

*МАГНИТНАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ С РЕГУЛИРУМОЙ СКВАЖНОСТЬЮ
ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ВНЕШНЕГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ*

И.А. ШОРСТКИЙ, К.Ю. САВЕНКОВ

*Кубанский государственный технологический университет,
350072, Российская Федерация, г. Краснодар, ул. Московская, 2;
электронная почта: thegector@mail.ru*

Представлены результаты моделирования поверхностей фильтровальных насадок с регулируемой пористостью в диапазоне от 0,259 до 0,476. Описана зависимость скважности от размеров ядра. Исследовано поведение микроскопических объектов (сферических шариков размером 25–50 мкм) в магнитном поле, а также разработан способ укладки сферических элементов в плотную структуру. Проведены лабораторные исследования физических свойств и параметров магнитной фильтрации. Представлена сравнительная таблица экспериментальных и теоретических данных магнитной фильтрации.

Ключевые слова: фильтрация, регулируемая пористость, ферромагнит, магнитное поле, укладка.

Процесс магнитной фильтрации широко используется в различных областях промышленности для очистки растворов, жидкостей и газов от посторонних частиц. Значительное количество исследований проводилось с магнитными фильтрами [1, 2], однако вопрос возможности регулировки пористости фильтра, управляемой внешним магнитным полем, не был рассмотрен.

Использование магнитного поля в процессе фильтрации глубоко исследовано в состоянии микрогравитации G-MAFB [3], позволяющем применять данные технологии в космическом пространстве. Процесс воздействия на укладку магнитных шариков описан в работе [4]. В нашем исследовании была рассмотрена модель построения плоской фигуры из сферических тел в зависимости от геометрических размеров ядра фильтрационной перегородки. Проведен лабораторный эксперимент по определению пористости фильтрационной перегородки, в основе которой используются сферические тела, управляемые внешним постоянным магнитным полем.

Цель настоящей работы – рассмотрение процесса регулировки пористости фильтрационной перегородки за счет воздействия внешних сил магнитного поля, действующих на фильтрующий материал, получение и сравнение экспериментальных и теоретических параметров лабораторной установки фильтра, а также разработка эффективного механизма очистки фильтрационной перегородки.

Фильтрационная установка была разработана и построена в лаборатории КубГТУ. В качестве материала экспериментальной установки использованы ферромагнитные сферические тела фирмы RICON COMPANY (IronOxide 1317-61-9; CarbonClack 1333-86-4), диаметром 25–30 мкм, насыпной плотностью $\rho = 2800 \text{ кг/м}^3$. В качестве источника постоянного магнитного поля использовался цилиндрический магнит (N 38) силой магнитного поля 1200 мкТл.

Моделирование единичного слоя структуры фильтрационной перегородки производилось с использованием 216 неодимовых магнитов диаметром 3 мм. При описании идеальной модели ядра был взят правильный шестигранник. Данная структура представляет собой плотную, тетраэдрическую укладку шариков, с пористостью 0,259.

В процессе моделирования экспериментальным путем была выявлена закономерность образования радиальных линий в структуре модели при увеличении количества сферических тел в периметре ядра. Радиальные линии представляют собой структуру кубической укладки с пористостью 0,476.

Закономерность количества радиальных линий выражена уравнением:

$$N = B - (6 + m),$$

где B – количество сферических тел в периметре ядра (рис. 1); m – коэффициент от 0 до ∞ с интервалом 0,5.

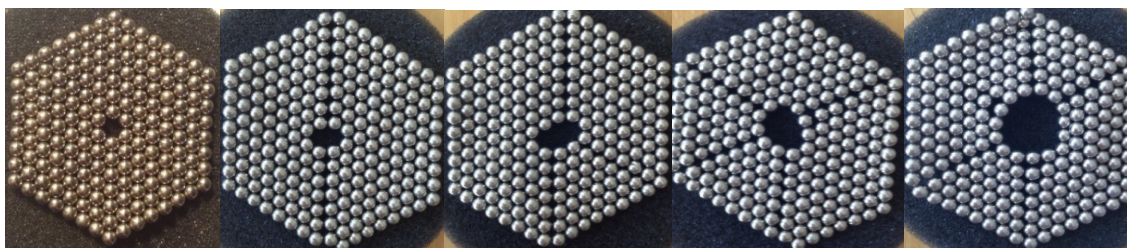


Рис. 1. Экспериментальное соотношение радиальных линий для 6, 8, 10, 12 и 14 сферических тел в периметре ядра

При данной зависимости и идеальных размерах и форме сферических тел возникает возможность 100%-й рыхлой структуры, при количестве 4006 сферических тел в периметре ядра (табл. 1).

Таблица 1

Количество сферических тел в ядре, B	Содержание рыхлой структуры в слое фильтрационной перегородки, %
6	0
7	0,025
8	0,05
9	0,075
10	0,01
46	1
406	10
4006	100

Фильтр с регулируемой скважностью. Ферромагнитные сферические тела были помещены в стеклянную U-образную трубку внутренним диаметром 14 мм. Одна сторона U-образной трубки была соединена с гидравлическим столбом жидкости высотой (H_1) 1 м. Другая сторона трубки была открыта. Высота перегородки фильтра составляла 15 мм.

В качестве конструкции была предложена заявка на изобретение [5]. Фильтрационное устройство выглядит следующим образом (рис. 2).

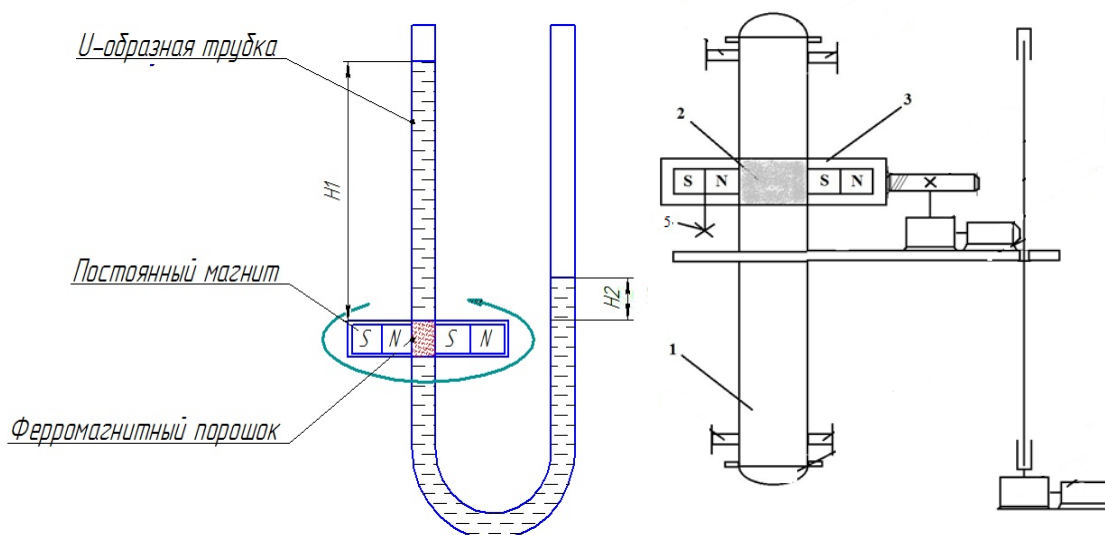


Рис. 2. Экспериментальная установка: слева – модель, справа – изобретение

Фильтрующий ферромагнитный порошок 2 засыпается в диэлектрический корпус 1. На корпусе 1 расположена цилиндрическая насадка, в которой расположены два постоянных магнита 3 (рис 3, а). Вращательный момент передается цилиндрической насадке 4. Происходит формирование плотной (тетраэдрической) структуры фильтрующего материала. После того как процесс фильтрации завершится, происходит очистка фильтра.

Очистка является обязательным условием эксплуатации фильтра и требует периодичности исполнения. В нашем устройстве принцип очистки следующий. Структура фильтрующего материала разрушается с помощью механического переключателя 5. Магнитный порошок, удерживаемый силовыми линиями магнитного поля постоянных магнитов, остается на внутренних стенках цилиндрического корпуса. Цилиндрическая насадка совершает возвратно поступательные движения вдоль корпуса 1. Подается вода для промывки фильтра. После того как процесс очистки фильтрующего материала завершился, механический переключатель 5 возвращается в исходное положение (рис 3, б). Процесс фильтрации повторяется.

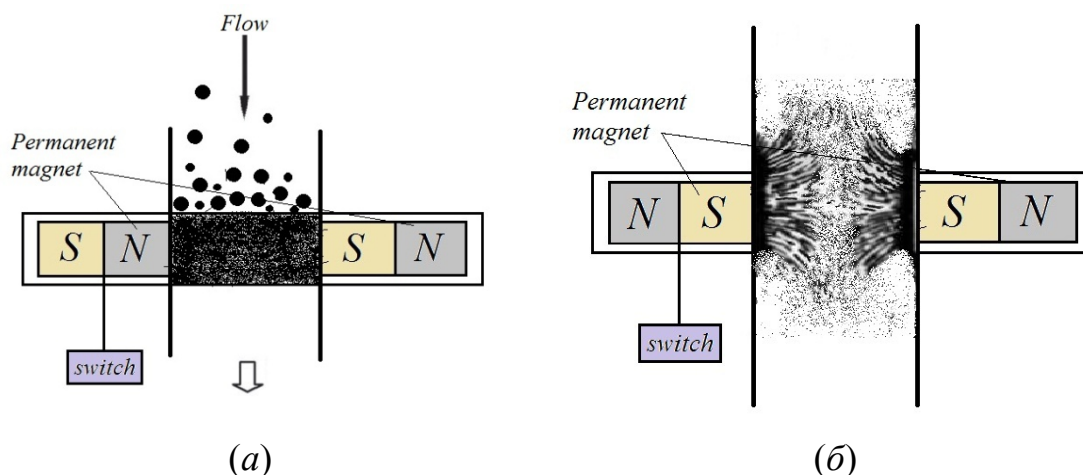


Рис. 3. Положение постоянных магнитов: рабочее состояние N-S (а) и процесс очистки (реверса) S-S (б)

Формирование плотной структуры фильтра под воздействием магнитного поля. При воздействии внешнего постоянного магнитного поля на ферромагнитные сферические тела, взятые в качестве основы фильтра, происходит их структурирование вдоль силовых линий магнитного поля (рис. 4). Сила магнитного поля, необходимая для удержания ферромагнитных тел в структуре фильтровальной перегородки определяется уравнением [4]

$$\frac{\Delta P}{L} \approx \frac{2F_M}{R} \quad (1)$$

Для построения плотной тетраэдрической укладки необходимо вращательное движение (ω) магнитного поля вдоль плоскости фильтра (рис. 4).

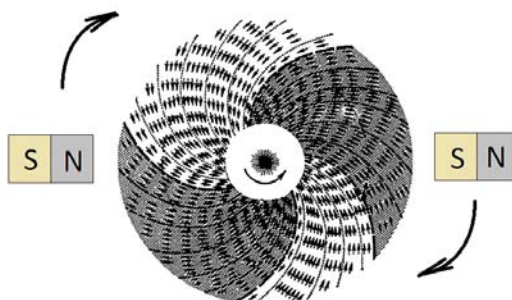


Рис. 4. Структура фильтра во вращательном магнитном поле

Данная сформированная структура напоминает завернутую в рулон бумагу. Произойдет уплотнение ферромагнитных шариков в плотную форму укладки.

В зависимости от характера внешнего воздействия магнитного поля (вращательного или не вращательного) возможна различная укладка сферических тел в структуре фильтрационной перегородки (рис. 5).

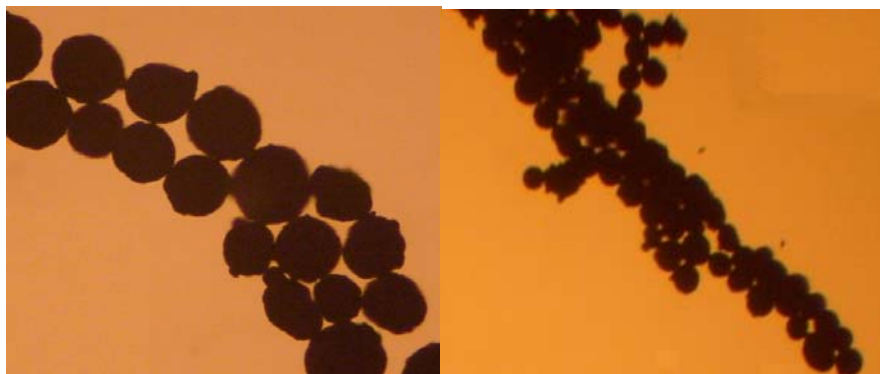


Рис. 5. Фрагменты укладки ферромагнитных шариков:

слева – кубическая укладка шариков под воздействием не вращательного магнитного поля, справа – тетраэдрическая, под воздействием вращательного магнитного поля (микроскоп ERGAWALL200fold, Германия)

Определение магнитной индукции на расстоянии от центра магнита.

Для постоянного магнита используем закон Биота–Саварта [5]

$$dB = \frac{\mu_0 \cdot i \cdot \cos \alpha \cdot dl}{4 \cdot \pi \cdot r^2}. \quad (2)$$

Для нашей установки с двумя постоянными магнитами, расположенными противоположно друг другу, имеем

$$B(x) = 2 \cdot \frac{\mu_0 \cdot i \cdot R^2}{2 \cdot (R^2 + x^2)^{3/2}}. \quad (3)$$

Магнитная сила одного постоянного магнита составляет 1200 мкТл радиусом 5 мм и расстоянием от центра магнита 7 мм, получаем значение $B = 1464$ мкТл.

Из уравнений (4) и (7) найдем максимальное давление, перед началом разрушения структуры фильтра, $\Delta P = 0,3$ МПа

Для определения параметров фильтрационной перегородки воспользуемся данными [5]. Линейная скорость u потока (см/с) при разности давлений по обе стороны фильтровальной перегородки ΔP и вязкости жидкости η подчиняется закону Пуазейля [5]

$$u = \frac{a^2}{8 \cdot q \cdot L \cdot \eta} \cdot \Delta P, \quad (4)$$

где a – диаметр капилляра; q – коэффициент искривленности; L – высота фильтра; η – вязкость пропускаемой жидкости и разность давлений на входе и после фильтра.

Для пропускаемого водного раствора имеем $u = 0,23$ см/с.

В этом процессе скорость фильтрации Q через плотный мелкозернистый (шарообразный) слой материала описывается уравнением Козени-Кармана [5]

$$Q = p \cdot S_f \cdot u, \quad (5)$$

где p – коэффициент разделения; S_f – площадь слоя фильтра.

Экспериментальный расчет линейной скорости $Q_y = 0,23$ м³/с фильтрации был произведен по формуле

$$Q_y = \frac{V}{t}, \quad (6)$$

где V – объем жидкости, прошедшей через фильтрационную перегородку за время t .

Результаты, полученные в экспериментах с применением в качестве основы фильтра стеклянных шариков размером 22,5 мкм [5], сравнивали с экспериментальными и теоретическими данными, полученными в ходе работы. Результаты сравнения представлены в табл. 2.

Таблица 2. Сравнительная характеристика параметров фильтра из уравнений (4), (5) для теоретических данных и (6) для экспериментальных с данными работы [5].

Данные	Размер частиц, мкм	Коэффициент пористости ε	Коэффициент искривленности q	Линейная скорость потока u , см/с	Скорость потока Q , см ³ /с
Теоретические	30	0,44	1,3	0,23	$3,07 \cdot 10^{-16}$
Экспериментальные	25–30	–	–	0,3	$1,24 \cdot 10^{-16}$
Результаты [5]	22,5	0,46	1,43	–	–

ВЫВОД

Исследован процесс регулирования укладки ферромагнитных сферических тел из кубической пористости 0,476 в тетраэдрическую 0,259 под воздействием вращающего постоянного магнитного поля. Установлена зависимость радиальных линий кубической укладки в слое фильтра от размеров ядра. Получены характеристики лабораторной установки по скорости потока, скорости фильтрации, коэффициентам искривленности и пористости, совпадающие с теоретическими расчетными данными. Предложенный механизм очистки фильтрующего элемента позволяет сократить к минимуму время проведения очистительных работ.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Abbasov T.** Magnetic filtration with magnetized granular beds: Basics principles and filter performance // *China Particuology*. 2007. Vol. 5. P. 7183.
2. **Hristov J.** Magnetic field assisted fluidization – a unified // *Approach Rev. Chem. Eng.* 2012. 28 (4–6). P. 243–308.
3. **Moyer C.A., Natenapit M., Arajs S.** Magnetic filtration particles in laminar flow throw a bed of spheres // *J. Magn. Mat.* 1984. Vol. 44, 99. P. 104.
4. **Sornchamni T., Atwater J.E., Akse J.R., Wheeler R.R., Jr., Jovanovic G.N.** Magnetically Assisted Filtration for Solid Waste Separation and Concentration in Microgravity and Hypogravity // *Ind. Eng. Chem. Res.* 2005. 44. P. 9199–9207.
5. Заявка на изобретение 2013152099 RU / И.А. Шорсткий. 22.11.2013.

REFERENCES

1. Abbasov T., *China Particuology*, 2007, no. 5, pp. 7183.
2. Hristov J., *Approach Rev. Chem. Eng.*, 2012, no. 28 (4–6), pp. 243–308.
3. Moyer C.A., Natenapit M., Arajs S., *J. Magn. Mat.*, 1984, no. 44, 99, pp. 104.
4. Sornchamni T., Atwater J.E., Akse J.R., Wheeler R.R., Jr., Jovanovic G.N., *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2005, no. 44, pp. 9199–9207.
5. Shorstkiy I.A., Application for invention 2013152099 RU. 22.11.2013.

Поступила 18.04.14 г.

*MAGNETIC FILTER INSTALLATION WITH CONTROLLING POROSITY
BY EXTERNAL MAGNETIC FIELD*

I.A. SHORSTKIY, K.YU. SAVENKOV

*Kuban State Technological University,
2, Moskovskaya st., Krasnodar, Russian Federation, 350072; e-mail: thegector@mail.ru*

Magnetic filter baffle surfaces modeling with controlled porosity in range from 0,259 to 0,476. Filter nucleus description and its influence on porosity. Explore behavior of microscopic objects (spherical balls size 25–50 microns) in magnetic field, and developing method of laying spherical elements in dense structure. Also were conducted laboratory studies of physical properties and parameters of magnet. As a result of work prepare comparative table of the experimental and theoretical data of laboratory filter.

Key words: filtration, controlling porosity, ferromagnetic, magnetic field, dense structure.