

УДК 541.311:614.84

**В. И. Просвирнин, С.П. Голиков, Б. А. Авдеев**  
**МОДЕЛЬ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РАДИАЛЬНОГО МАГНИТНОГО**  
**ПОЛЯ В ГИДРОЦИКЛОНЕ**

**Введение.** В статье представлена модель распределения магнитного поля по радиусу и высоте в рабочей камере гидроциклона с радиальным магнитным полем. Данная модель позволяет рассчитывать напряженность магнитного поля в любой точке гидроциклона.

**Постановка проблемы:** Одним из способов очистки технических жидкостей является аппараты инерционного типа. Благодаря их простоте, дешевизне, высокой эффективности и производительности, данные устройства нашли широкое применение в многих отраслях промышленности и сельского хозяйства [1]. В последнее время с целью повышения эффективности улавливания механических примесей применяют наложение полей электрической природы [2]. Одним из таких устройств является магнитный гидроциклон. Существуют различные конструкции этих аппаратов [3], однако наиболее широкое применение получили гидроциклоны с наложенным магнитным полем в цилиндрической части: с радиальным магнитным полем, известный как гидроциклон Фрикера (рис. 1 а) и с внешним магнитным полем, известным как гидроциклон Уотсона (рис 1 б). Одним из важнейших параметров устройств для очистки вязких сред от магнитных примесей является распределение магнитного поля в рабочей камере; для расчета сил коагуляции и магнитной силы, действующей на частицу или флоккулу, необходимо знать напряженность магнитного поля в каждой точке рабочей камеры [4]. В гидроциклоне Фрикера в качестве источника магнитного поля используется статор двигателя постоянного тока, если необходимо создать постоянное магнитное поле, или статор асинхронного двигателя, если необходимо создать вращающееся магнитное поле.

Распределение магнитного поля в гидроциклоне с внешним полем можно приближенно рассчитать по следующей формуле [1]:

$$H = H_0 \cdot \left(\frac{2 \cdot R}{D}\right)^{p-1} \tag{1}$$

где  $H_0$  – максимальная напряженность поля (у полюсных наконечников магнитной системы), А/м;  $D$  – радиус цилиндрической части гидроциклона, м;  $p$  – число пар полюсов, ед.

Математическая модель, которая бы с достаточной точностью отражала изменение магнитного поля в рабочей камере по радиусу и высоте гидроциклона с радиальным магнитным полем, отсутствует. Поэтому возникла острая необходимость в создании такой модели.

**Информационный анализ исследований и публикаций**

Вопросы, связанные с распределением магнитного поля в гидроциклоне были освещены в литературных источниках [1,2,3,5,6,7]. В работе Ж. Чена приведены экспериментальные данные изменения напряженности магнитного поля по радиусу [6]. Однако в них отсутствуют аналитические выражения для определения напряженности поля в гидроциклоне. Кроме того, в его работе приведены графики изменения напряженности поля в рабочей камере только по радиусу, в то время, как поле изменяется также с высотой аппарата. В работе В. И. Просвирнина представлена экспериментально снятая зависимость изменения магнитного поля в цилиндрической части гидроциклона по радиусу и высоте аппарата (рис. 2) [7].

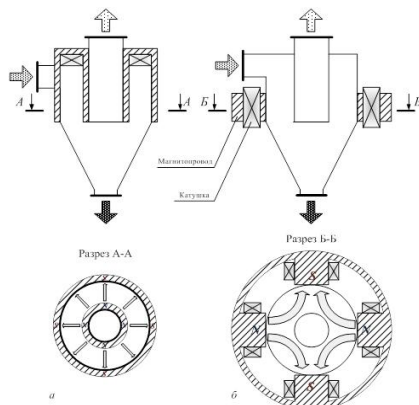


Рис. 1 – Гидроциклон с радиальным (а) и внешним (б) магнитным полем

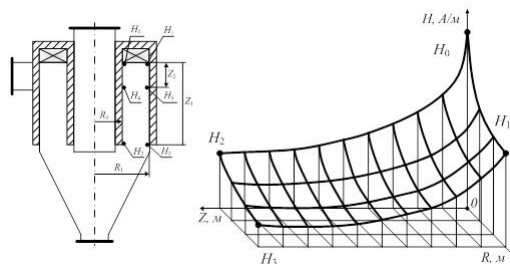


Рис. 2 – Изменение напряженности магнитного поля в рабочей камере гидроциклона

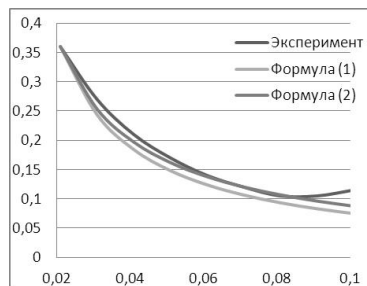
В. И. Просвирниным была предложена формула изменения напряженности магнитного поля по радиусу:

$$H(R) = H_0 \cdot \frac{R_0}{R} \tag{2}$$

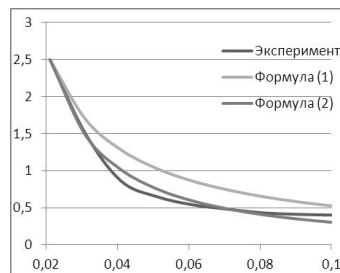
где  $H_0$  – значение напряженности магнитного поля у выходного патрубка (максимальная напряженность), А/м;  $R_0$  – радиус выходного патрубка, м;  $R$  – радиус, на котором требуется вычислить значение напряженности поля, м.

Аналитическая зависимость изменения напряженности магнитного поля от высоты в научной литературе отсутствует.

**Основная часть.** В качестве источника информации об изменении напряженности магнитного поля по радиусу воспользуемся данными Ж. Ченом [6]. При сопоставлении данных, полученных эмпирическим путем с формулой (2) видно, что при небольших значениях напряженности они хорошо согласуются друг с другом (рис. 3 а). Однако при значительном увеличении тока в катушке (рис. 3 б) относительная погрешность между экспериментальными и теоретическими показаниями может составлять до 90%. Таким образом, использование формулы (2) недопустимо при значительных значениях напряженности магнитного поля.



а



б

Рис. 3. Изменение напряженности магнитного поля по радиусу при различных токах в обмотке: а) I=1А; б) I=8А

Предлагаем модернизировать формулу (2), которая бы учла вышеперечисленную проблему:

$$H(R) = H_0 \cdot \left(\frac{R_0}{R}\right)^N \tag{3}$$

где  $N$  – эмпирический коэффициент, который можно найти из следующего соотношения:

$$N = \frac{\ln\left(\frac{H_1}{H_0}\right)}{\ln\left(\frac{R_0}{R_1}\right)} \tag{4}$$

$H_1$  – напряженность магнитного поля в точке с радиусом  $R_1$ , А/м.

Для наиболее точных результатов  $H_1$  следует измерять у стенки цилиндрической части гидроциклона. Несмотря на то, что расчет устройств по отделению магнитных частиц из вязких и текучих сред исследовался многими авторами, считаем, что необходимо провести экспериментальное нахождение напряженности магнитного поля в узловых точках.

Формула (2) является частным случаем формулы (3) при  $n=1$ .

В качестве выражения  $H(R)$  можно использовать или уравнения (3) и (4) или другую эмпирическую

формулу:

$$H(R) = H_1 + (H_0 - H_1) \cdot e^{-\frac{(R-R_0) \cdot n_1}{R_1 - R_0}} \tag{5}$$

где  $H_1$  – напряженность магнитного поля у стенки цилиндрической части гидроциклона;  $R_1$  – радиус цилиндрической части гидроциклона;  $n_1$  – коэффициент, учитывающий кривизну графика.

Очевидна аналогия формулы (5) с переходным процессом инерционного звена 1-го порядка. Исходя из этого, можно смело утверждать, что величина  $R_1/n_1$  является аналогией постоянной времени  $T$  и коэффициент  $n_1=3\div 5$ , т.к. время переходного процесса длится  $3\div 5T$ . Очевидно, что чем больше кривизна распределения магнитного поля по радиусу – тем больше значение коэффициента  $n_1$ .

Граничные условия:

- при  $R=R_0$ :  $H(R)=H_0$ ;

- при  $R=R_1$ :  $H(R) = H_1 + (H_0 - H_1) \cdot e^{-n_1}$ , т.к.  $n_1$  принимает значения больше, чем 3, то  $e^{-n_1} < 0,05$  и вторым членом можно пренебречь в силу его малости, поэтому  $H(R)=H_1$ .

Результаты использования формулы (5) представлены на рис.4.

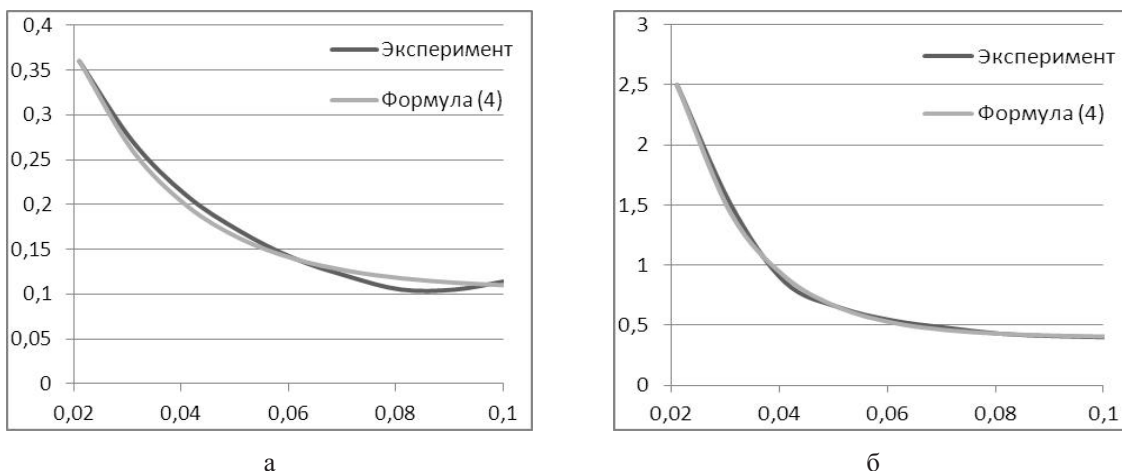


Рис. 4 - Изменение напряженности магнитного поля по радиусу при различных токах в обмотке: а)  $I=1A, n_1=4$ ; б)  $I=8A, n_1=5,7$

В качестве выражения  $H(Z)$  используем формулу, составленную по аналогии с предыдущей:

$$H(Z) = H_2 + (H_0 - H_2) \cdot e^{-\frac{Z \cdot n_2}{Z_1}} \tag{6}$$

где  $H_2$  – напряженность магнитного поля в нижней части гидроциклона;  $Z_1$  – высота цилиндрической части гидроциклона;  $n_2$  – коэффициент, учитывающий кривизну графика.

В качестве источника информации об изменении напряженности магнитного поля по высоте воспользуемся данными В. И. Просвирнина [6]. Графики, отображающие данные, полученные с использованием формулы (6) с экспериментальными данными представлены на рис. 5

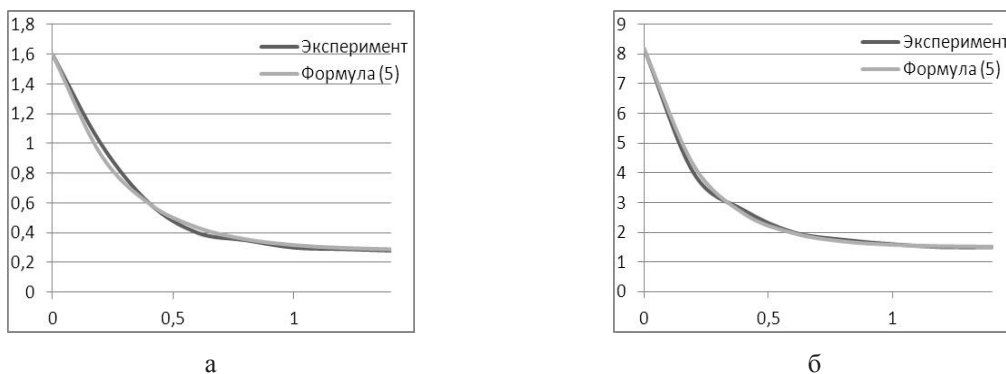


Рис. 5. Изменение напряженности магнитного поля по высоте при различных токах в обмотке: а)  $I=10A, n_1=5$ ; б)  $I=40A, n_1=6$

Предлагаем следующую модель изменение магнитного поля в рабочей камере по радиусу и высоте гидроциклона:

$$\begin{cases} H(R, Z) = H'_1(Z) + (H'_0(Z) - H'_1(Z)) \cdot e^{-\frac{(R-R_0)}{R_1-R_0} \cdot n} \\ H'_1(Z) = H_2 + (H_1 - H_2) \cdot e^{-\frac{Z \cdot n}{Z_1}} \\ H'_0(Z) = H_3 + (H_0 - H_3) \cdot e^{-\frac{Z \cdot n}{Z_1}} \end{cases} \quad (7)$$

где  $H_0-H_3$  – напряженности магнитного поля, которые измеряются в указанных точках (рис. 1). По формуле (7) была рассчитана напряженность магнитного поля, которое представлено на рис.6.

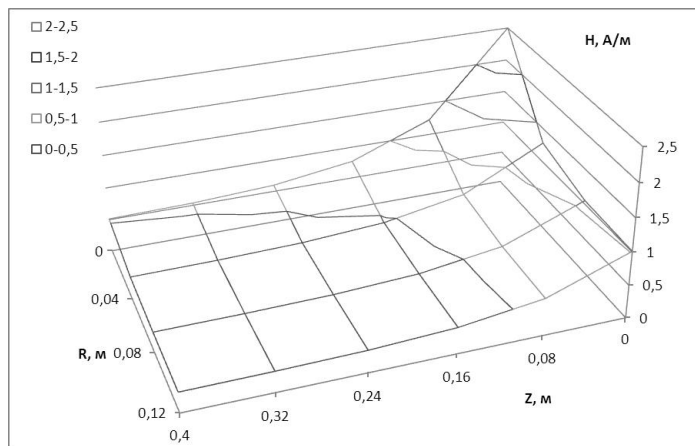


Рис. 6 - Изменение напряженности магнитного поля в рабочей камере гидроциклона, вычисленное по формуле (6)

Для более точного определения коэффициента  $n$  можно взять его среднее арифметическое от  $n_1$  и  $n_2$ . Для этого нужно снять значение напряженности магнитного поля в точках  $H_4$  и  $H_5$ , расположенные на расстоянии  $1/3$  от общей высоты магнитопровода, т.к. при этой высоте можно с наибольшей степенью вероятности найти истинное значение коэффициентов:

$$\begin{aligned} n_1 &= -\frac{Z_1}{Z_2} \cdot \ln \left( \frac{H_4 - H_2}{H_0 - H_2} \right); \\ n_2 &= -\frac{Z_1}{Z_2} \cdot \ln \left( \frac{H_5 - H_3}{H_1 - H_3} \right). \end{aligned} \quad (8)$$

Результаты моделирования при  $H_0=2,5 \cdot 10^4$  А/м,  $H_1=1 \cdot 10^4$  А/м,  $H_2=0,5 \cdot 10^4$  А/м,  $H_3=0,3 \cdot 10^4$  А/м,  $n=5$  представлены на рис. 6

Модель изменения напряженности магнитного поля в рабочей камере по радиусу и высоте гидроциклона может быть упрощена, если использовать формулу (3).

Упрощенная формула будет иметь вид:

$$H(R, Z) = \left[ H_3 + (H_0 - H_3) \cdot e^{-\frac{Z \cdot n}{Z_1}} \right] \cdot \left( \frac{R_0}{R} \right)^N \quad (9)$$

**Выводы:** В работе представлена математическая модель, отображающая изменение напряженности магнитного поля в рабочей камере гидроциклона. Данная модель в дальнейшем будет использована для расчета кинетики коагуляции частиц в рабочей камере и эффективности очистки вязких сред от магнитных примесей в очистительных устройств инерционного типа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Терновский И.Г. Гидроциклонирование - И.Г. Терновский, А.М. Кутепов. - М.: Наука, 1994. - 350 с.
2. Александров, Е. Е. Повышение ресурса технических систем путем использования электрических и магнитных полей [Текст] : Монография / Е. Е. Александров, И. А. Кравец, Е. Н. Лысиков [и др.]. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2006. – 544 с.

3. Масюткин Е. П. Анализ основ теории и методов расчета гидроциклонов с силовыми полями электрической природы (продолжение) [Текст] / Е. П. Масюткин, В. И. Просвирнин, Б. А. Авдеев // Рыбное хозяйство Украины. – Керчь : КГМТУ, 2011. – № 1 (78). – С. 34-38.
4. Масюткин Е. П. Очистка технических примесей в магнитных гидроциклонах [Текст] / Е. П. Масюткин, В. И. Просвирнин, Б. А. Авдеев // Рыбное хозяйство Украины. – Керчь : КГМТУ, 2011. – № 3 (74). – С. 35-40.
5. Тихонцов А.М., Чернышов А.В. Ковалев А.Е. Решение экологических задач машиностроения путем повышения качества гидроциклонной очистки СОЖ / А.М. Тихонцов, А.В. Чернышов, А.Е. Ковалев // - Сборник научных статей XVII международной научно-практической конференции «Экология, энерго- и ресурсосбережение, охрана окружающей среды и здоровье человека, утилизация отходов». Т II. - Харьков, 2009. - с. 219 - 225.
6. Chen G. Design and analysis of magnetic hydrocyclone : A thesis submitted for the degree of Master of Engineering / Gang Chen – Monreal : Department of Mining and Metallurgical Engineering McGill University, - 1989. – 129 p.
7. Просвирнин В. И. Теоретическое и экспериментальное обоснование кинетики процессов и параметров электромагнитных устройств очистки железосодержащих дисперсных сред в агропромышленном комплексе : дис. докт. техн. наук : 05.20.02 / В. И. Просвирнин ; МИМСХ. - Мелитополь, 1992. - 286 с

ПРОСВИРНИН Виктор Иванович – профессор, д.т.н., заведующий кафедрой Электрооборудование судов и автоматизация производства.

Научные интересы: Совершенствование техники и технологий очистки вязких и сыпучих сред путем применения полей электрической природы

ГОЛИКОВ Сергей Павлович – доцент кафедры Электрооборудование судов и автоматизация производства, к.т.н., декан морского факультета

Научные интересы: Совершенствование техники и технологий очистки вязких и сыпучих сред путем применения полей электрической природы

АВДЕЕВ Борис Александрович – аспирант, ассистент кафедры Электрооборудование судов и автоматизация производства

Научные интересы: Совершенствование техники и технологий инерционной очистки вязких сред путем применения полей электрической природы