

Е. П. Масюткин, Б. А. Авдеев, В. И. Просвирнин

Исследование распределения напряженности магнитного поля в инерционном аппарате очистки судового моторного масла

Представлены экспериментальные данные, показывающие распределение магнитного поля в рабочей камере гидроциклона по радиусу и высоте. Одним из важнейших параметров магнитных гидроциклонов является распределение магнитного поля по радиусу и высоте рабочей камеры, которое необходимо для расчета сил коагуляции и магнитной силы, действующей на частицу или флоккулу. Напряженность магнитного поля рассчитывалась через магнитную индукцию, измеряемую тесламетром через одинаковые промежутки и при различных значениях питающего постоянного тока. Полученные значения напряженности магнитного поля представлены в виде графиков. Данные, показывающие распределение магнитного поля в рабочей камере гидроциклона, аналогичны данным, опубликованным в отечественных и зарубежных научных журналах. Несколько экспериментально снятых точек выпадают из зависимости, что вызвано неидеальностью изготовления аппарата и самой процедуры замера индукции магнитного поля. Построены кривые распределения поля, полученные по зависимостям, найденным ранее; рассчитаны коэффициенты корреляции и доказано, что проанализированные зависимости можно использовать в дальнейших расчетах сил коагуляции и магнитной силы, так как теоретические и экспериментальные данные хорошо согласуются между собой. На большей части высоты гидроциклона поле можно считать постоянным по высоте и радиусу и достаточным для коагуляции магнитных частиц. Рассмотрено изменение поля в магнитной системе, где внешняя часть магнитопровода выполнена не цельной, а в виде вертикальных полос. Показано, что области с минимальным уровнем напряженности поля достаточно, чтобы не только сохранить образовавшиеся флоккулы, но и продолжить процесс флоккулообразования.

Ключевые слова: распределение поля, магнитный гидроциклон, магнитная коагуляция.

Введение

Одним из способов очистки судовых моторных масел от механических примесей является инерционный способ, в котором посторонние частицы извлекаются из вязкой среды под действием центробежной силы [1]. К таким аппаратам следует отнести центрифуги и гидроциклоны. Если первые устройства широко применяются в системах очистки масла, то гидроциклоны используются крайне редко из-за их более низкого коэффициента полезного действия. Одним из способов повышения их эффективности является наложение полей магнитной природы.

Существуют различные конструкции этих аппаратов, однако в промышленности (в особенности горнодобывающей и тяжелой) десятилетиями успешно применяются гидроциклоны с радиальным магнитным полем, известные в зарубежной литературе как гидроциклоны Фрикера [2–4]. Одним из важнейших параметров таких устройств является распределение магнитного поля по радиусу и высоте рабочей камеры, которое необходимо для расчета сил коагуляции и магнитной силы, действующей на частицу или флоккулу рабочей камере [5].

Вопросы, связанные с распределением магнитного поля в гидроциклоне, освещены в литературных источниках [2; 6; 7]. В [8] составлена зависимость напряженности магнитного поля в рабочей камере от радиуса и высоты.

Материалы и методы

Для проверки правильности составленной зависимости проводились измерения магнитного поля в опытном образце магнитного гидроциклона. Более подробно параметры гидроциклона описаны в [9]. Катушка магнитного гидроциклона выполнена из медного провода ММ (ГОСТ 16130–90) диаметром 0,6 мм; уложена в 14 слоев по 32 витка, итого – 448 витков. Замеры индукции магнитного поля производились с помощью тесламетра ЭМ4305 (ТУ У 33.2-00226098-022-2001) у стенок магнитопровода в плоскости с магнитопроводом у внешней стенки аппарата. Замеры проводились через каждые 5 мм по высоте и радиусу.

На рис. 1 представлена схема гидроциклона с радиальным магнитным полем и области, в которых осуществлялись замеры напряженности магнитного поля.

Напряженность поля находилась из магнитной индукции по следующей формуле:

$$H = \mu_f \cdot \mu_0 \cdot B.$$

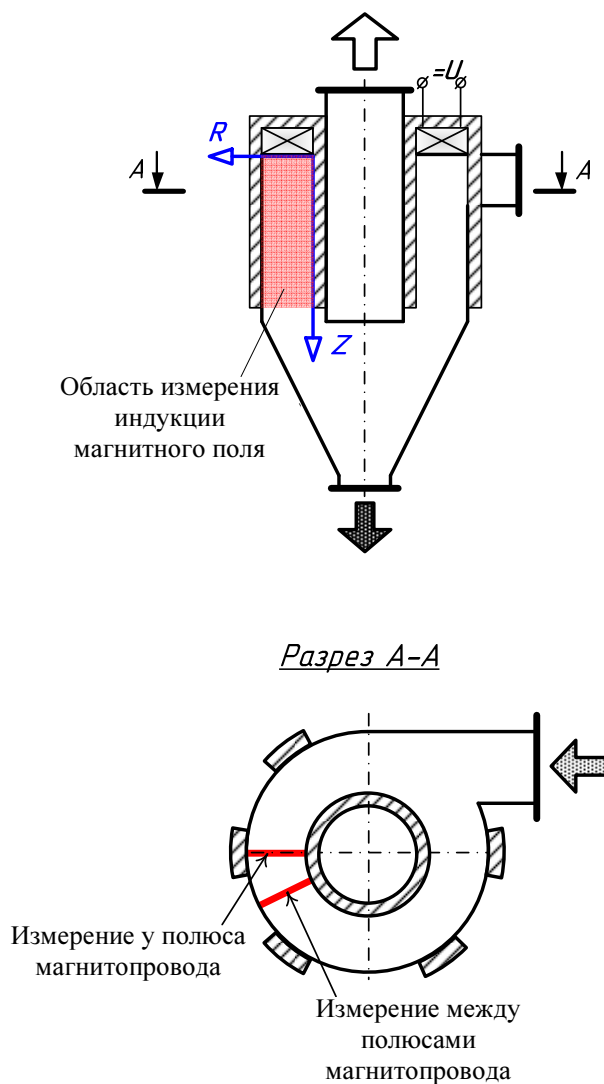


Рис. 1. Магнитный гидроциклон и области измерения магнитного поля в рабочей камере
 Fig. 1. Magnetic hydrocyclone and areas of the magnetic field measuring in the working chamber

Результаты и обсуждение

Сопоставим полученную зависимость распределения напряженности магнитного поля в рабочей камере гидроциклона с экспериментальными данными.

Напряженность поля в зависимости от радиуса R и высоты Z представлены ниже [8]:

$$H(R) = H_0 \cdot \left(\frac{R_0}{R}\right)^{n_R}; \quad (1)$$

$$H(Z) = H_B + (H_0 - H_B) \cdot e^{-\frac{Z \cdot n_Z}{h_C}}, \quad (2)$$

где n_R, n_Z – эмпирические коэффициенты, учитывающие кривизну графика.

Модель изменения напряженности магнитного поля в рабочей камере по радиусу и высоте гидроциклона может быть представлена в следующем виде:

$$H(R, Z) = \left[H_B + (H_0 - H_B) \cdot e^{-\frac{Z \cdot n_Z}{h_C}} \right] \cdot \left(\frac{R_0}{R}\right)^{n_R}.$$

Полученные данные при различных значениях питаемого постоянного тока представлены на рис. 2 и 3.

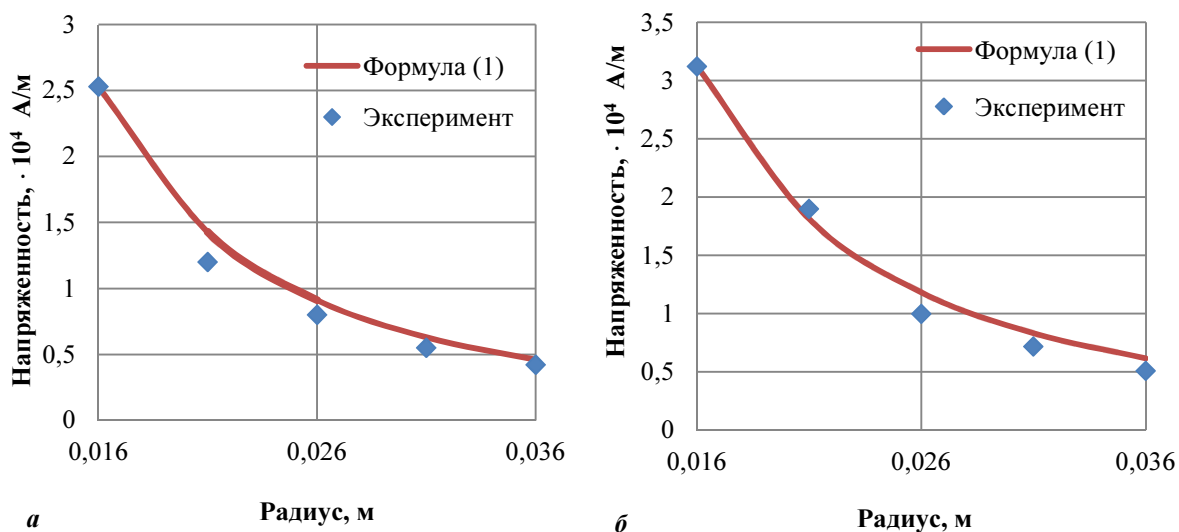


Рис. 2. Изменение напряженности магнитного поля в рабочей камере гидроциклона по радиусу при различных токах: $a - I = 1$ А ($R^2 = 0,995$); $b - I = 1,85$ А ($R^2 = 0,997$)

Fig. 2. Change the strength of the magnetic field in the hydrocyclone working chamber along the radius for different currents: $a - I = 1$ А ($R^2 = 0,995$); $b - I = 1,85$ А ($R^2 = 0,997$)

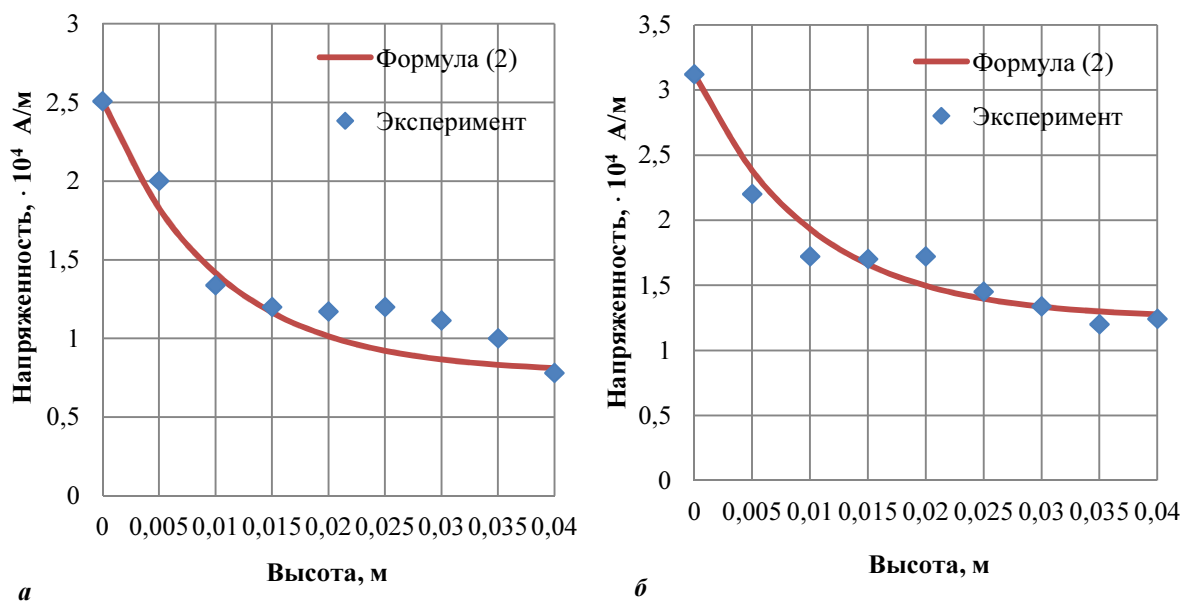


Рис. 3. Изменение напряженности магнитного поля в рабочей камере гидроциклона по высоте при различных токах: $a - I = 1$ А ($R^2 = 0,975$); $b - I = 1,85$ А ($R^2 = 0,977$)

Fig. 3. Changes in the magnetic field strength in the hydrocyclone working chamber along the height at different currents: $a - I = 1$ А ($R^2 = 0,975$); $b - I = 1,85$ А ($R^2 = 0,977$)

Распределение напряженности поля в цилиндрической части гидроциклона по радиусу и высоте представлено на рис. 4 при различных значениях тока.

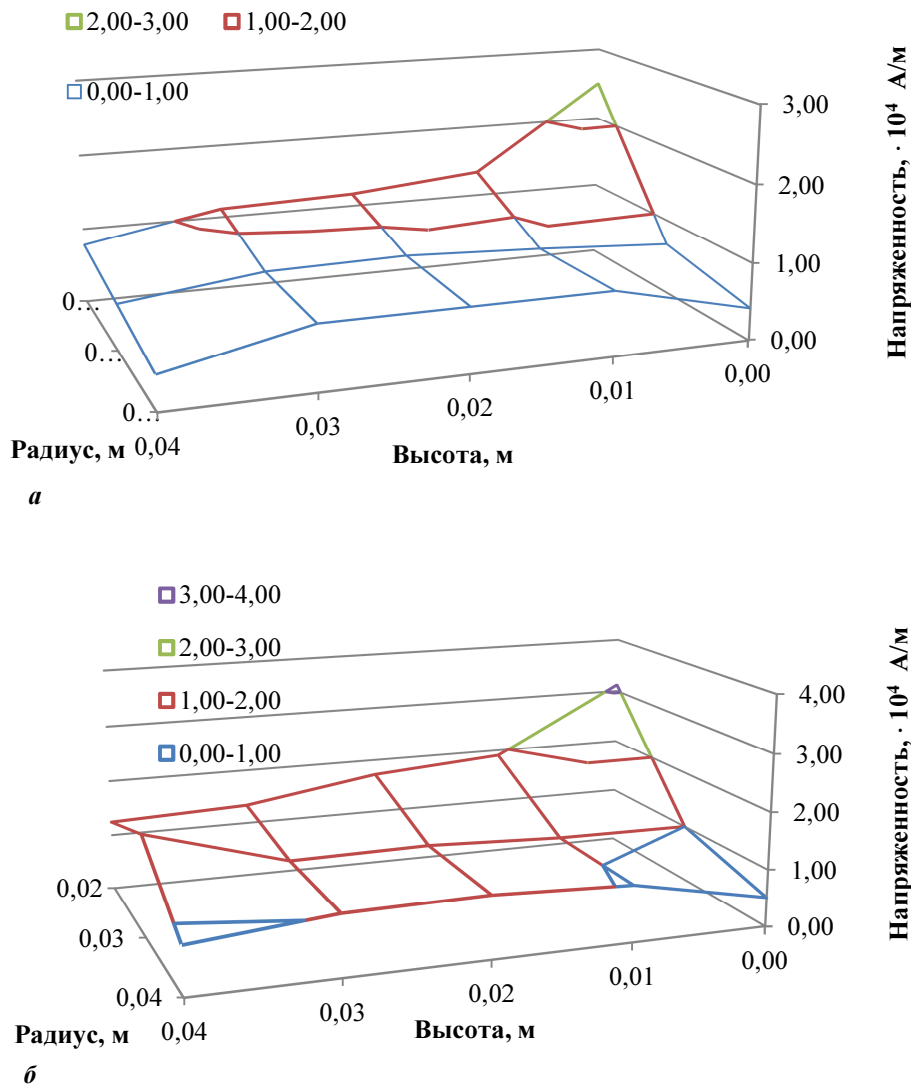


Рис. 4. Изменение напряженности магнитного поля в рабочей камере гидроциклона по радиусу и высоте при различных токах: *a* – $I = 1$ А; *б* – $I = 1,85$ А

Fig. 4. Changes in the magnetic field strength in the hydrocyclone working chamber along the radius and height at different currents: *a* – $I = 1$ А; *b* – $I = 1.85$ А

Полученное распределение магнитного поля в рабочей камере гидроциклона аналогично данным, опубликованным В. И. Просвирниным [10] и Дж. Чен [2]. Несколько экспериментально снятых точек выпадают из зависимости, что вызвано неидеальностью изготовления аппарата и самой процедуры замера индукции магнитного поля.

В третьем случае при протекании тока $I = 2,5$ А напряженность поля практически не выросла, несмотря на значительное увеличение электрической мощности, подаваемой на катушку индуктивности. Это объясняется тем, что магнитопровод аппарата насытился, и дальнейшее увеличение тока не приведет к существенному увеличению поля. На большей части высоты гидроциклона поле можно считать постоянным, например, при токе в 1 А по абсолютной величине оно достигает $1,2 \times 10^4$ А/м и достаточно для коагуляции магнитных частиц.

Отличительной особенностью экспериментального гидроциклона является то, что внешний контур магнитопровода выполнен из узких вертикальных полосок. Вышеприведенные замеры проводились у полюса магнитопровода со стороны корпуса аппарата (рис. 1). Напряженность магнитного поля между полюсами магнитопровода будет немного меньше, чем у полюса, однако достаточной не только для сохранения флоккулы,

но и для дальнейшего укрупнения. Графики распределения магнитного поля у полюса магнитопровода и между ними показаны на рис. 5.

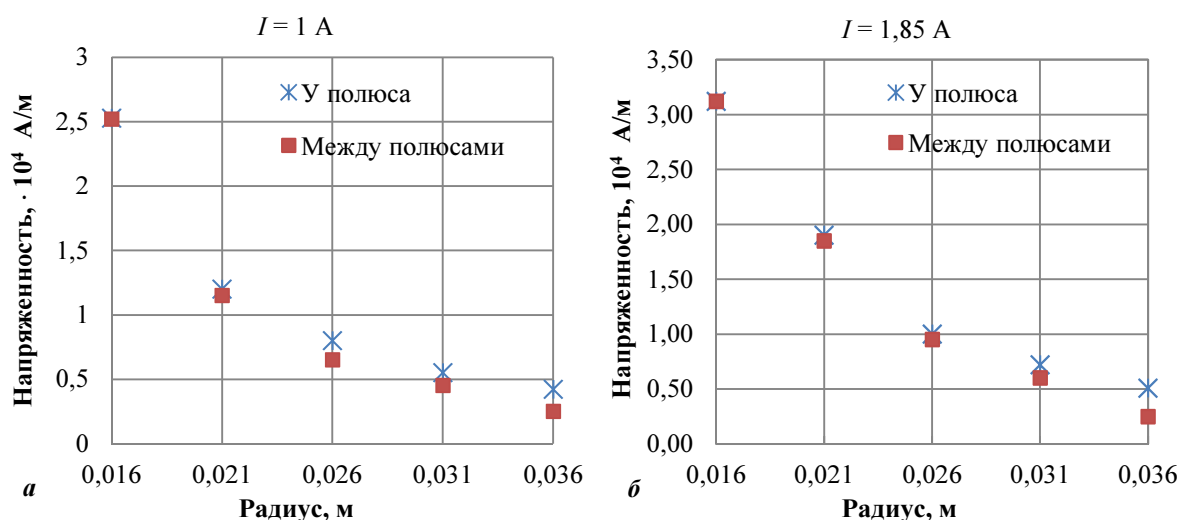


Рис. 5. Изменение напряженности магнитного поля в рабочей камере гидроциклона по радиусу при различных значениях тока: а – $I = 1$ А; б – $I = 1,85$ А

Fig. 5. Changes in the magnetic field strength in the hydrocyclone working chamber along the radius at different currents: а – $I = 1$ А; б – $I = 1.85$ А

Практическая реализация применения магнитных гидроциклонов различных конструкций и их преимущества перед традиционными способами очистки описаны в [1; 2; 6; 7; 11].

Выводы

Проведены экспериментальные исследования распределения напряженности магнитного поля в рабочей камере гидроциклона с радиальным магнитным полем по радиусу и высоте. Полученные эмпирические данные совпадают с ранее найденной зависимостью изменения поля. Без этой зависимости невозможен расчет сил коагуляции и магнитной силы.

Библиографический список

1. Авдеев Б. А. Повышение эффективности очистки моторного масла в судовых дизелях путем применения магнитных гидроциклонов : монография. Ульяновск : Зебра, 2016. 151 с.
2. Chen G. Design and analysis of magnetic hydrocyclone: A thesis submitted for the degree of Master of Engineering. Montreal : Department of Mining and Metallurgical Engineering McGill University. 1989. 129 p.
3. Аппараты для магнитной обработки жидкостей / Н. В. Инюшин, Е. И. Ишемгузин, Л. Е. Каштанова [и др.]. Уфа : Реактив, 2001. 147 с.
4. Hsu C.-Y., Wu S.-J., Wu R.-M. Particles separation and tracks in a hydrocyclone // Tamkang Journal of Science and Engineering. 2011. V. 14, N 1. P. 65–70.
5. Авдеев Б. А., Масюткин Е. П., Просвирнин В. И. Численное решение задачи о коагуляции двух частиц в потоке текучей среды в полярных координатах // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Сер. Технические науки. 2014. № 4 (179). С. 13–17.
6. The progress of the magnetic hydrocyclone / R. J. Freeman, N. A. Rowson, T. J. Veasey, I. R. Harris // Magnetic and Electrical Separation. 1993. V. 4. P. 139–149.
7. Терновский И. Г., Кутепов А. М. Гидроциклонирование. М. : Наука, 1994. 350 с.
8. Просвирнин В. И., Голиков С. П., Авдеев Б. А. Модель распределения радиального магнитного поля в гидроциклоне // Вестник Херсонского национального технического университета. 2013. № 1 (46). С. 300–304.
9. Авдеев Б. А., Голиков С. П. Экспериментальное исследование эффективности очистки магнитного гидроциклона // Транспортное дело России. 2014. № 5. С. 101–103.
10. Повышение ресурса технических систем путем использования электрических и магнитных полей / Е. Е. Александров, И. А. Кравец, Е. Н. Лысыков [и др.]. Харьков : НТУ. 2006. С. 544.
11. Premaratne W. A. P. J., Rowson N. A. Development of a magnetic hydrocyclone separation for the recovery of titanium from beach sands // Physical Separation in Science and Engineering. 2003. V. 12, N 4. P. 215–222.

References

1. Avdeev B. A. Povyshenie effektivnosti ochistki motornogo masla v sudovyh dizelyah putem primeniya magnitnyh gidrotsiklonov [Improving the efficiency of the engine oil cleaning in ship diesel engines using magnetic hydrocyclones] : monografiya. Ulyanovsk : Zebra, 2016. 151 p.
2. Chen G. Design and analysis of magnetic hydrocyclone: A thesis submitted for the degree of Master of Engineering. Montreal : Department of Mining and Metallurgical Engineering McGill University. 1989. 129 p.
3. Apparaty dlya magnitnoy obrabotki zhidkostey [Devices for magnetic treatment of liquids] / N. V. Inyushin, E. I. Ishemguzhin, L. E. Kashtanova [i dr.]. Ufa : Reaktiv, 2001. 147 p.
4. Hsu C.-Y., Wu S.-J., Wu R.-M. Particles separation and tracks in a hydrocyclone // Tamkang Journal of Science and Engineering. 2011. V. 14, N 1. P. 65–70.
5. Avdeev B. A., Masyutkin E. P., Prosvirnin V. I. Chislennoe reshenie zadachi o koagulyatsii dvuh chastits v potoke tekuchey sredy v polyarnykh koordinatah [The numerical solution of the problem of coagulation of two particles in a fluid flow in polar coordinates] // Izvestiya vysshih uchebnykh zavedeniy. Severo-Kavkazskiy region. Ser. Tehnicheskie nauki. 2014. N 4 (179). P. 13–17.
6. The progress of the magnetic hydrocyclone / R. J. Freeman, N. A. Rowson, T. J. Veasey, I. R. Harris // Magnetic and Electrical Separation. 1993. V. 4. P. 139–149.
7. Ternovskiy I. G., Kutepov A. M. Gidrotsiklonirovanie [Hydrocycloning]. M. : Nauka, 1994. 350 p.
8. Prosvirnin V. I., Golikov S. P., Avdeev B. A. Model raspredeleniya radialnogo magnitnogo polya v gidrotsiklone [Model of radial magnetic field distribution in a hydrocyclone] // Vestnik Hersonskogo natsionalnogo tehnikeskogo universiteta. 2013. N 1 (46). P. 300–304.
9. Avdeev B. A., Golikov S. P. Eksperimentalnoe issledovanie effektivnosti ochistki magnitnogo gidrotsyklona [Experimental research the cleaning efficiency of the magnetic hydrocyclone] // Transportnoe delo Rossii. 2014. N 5. P. 101–103.
10. Povyshenie resursa tehnikeskikh sistem putem ispolzovaniya elektricheskikh i magnitnykh poley [Increasing the resource of technical systems by the use of electric and magnetic fields] / E. E. Aleksandrov, I. A. Kravets, E. N. Lysikov [i dr.]. Harkov : NTU. 2006. P. 544.
11. Premaratne W. A. P. J., Rowson N. A. Development of a magnetic hydrocyclone separation for the recovery of titanium from beach sands // Physical Separation in Science and Engineering. 2003. V. 12, N 4. P. 215–222.

Сведения об авторах

Масюткин Евгений Петрович – ул. Орджоникидзе, 82, г. Керчь, Россия, 298309; Керченский государственный морской технологический университет, канд. техн. наук, профессор, ректор; e-mail: kgmtu@kgmtu.ru

Masyutkin E. P. – 82, Ordzhonikidze Str., Kerch, Russia, 298309; Kerch State Maritime Technological University, Cand. of Tech. Sci., Professor, Rector; e-mail: kgmtu@kgmtu.ru

Авдеев Борис Александрович – ул. Орджоникидзе, 82, г. Керчь, Россия, 298309; Керченский государственный морской технологический университет, канд. техн. наук, доцент; e-mail: dirigeant@mail.ru

Avdeyev B. A. – 82, Ordzhonikidze Str., Kerch, Russia, 298309; Kerch State Maritime Technological University, Cand. of Tech. Sci., Associate Professor; e-mail: dirigeant@mail.ru

Просвирнин Виктор Иванович – ул. Орджоникидзе, 82, г. Керчь, Россия, 298309; Керченский государственный морской технологический университет, д-р техн. наук, профессор; e-mail: vip-3434@mail.ru

Prosvirnin V. I. – 82, Ordzhonikidze Str., Kerch, Russia, 298309; Kerch State Maritime Technological University, Dr of Tech. Sci., Professor; e-mail: vip-3434@mail.ru

E. P. Masyutkin, B. A. Avdeyev, V. I. Prosvirnin

Research of distribution of the magnetic field intensity in the inertial device of the ship engine oil purification

In the paper experimental data showing the magnetic field distribution in the hydrocyclone working chamber according to radius and height have been presented. One of the most important parameter of magnetic hydrocyclones is the distribution of the magnetic field along the radius and height of the working chamber necessary to calculate the coagulation and magnetic forces that act on the particle or the flocculation. The magnetic field intensity has been calculated by the magnetic intensity measured by the magnetometer at regular intervals and with different values of DC supply. The resulting values of the magnetic intensity have been presented in graphs. Data that show the distribution of the magnetic field in the hydrocyclone working chamber are the same as those published in domestic and foreign scientific journals. There are several data points that do not fit in the relationship caused by non-ideal manufacturing apparatus and the procedure measuring the magnetic field. Field distribution curves received by the previously found dependencies have been constructed; correlation coefficients have been calculated and proved that analyzed dependence can be used in further calculations forces coagulation and magnetic force as theoretical and experimental data are in good agreement. In most of the hydrocyclone height the field can be considered constant by height and radius and sufficient for the coagulation of the magnetic particles. The change of the magnetic field has been considered where the outer part of the magnetic circuit is not formed whole but in the form of vertical strips. The research has shown that the area with the minimum field strength is enough to not only save the already formed floccules, but also to continue the process of floccule formation.

Key words: field distribution, magnetic hydrocyclone, magnetic coagulation.