоянных магнитов, между которыми помещали вставки из магнитомягкой стали [16]. В системах параллельных магнитов путем варьирования размеров постоянных магнитов и вставок можно изменять параметры магнитного поля, которые в значительной степени определяют эффективность магнитной сепарации частиц из во-

ды. Поиск оптимальных конфигураций систем из постоянных магнитов для магнитной сепарации мелкодисперсных примесей из воды можно проводить на основе численного моделирования пространственного распределения магнитного поля, для чего используют различные программы [19–23].

Для оценки эффективности магнитного устройства в работах по магнитной седиментации часто используют максимальные значения магнитной индукции B_z и градиента $\text{grad} B_z$ вдоль вертикальной оси осаждения [6, 19, 24]. Эти параметры информативны только для небольшой области обрабатываемого объема воды и не учитывают распределение поля в остальном объеме воды. Целью нашей работы является изучение влияния геометрических параметров магнитной системы на распределение магнитного поля в магнитном сепараторе с плоскопараллельными постоянными магнитами для магнитной седиментации наночастиц в воде. Расчеты проводили по программе Comsol Multiphysics.

ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ И ОБОСНОВАНИЕ КРИТЕРИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ МАГНИТНОЙ СЕДИМЕНТАЦИИ

Рассмотрена модельная ситуация — седиментация частиц в водной суспензии, находящейся в кювете (С), расположенной на сборке из постоянных магнитов (рис. 1а). Магнитная система состоит из плоских постоянных магнитов размером $L_x \times L_y \times L_z$, чередующихся со вставками из магнитомягкой стали, толщина которых L_s является варьируемым параметром. Другие размеры магнитов и вставок совпадают. Дно кюветы с водной суспензией находится на торцах сборки, высота слоя водной суспензии $h = 20$ мм. Были выбраны магниты NdFeB (BMN 50), так как они обладают высокими значениями магнитной индукции ($B_{\text{max}} = 1.4$ Тл) и широко используются в магнитных устройствах. Высокая коэрцитивная сила этого материала позволяет считать, что намагниченность однородна по объему магнита. При расчете распределения магнитной индукции в программе Comsol Multiphysics использована кривая намагниченности магнитомягкой стали с максимальным значением $\mu = 1200$. Сетку для расчетов задавали в диапазоне 0.018–0.5 мм.

Рассматривается два типа систем, отличающихся направлением намагниченности постоянных магнитов: в системе типа G вектор магнитной индукции каждого магнита направлен вдоль оси x , в системе типа V вектор магнитной индукции магнита направлен вдоль оси z (рис. 1б). Численное моделирование применено для построения пространственного распределения компонент вектора магнитной индукции $\mathbf{B}$ двух рас-

смаатриваемых конфигураций магнитов. В частности, на рис. 2 представлено распределение z компоненты магнитной индукции $\mathbf{B}$ в плоскости xz . На рис. 3 показана зависимость $|B_z dB_z/dz|$ от координаты z в кювете в разных сечениях вдоль оси x для устройства типа G. В сечении, соответствующем области над поверхностью постоянного магнита, B_z слабо зависит от z , поскольку магниты намагничены вдоль оси x . Максимальное изменение B_z происходит над поверхностью стального элемента.

Магнитное поле сильно неоднородно в пространстве над сборкой магнитов. Эксперименты показывают, что осаждение наночастиц во всем объеме идет достаточно эффективно [24], несмотря на существование областей с очень малыми значениями параметра $|B_z dB_z/dz|$. Отсюда следует, что оценка эффективности магнитного сепаратора по максимальному значению градиента поля и максимальному значению магнитной индукции не является достаточно информативной.

Для более корректной оценки магнитных устройств с сильно неоднородным пространственным распределением магнитного поля предлагается ввести полуэмпирический критерий R , определяемый как относительный объем, в котором наблюдается достаточно эффективный процесс магнитной седиментации:

$$R = \frac{V_{\text{eff}}}{V}, \quad (3)$$

где V – объем всей кюветы: $V = hL_y(nL_x + (n-1)L_s)$, V_{eff} – эффективный объем области кюветы, где выполняется неравенство $|B_z dB_z/dz| > |(B_z dB_z/dz)_{\text{eff}}|$. В работе [6] было экспериментально показано, что в неоднородном магнитном поле с максимальными значениями $B_z = 0.2$ Тл, $|\text{grad} B_z| = 20$ Тл/м сферические магнитные наночастицы магнетита (диаметр 200 нм) оседают достаточно эффективно в течение 60 мин. Отсюда для определения эффективного объема было взято произведение $|(B_z dB_z/dz)_{\text{eff}}| = 0.2 \times 20 = 4$ Тл²/м.

МОДЕЛИРОВАНИЕ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ МАГНИТНОЙ СЕДИМЕНТАЦИИ НАНОЧАСТИЦ

Поле, создаваемое постоянным магнитом в каждой точке нахождения частицы, определяется размерами магнита и расстоянием до магнита. Оптимальные размеры магнитов, обеспечивающие необходимую величину параметра R , зависят от толщины слоя жидкости h , в котором происходит магнитная седиментация. С другой стороны, критерий эффективности магнитной седиментации зависит от геометрических размеров магнитов (L_x , L_y , L_z), толщины магнитомягкой вставки L_s , числа чередующихся элементов n .

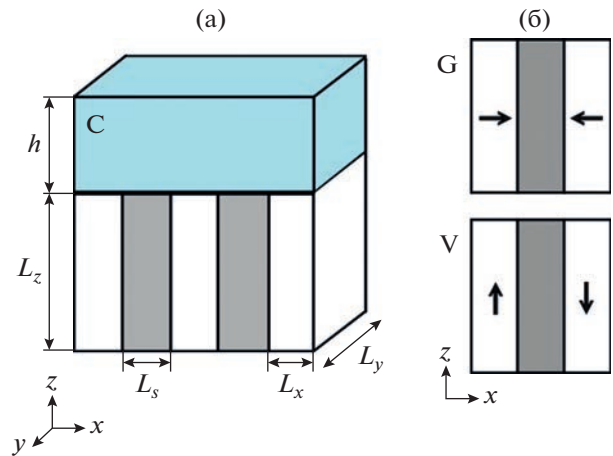


Рис. 1. Схема ячейки для магнитной седиментации (а), схемы намагничивания в сборках постоянных магнитов (б).

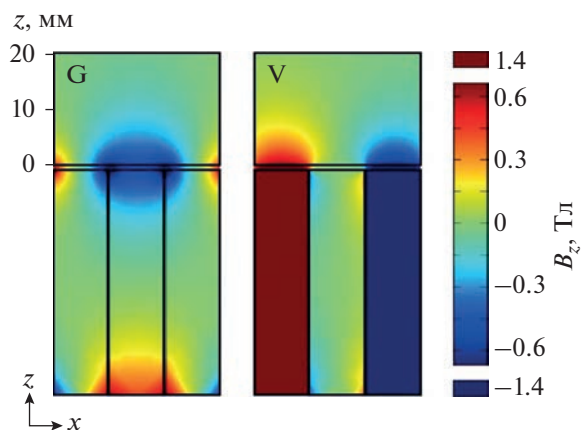


Рис. 2. Распределение значений z компоненты магнитной индукции в плоскости xz для конфигураций G и V.

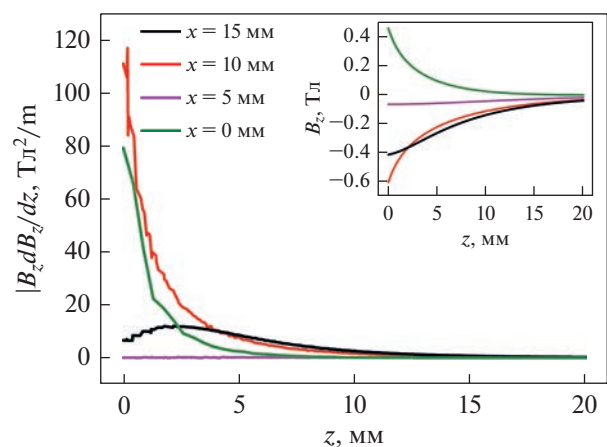


Рис. 3. Изменения значений $|B_z dB_z/dz|$ и B_z в зависимости от высоты z в устройстве типа G на вертикалях, соответствующих $x = 0; 5; 10; 15$ мм.

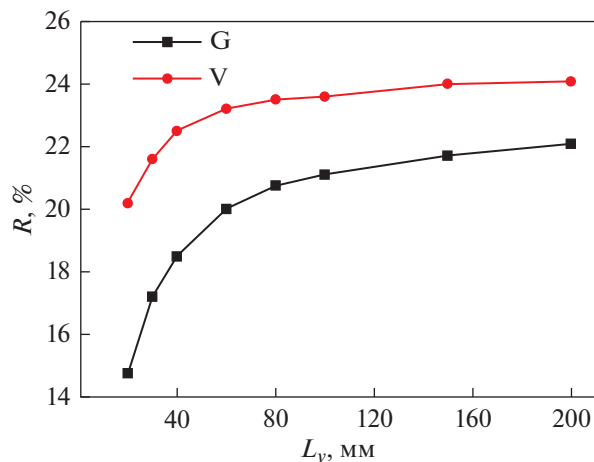


Рис. 4. Зависимость критерия эффективности R от значения размера магнитных пластин L_y (при $L_z = 40$ мм, $L_x = 10$ мм) для магнитных систем типа G и V.

Варьирование размеров магнитных пластин L_y и L_z

В данной работе высота слоя водной суспензии наночастиц была выбрана равной $h = 20$ мм, поскольку в наших моделируемых устройствах при $h > 20$ мм значение $|B_z dB_z/dz| < 4$ Тл²/м не обеспечивало требуемый критерий эффективности. В то же время при высоте слоя жидкости $h = 20$ мм обеспечивается обработка объема жидкости, необходимого в лабораторных установках. На рис. 4 представлено рассчитанное изменение параметра эффективности R в зависимости от L_y для двух конфигураций V и G. В обоих случаях

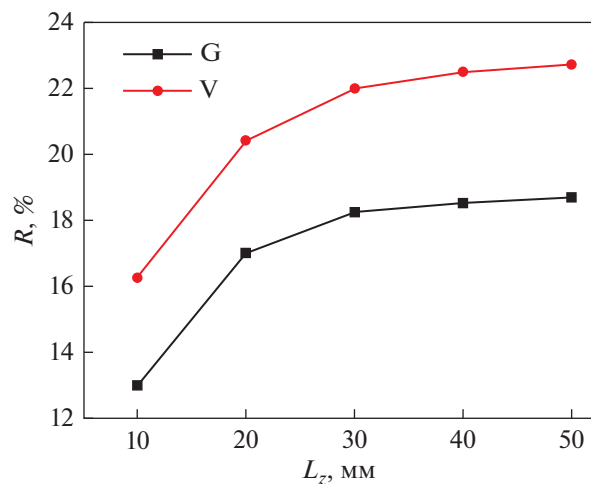


Рис. 5. Зависимость критерия эффективности R от размера магнитных пластин L_z ($L_y = 40$ мм, $L_x = 10$ мм) для магнитных систем типа G и V.

увеличение L_y способствует сначала быстрому росту параметра R , а затем при $L_y > 50$ мм параметр R изменяется незначительно. Поэтому в дальнейших расчетах принимали $L_y = 40$ мм. Из рис. 5 следует, что при L_z больше 40 мм заметного увеличения R не происходит, поэтому было выбрано: $L_z = 40$ мм.

Варьирование толщины стальной вставки L_s

Для оценки влияния толщины стальной вставки L_s на критерий эффективности проводили расчет распределения магнитного поля для сборки из трех элементов (магнит—сталь—магнит) с фиксированным размером магнитных элементов $L_x = 10$ мм. На рис. 6 представлена зависимость модуля параметра $|B_z dB_z/dz|$ от толщины магнитомягкого элемента L_s . Видно, что в конфигурации типа G достигаются более высокие значения параметра $|B_z dB_z/dz|$.

Зависимость критерия эффективности R от толщины стального элемента L_s представлена на рис. 7. Характер изменения значений R для обоих типов магнитных устройств нелинейный.

Значение R для магнитной системы типа G достигает максимума при значениях L_s от 7.5 до 12.5 мм, для системы типа V максимум R достигается при значениях L_s от 0 до 2.5 мм. Во всей исследуемой области наиболее эффективно устройство типа V, что, однако, не подтверждает предположения, сделанного на основании рис. 6. Несмотря на более низкие значения $|B_z dB_z/dz|$, в конфигурации типа V может реализоваться эффективность магнитной сепарации, превышающая в 1.6 раза эффективность в системе типа G.

Последующее моделирование проводили в условиях сохранения соотношения толщины

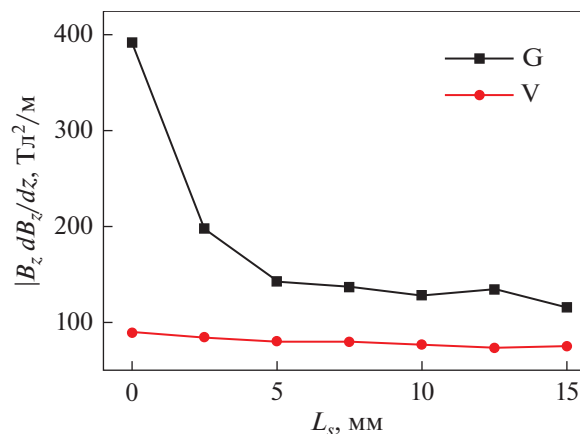


Рис. 6. Зависимость параметра $|B_z dB_z/dz|$ от толщины магнитомягкого элемента L_s .

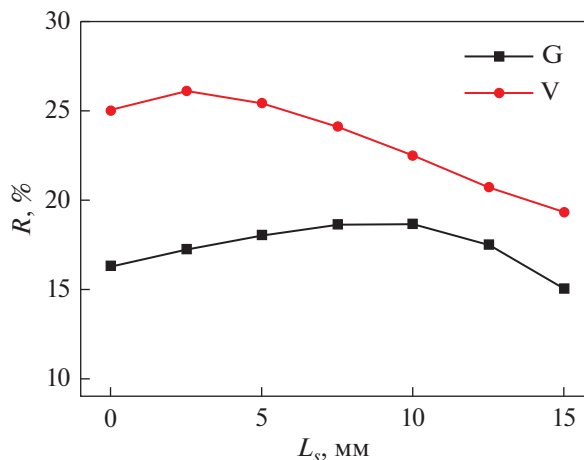


Рис. 7. Зависимость критерия эффективности R от толщины магнитомягкого элемента L_s .

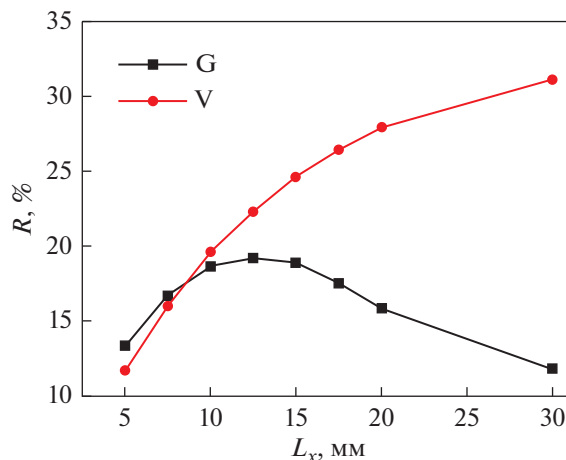


Рис. 8. Зависимость критерия эффективности R от толщины магнитного элемента L_x .

магнитного и стального элементов $L_x/L_s = 1/1$ в устройстве типа G, и $L_x/L_s = 4/1$ – в устройстве типа V, так как при этих соотношениях критерий эффективности достигает максимального значения.

Варьирование толщины магнитного элемента L_x

Зависимость критерия эффективности R от толщины магнитных элементов L_x представлена на рис. 8. Изменение значения L_x от 5 до 30 мм с сохранением пропорции толщин магнитов и стали нелинейно. В устройстве типа V наблюдали монотонный рост значения R , в устройстве типа G зависимость $R(L_x)$ немонотонная, с максимумом вблизи $L_x = 10$ –15 мм.

Варьирование числа магнитных и стальных элементов

Для обработки достаточно больших объемов воды методом магнитной седиментации представляет интерес прогнозировать возможность масштабирования магнитного устройства на большие размеры. Рассмотрено влияние числа n магнитных и стальных элементов магнитных систем G и V на критерий эффективности магнитной сепарации. На рис. 9 представлена зависимость критерия эффективности от параметра n при его изменении в интервале от 2 до 23. Увеличение количества элементов в устройстве типа V приводит к снижению эффективного объема и, соответственно, снижению значения R в отличие от устройства типа G. Отсюда следует, что конфигурация V является менее предпочтительной.

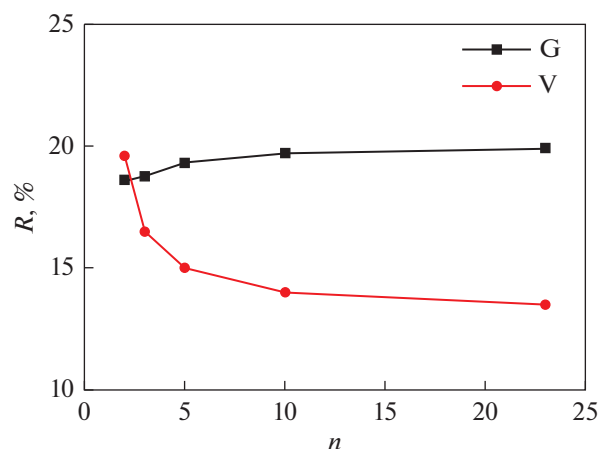


Рис. 9. Зависимость критерия эффективности R от количества магнитных элементов n .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено численное моделирование пространственного распределения магнитного поля. Показано, что устройство типа V с плоскими магнитами, намагниченными вертикально вдоль направления седиментации частиц, позволяет создать эффективный объем, в котором реализуется максимально возможный параметр эффективности $R = 31\%$ при значениях толщины магнитных элементов $L_x = 30$ мм и толщины стальных элементов $L_s = 2.5$ мм. Магнитное устройство типа G с такими же магнитами, намагниченными горизонтально, позволяет реализовать эффективный объем $R = 19\%$ при значениях $L_x = 12.5$ мм, $L_s = 10$ мм. Оба магнитных устройства приемлемо эффективны при выбранных размерах магнитной системы для высоты слоя воды не более 20 мм.

Эту высоту можно увеличить за счет масштабирования магнитной системы. Увеличение размера вдоль направления оси x магнитной системы типа G за счет увеличения числа элементов n до 23 позволяет достичь значения $R = 20\%$.

Рассмотрение вклада от магнитомягких вставок в изменение распределения магнитного поля показывает, что в сборке типа V магнитомягкие вставки приводят к замыканию магнитного потока и снижению напряженности и градиента магнитного поля. Поэтому магнитомягкая сталь может быть заменена на любой немагнитный материал, например, на пластик с подходящими механическими свойствами. В сборке типа G магнитомягкие вставки концентрируют магнитный поток в области, где происходит осаждение частиц. Для повышения эффективности можно уменьшить высоту стального элемента L_z до 20 мм, так как нижняя область вставки намагничена противоположно верхней и создает поле противоположного направления в рабочей области.

Предложенный критерий эффективности может быть использован при разработке магнитных систем для НГМС.

Работа выполнена в рамках государственного задания МИНОБНАУКИ России (тема “Магнит”, номер госрегистрации 122021000034-9, “Давление”, номер госрегистрации 122021000032-5).

Нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Медведева И.В., Медведева О.М., Студенок А.Г., Студенок Г.А., Цейтлин Е.М. Новые композитные материалы и процессы для химических, физико-химических и биохимических технологий водочистки // Изв. вузов. Химия и химическая технология. 2022. Т. 66. № 1. С. 6–27.
2. Treviño M.J.S., Zarazúa S., Płotka-Wasyłka J. Nanosorbents as materials for extraction processes of environmental contaminants and others // *Molecules*. 2022. V. 27(3). P. 1067.
3. Ningthoujam R., Singh Y.D., Babu P.J., Tirkey A., Pradhan S., Sarma M. Nanocatalyst in remediating environmental pollutants // *Chem. Phys. Impact*. 2022. V. 4. P. 100064.
4. Leong S.S., Ahmad Z., Low S.Ch., Camacho J., Faraudo J., Lim J.K. Unified view of magnetic nanoparticle separation under magnetophoresis // *Langmuir*. 2020. V. 36(28). P. 8033–8055.
5. Gomez-Pastora J., Xue X., Karampelas I.H., Bringas E., Furlani E.P., Ortiz I. Analysis of separators for magnetic beads recovery: From large systems to multifunctional microdevices // *Sep. Pur. Technol.* 2017. V. 172. P. 16–31.
6. Yeap S.P., Leong S.S., Ahmad A.L., Ooi B.S., Lim J.K. On size fractionation of iron oxide nanoclusters by low magnetic field gradient // *J. Phys. Chem. C*. 2014. V. 118. P. 24042–24054.
7. Yavuz C.T., Mayo J.T., Yu W.W., Prakash A., Falkner J.C., Yean S., Cong L., Shipley H.J., Kan A., Tomson M., Natelson D., Colvin V. Low-field magnetic separation of monodisperse Fe_3O_4 nanocrystals // *Sci*. 2006. V. 314. P. 964–967.
8. Moeser G.D., Roach K.A., Green W.H., Hatton T.A., Laibinis P.E. High-gradient magnetic separation of coated magnetic nanoparticles // *AIChE J.* 2004. V. 50(11). P. 2836–2848.
9. Ditsch A., Lindenmann S., Laibinis P.E., Wang D.I.C., Hatton T.A. High-gradient magnetic separation of magnetic nanoclusters // *Ind. Eng. Chem. Res.* 2005. V. 44. P. 6824–6836.
10. De Las Cuevas G., Faraudo J., Camacho J. Low-gradient magnetophoresis through field-induced reversible aggregation // *J. Phys. Chem. C*. 2008. V. 112. P. 945–950.
11. Svoboda J. Magnetic techniques for the treatment of materials // Springer Science. 2004. P. 642.
12. Munaz A., Shiddiky M.J.A., Nguyen N.-T. Recent advances and current challenges in magnetophoresis based micro magnetofluidics // *Biomicrofluidics*. 2018. V. 12. P. 031501.
13. Lim B., Vavassori P., Sooryakumar R., Kim Ch. // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2017. V. 50. P. 033002.
14. Zhang H., Ding W., Li Sh., Ya Sh., Li F., Qiu B. On-chip analysis of magnetically labeled cells with integrated cell sorting and counting techniques // *Talanta*. 2020. V. 220. 1. P. 121351.
15. Borlido L., Azevedo A.M., Roque A.C.A., Aires-Barros M.R. Magnetic separation in biotechnology // *Biotech. Adv.* 2013. V. 31. P. 1374–1385.
16. Medvedeva I., Bakhteeva Yu., Zhakov S., Revvo A., Byzov I., Uimin M., Yermakov A., Mysik A. Sedimentation and aggregation of magnetite nanoparticles in water by a gradient magnetic field // *J. Nanopart. Res.* 2013. V. 15. P. 2054.
17. Bakhteeva Yu., Medvedeva I., Filinkova M., Byzov I., Uimin M., Tseitlin E. Magnetic nanoparticles for monitoring microplastics pollution in the surface waters // *Reliability: Theory and Applications*. 2022. V. 17. P. 458–463.
18. Bakhteeva I., Medvedeva I., Filinkova M., Byzov I., Minin A., Zhakov S., Uimin M., Patravov E., Novikov S., Suntsov A., Demin A. Removal of microplastics from water by using magnetic sedimentation // *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 2023.
19. Fratzl M., Delshadi S., Devillers T., Bruckert F., Cugat O., Dempsey N.M., Blaire G. Magnetophoretic induced convective capture of highly diffusive superparamagnetic nanoparticles // *Soft Matter*. 2018. V. 14. P. 2671–2681.
20. Zheng X., Wang Y., Lu D., Li X., Li S., Chu H. Comparative study on the performance of circular and elliptic cross-section matrices in axial high gradient magnetic separation: Role of the applied magnetic induction // *Miner. Eng.* 2017. V. 110. P. 12–19.
21. Okada H., Mitsuhashi K., Ohara T., Whitby E.R., Wada H. Computational fluid dynamics simulation of high gradient magnetic separation // *Sep Sci Technol.* 2005. V. 40. P. 1567–1584.

22. *Karampelas H., Gomez-Pastora J.* Novel Approaches Concerning the Numerical Modeling of Particle and Cell Separation in Microchannels: A Review // Special Issue "Particle and Cell Separation Processes in Microfluidics". 2022. V. 10(6). P. 1226.
23. *Prigiobbe V., Ko S., Huh Ch., Bryant S.L.* Measuring and modeling the magnetic settling of superparamagnetic nanoparticle dispersions // *J. Colloid Interface Sci.* 2015. V. 447. P. 58–67.
24. *Bakhteeva Iu.A., Medvedeva I.V., Uimin M.A., Byzov I.V., Zhakov S.V., Yermakov A.E., Shchegoleva N.N.* Magnetic sedimentation and aggregation of $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$ nanoparticles in water medium // *Sep. Pur. Tech.* 2016. V. 159. P. 35–42.

Numerical Simulation of the Spatial Distribution of the Magnetic Field in Devices for the Magnetic Sedimentation of Nanoparticles from Aqueous Media

M. S. Filinkova^{1, *}, I. V. Medvedeva^{1, 2}, S. V. Zhakov¹, and Yu. A. Bakhteeva¹

¹*Mikheev Institute of Metal Physics, Ural Branch, Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, 620990 Russia*

²*Ural State Mining University, Ekaterinburg, 620144 Russia*

*e-mail: filinkova-ms@yandex.ru

Abstract—A method of magnetic sedimentation using a permanent magnets is a promising “green” technology to separate nanoparticles from water. In this work, numerical simulation of the magnetic field distribution in the devices based on combination of alternating flat permanent magnets (NdFeB) and soft magnetic steel inserts is carried out. Two types of devices with different magnetization directions of permanent magnets are considered: vertical (V) and horizontal (G). A criterion for evaluating the performance of the magnetic device R is proposed, depending on the effective volume of the water area, where the value of the product $|B_z dB_z/dz| > 4 \text{ T}^2/\text{m}$ is realized, where B_z is the vertical component of magnetic induction. The dimensions of the permanent magnets and soft magnetic inserts along the horizontal x axis, the ratio of the thicknesses of magnetic and steel plates, and the number of plates are varied. It is shown that the maximum value $R = 31\%$ is performed using the V-type magnetic device with the thickness of the magnetic (L_x) and the steel (L_s) elements 30 mm and 2.5 mm, respectively. For G-type magnetic device maximum value $R = 19\%$ is realized at $L_x = 12.5 \text{ mm}$ and $L_s = 10 \text{ mm}$. Magnetic devices are effective for the height of a water layer 20 mm at the given dimensions of the magnetic system.

Keywords: magnetic sedimentation, nanoparticles