

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО ФИЛЬТРА С БЕГУЩИМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

А.А. Евтушенко\*, Н.З. Бойко

\*Сумский государственный университет

### ВВЕДЕНИЕ

Отбор из загрязненных жидкостей механических примесей ферромагнитных частиц с прилипшими к ним неферромагнитными частицами – важная задача гидравлических систем очистки. Именно эта часть загрязнений, являясь зачастую продуктами изнашивания механизмов, ответственна за потерю жидкостями потребительских качеств и способствует ускоренному уменьшению работоспособности оборудования.

Для непрерывной очистки жидкостей от ферромагнитных частиц до микрометрических размеров был предложен электромагнитный фильтр с бегущим электромагнитным полем [1,2]. Схема фильтра изображена на рис.1.

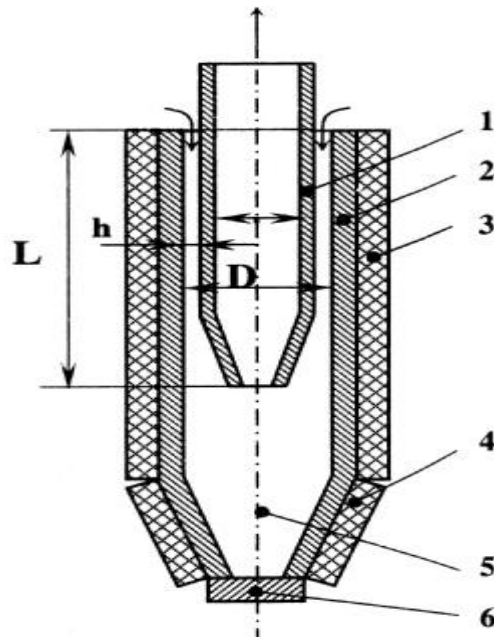


Рисунок 1 - Электромагнитный фильтр с бегущим электромагнитным полем  
 1 - выходная трубка; 2 - корпус фильтра; 3 - электромагнитная система;  
 4 - постоянный электромагнит; 5 - собирающий бункер; 6 - затвор

На наружной поверхности корпуса 2 расположена в верхней части электромагнитная система 3, создающая бегущее магнитное поле. Магнитное поле с одной стороны, притягивает ферромагнитные частицы, находящиеся в зазоре между корпусом 2 и отводящей жидкость трубой 1, к наружной стенке фильтра, а с другой стороны перемещает притянутые ферромагнитные частицы в сторону бункера 5, где они удерживаются электромагнитом постоянного тока 4. Бегущее магнитное поле создается кратковременной подачей напряжения на отдельные катушки электромагнитной системы. Закон изменения электромагнитного поля

внутри фильтра зависит от вязкости жидкости, параметров частицы загрязнения и т.д. При необходимости удаления отделенных от жидкости ферромагнитных частиц из фильтра электромагнит 4 отключается от сети и открывается затвор 6. Очищенная жидкость через выходную трубку поступает к потребителю.

При решении задачи создания магнитных очистителей большой грязеемкости и высокой очистительной способности при низких энергозатратах, появилась необходимость описания поведения частицы загрязнений под действием бегущего магнитного поля в зависимости от различных влияющих факторов.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для теоретических исследований была разработана математическая модель фильтра в виде системы дифференциальных уравнений:

$$m \frac{dV_{p_z}}{dt} = F_{m_z} - 6\pi\mu r (V_{p_z} - V_{g_z});$$

$$m \frac{dV_{p_\rho}}{dt} = F_{m_\rho} - 6\pi\mu r V_{p_\rho};$$

$$F_{m_\rho} = \mu_0 V \chi \frac{I^2 R^8 \rho}{2(R^2 + z^2)^3 (R^2 - \rho^2)^3};$$

$$F_{m_z} = 0,75 \mu_0 V \chi \frac{I^2 R^8 z}{(R^2 + z^2)^4 (R^2 - \rho^2)^2}.$$

$$V_{g_z} = \frac{\Delta p}{2\mu L} \rho (h^2 - 1),$$

где  $m$  - масса частицы загрязнения;  $V_p$  и  $V_g$  - скорости частицы и жидкости соответственно;  $F_m$  - пондеромоторная сила;  $\mu$  - вязкость жидкости;  $r$  - радиус частицы загрязнения;  $\mu_0$  - магнитная проницаемость вакуума;  $\chi$  - магнитная восприимчивость ферромагнитной частицы;  $I$  - сила тока;  $W$  - количество витков;  $R$  - радиус фильтра;  $L$  - длина внутренней трубы;  $z$  и  $\rho$  - цилиндрическая система координат;  $V$  - объем частицы загрязнения;  $\Delta p$  - перепад давления;  $h$  - высота щели.

В эту систему вошли пять уравнений: два уравнения движения по координатам  $\rho$  и  $z$ , два уравнения для определения составляющих пондеромоторной силы и уравнение учета продольной составляющей скорости жидкости. Для решения системы дифференциальных уравнений была разработана структурная схема и получены решения этой системы с использованием программы «Matlab». Разработанная структурная схема модели фильтра изображена на рис.2.

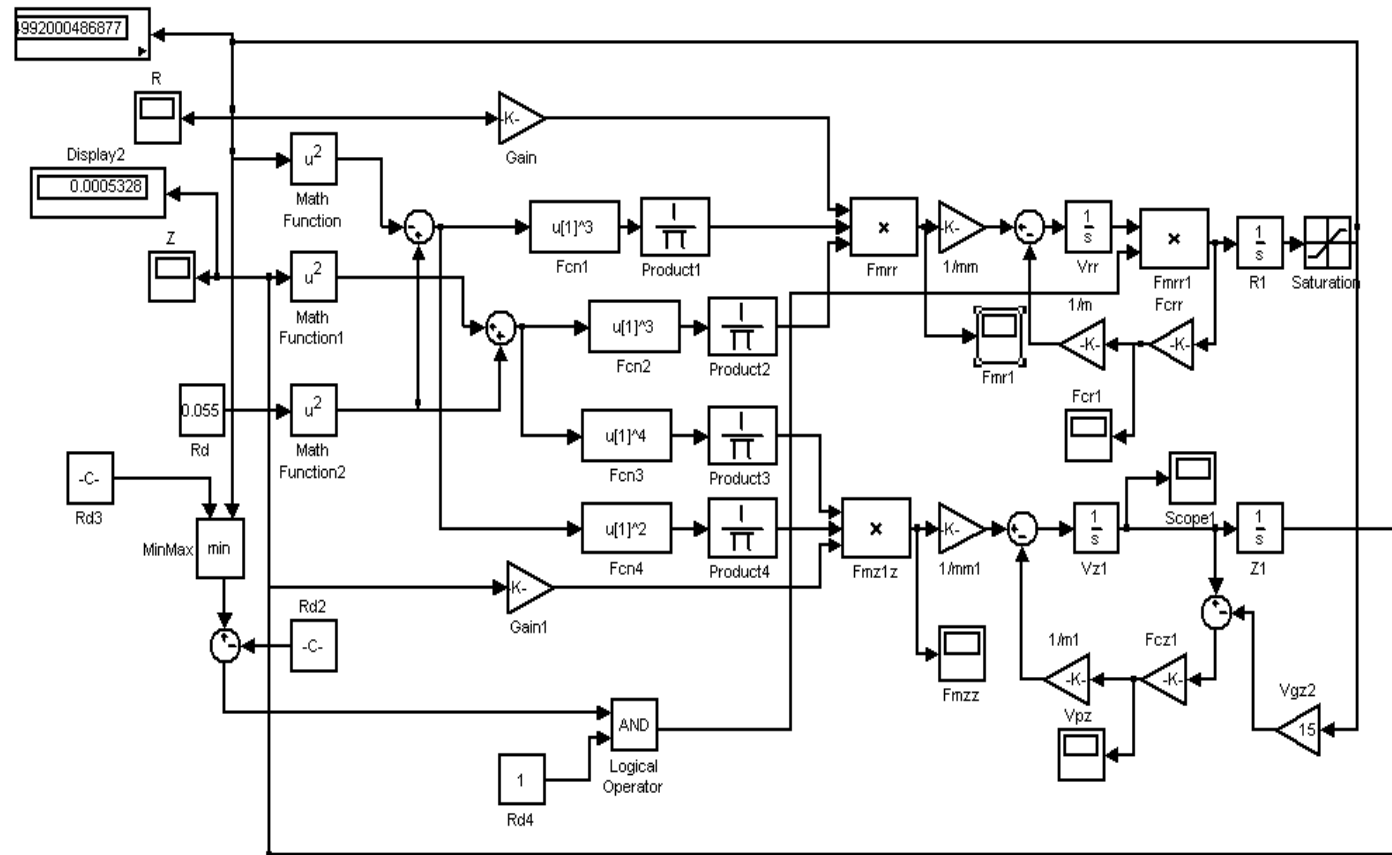


Рисунок 2 - Структурная схема модели фильтра с бегущим электромагнитным полем

Эта модель позволяет учесть начальные и граничные условия в системе при работе фильтра, поэтому

$$\rho_{нач} = D/2 - h;$$

$$Z_{нач} = 0; \quad \text{при } \rho = D/2 - r \text{ и } V_{\rho\rho} = 0.$$

Другими словами, когда частица загрязнения притянется к боковой стенке фильтра, поперечная составляющая ее скорости будет равна 0. В качестве начальной координаты  $\rho$  принят наиболее неблагоприятный вариант расположения частицы с точки зрения воздействия на нее пондеромоторной силы – у поверхности внутренней трубы. При этих условиях были получены отдельные зависимости координат частицы, пондеромоторной силы, действующей на нее, и силы сопротивления Стокса, противодействующей ее движению, от времени. Полученные зависимости были рассчитаны при следующих условиях: диаметр ферромагнитных частиц при очистке –  $(20 - 100) \times 10^{-6}$  м, сила тока –  $(2,5 - 20)$  А, температура жидкости –  $(10 - 60)^{\circ}$  С, расход жидкости –  $(0 - 15)$  л/с, высота щели –  $(2 - 5)$  мм, расстояние между витками катушки индуктивности –  $(1 - 10)$  мм.

Анализ этих зависимостей показал, что частица за время 0.0258с достигает стенки фильтра и дальше продолжает движение вдоль нее, нигде не отрываясь от поверхности. Это объясняется тем, что пондеромоторная сила максимальна при достижении частицей внутренней поверхности фильтра, а это в свою очередь объясняется характером распределения напряженности магнитного поля в соленоиде. Как было показано Ландау и Лифшицем, напряженность магнитного поля обратно пропорциональна разности квадратов радиуса соленоида и координаты  $\rho$ , и по мере приближения к поверхности соленоида (в нашем случае – фильтра) она увеличивается [3]. Если учесть, что максимальное приближение к стенке фильтра определяется радиусом частицы, составляющим в нашем случае  $10 \times 10^{-6}$  м –  $100 \times 10^{-6}$  м (при радиусе фильтра 5.5 см), то можно определить, что при перемещении от внутренней трубы до поверхности фильтра (т.е. на высоту щели 5 мм) напряженность магнитного поля возрастает в 4772 раза. Соответственно градиент напряженности поля будет также расти. Этим и обуславливается резкое увеличение поперечной составляющей пондеромоторной силы у поверхности фильтра.

На рис. 3 и 4 изображены графики изменения поперечной координаты  $\rho$  и  $z$  частицы от времени.

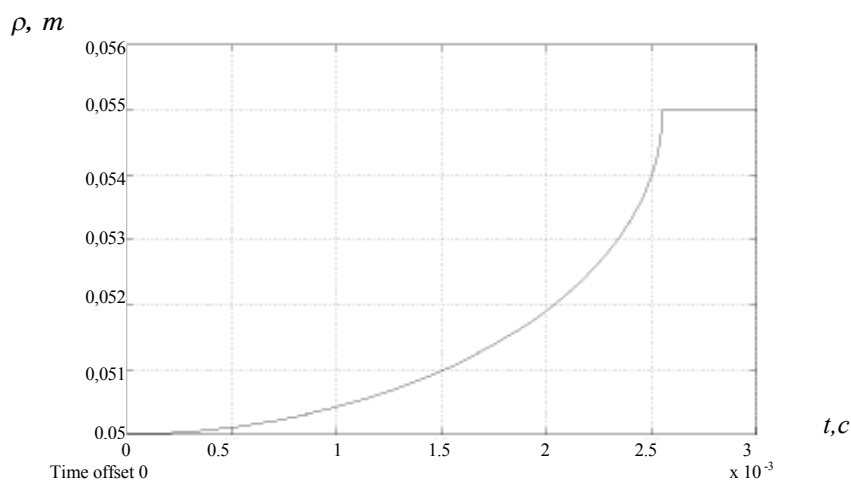


Рисунок 3 - изменение положения частицы в поперечном направлении

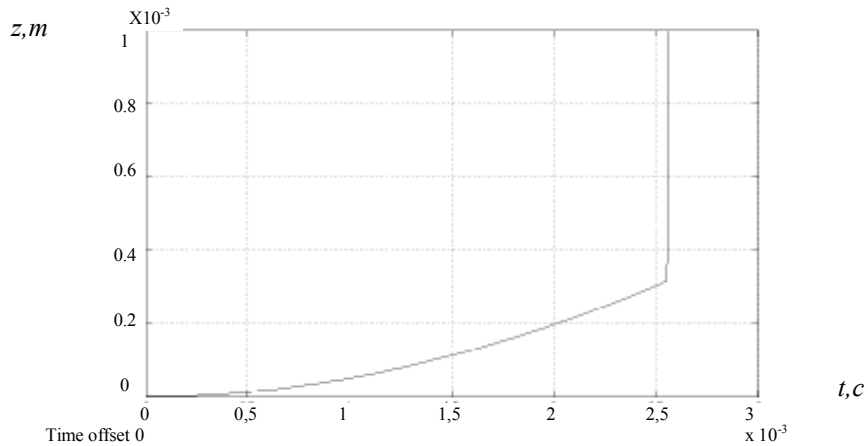


Рисунок 4 - Изменение положения частицы в продольном направлении

На рис. 5 показано развитие процесса за  $1 \times 10^{-3}$  с, что позволяет оценить начальное значение пондеромоторной силы, которое сохраняется вплоть до достижения частицей стенки фильтра и после ее достижения эта сила также не изменяется.

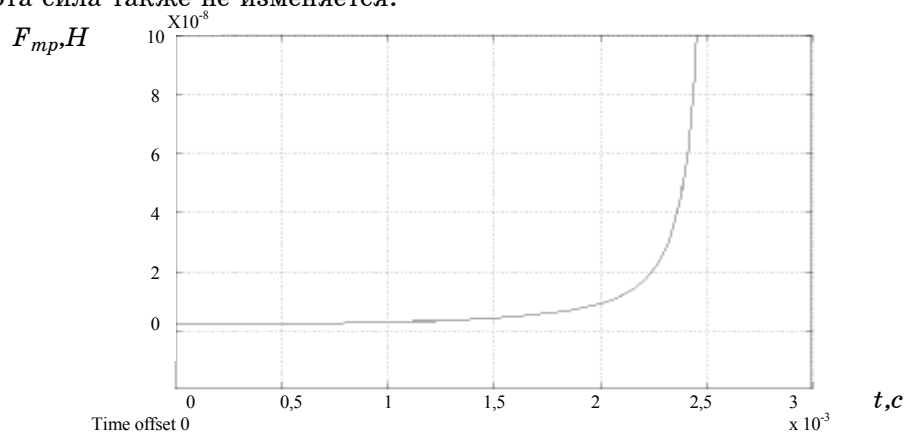


Рисунок 5 - Характер изменения пондеромоторной силы у стенки фильтра

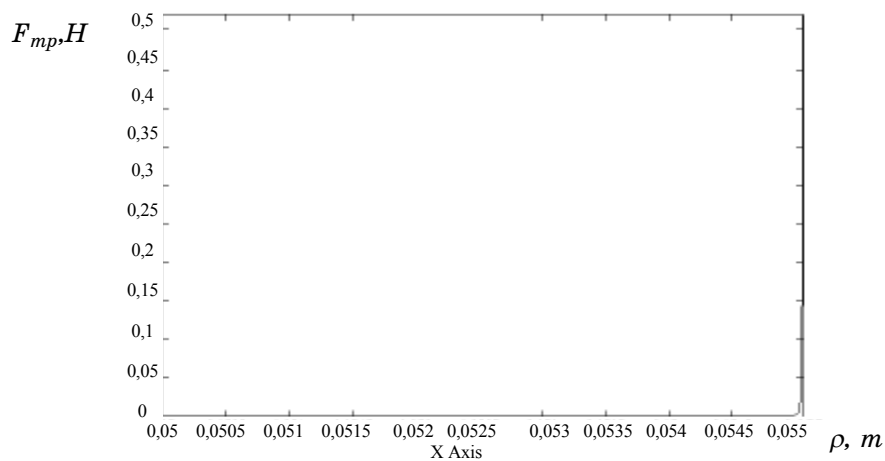


Рисунок 6 - Зависимость поперечной составляющей пондеромоторной силы от координаты  $\rho$

Зависимость, изображенная на рис. 6, подтверждает наше предположение о резком возрастании поперечной пондеромоторной силы при непосредственном приближении к стенке.

Рассчитанная сила сопротивления движению частицы в поперечном направлении со стороны жидкости сначала возрастает, причем в окрестности стенки довольно резко, а при приближении частицы к стенке падает до нуля. Это связано с тем, что перемещение частицы в поперечном направлении прекращается (частица не сможет оторваться от стенки из-за значительной величины пондеромоторной силы) и подтверждается рассчитанными зависимостями, которые изображены на рис. 7 и 8.

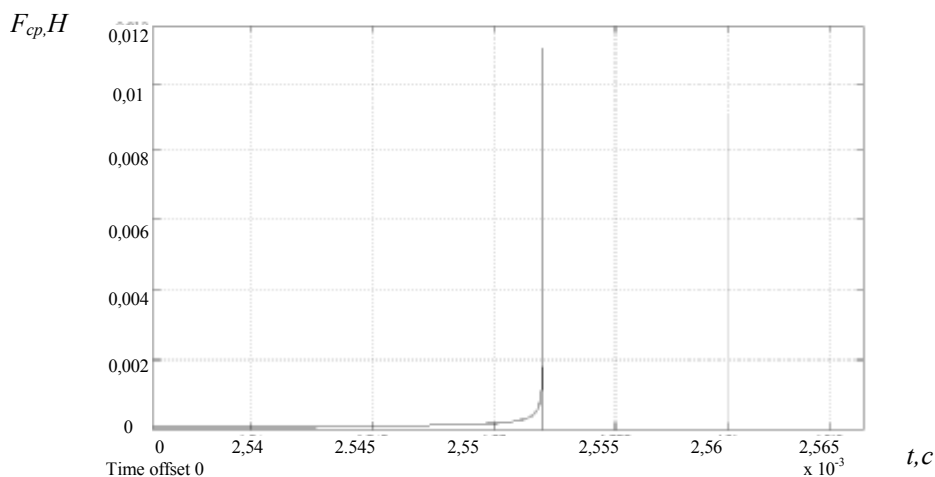


Рисунок 7 - Зависимость поперечной составляющей силы Стокса

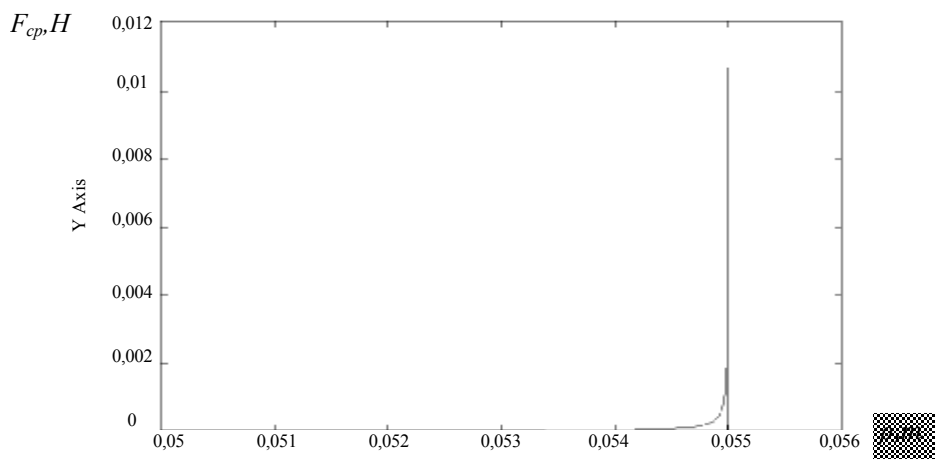


Рисунок 8 - Зависимость поперечной составляющей силы сопротивления Стокса от координаты  $\rho$

Анализ полученных результатов показал, что пока частица не достигла боковой стенки фильтра, в продольном направлении, она изменяет свое положение довольно медленно из-за постепенного изменения напряженности магнитного поля, а следовательно, и пондеромоторной силы. В случае если частица оказалась в непосредственной близости от стенки, где напряженность возрастает в  $10^3$

раз, резко возрастает не только поперечная составляющая ponderomotorной силы, но и продольная. Поэтому за счет увеличения этой силы частица начинает двигаться быстрее, что подтверждает рассчитанная зависимость, приведенная на рис. 9.

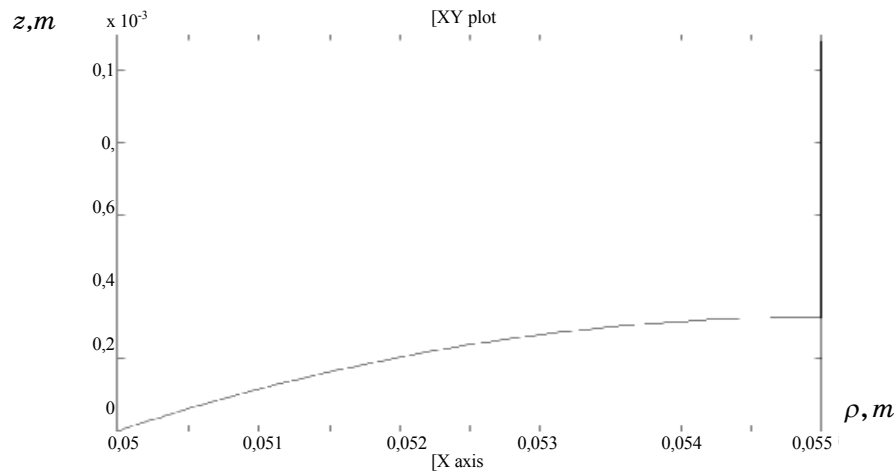


Рисунок 9 - Зависимость изменения продольной координаты  $z$  частицы от поперечной составляющей  $\rho$

### ВЫВОДЫ

Разработанная математическая модель фильтра с бегущим электромагнитным полем позволяет выполнить анализ его работы и построить различные зависимости, которые описывают работу реального фильтра и могут быть положены в основу для расчетов их гидравлических и электромагнитных характеристик, определения оптимальных параметров очистителей этого типа.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пляцук Л.Д., Бойко Н.З. "Очищувач" Заявка № 200503029 от 4.04.05 г.
2. Бойко Н.З. Фильтр с бегущей электромагнитной волной // Сборник научных трудов ДонГТУ. - Алчевск, 2005. - N19. - С.314-322.
3. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория поля. - М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1959. - 581 с.

**А.А. Евтушенко, канд. техн. наук, профессор**  
Сумский государственный университет

**Н.З. Бойко**

Поступила в редакцию 20 февраля 2007 г.