

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОДЕЛИ МАГНИТНОГО ГИДРОЦИКЛОНА ДЛЯ РАСЧЕТА ЭФФЕКТИВНОСТИ ОЧИСТКИ

УДК 541.311:614.84

## ГОЛИКОВ Сергей Павлович

к.т.н., доцент, кафедра электрооборудования судов и автоматизации производства,  
Керченский государственный морской технологический университет.

**Научные интересы:** моделирование сложных транспортных комплексов.

## АВДЕЕВ Борис Александрович

аспирант, кафедра электрооборудования судов и автоматизации производства, керченский  
государственный морской технологический университет.

**Научные интересы:** моделирование, устройства очистки от магнитных примесей.

## ВВЕДЕНИЕ

Во всех отраслях экономики каждого государства существуют машины и механизмы, работающие с техническими жидкостями (амортизаторные, антиобледенительные, гидравлические, охлаждающие, промывочные, смазочно-охлаждающие, тормозные и др.) [1]. Рациональное использование технических жидкостей является одним из способов повышения эффективности и долговечности работы оборудования. В процессе эксплуатации технической жидкости происходит процесс её загрязнения механическими примесями, поэтому возникает необходимость в очистке с применением специальных систем [1].

## ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

На сегодняшний день существует четыре базовых принципа очистки вязких сред: отстаивание под действием сил гравитации; сепарация под действием внешнего воздействия (электрическое, магнитное поля или ультразвук); ситовый эффект, задерживающие примеси больше, чем размер «поры» и инерционный, основанный на действии центробежных сил [3]. Наиболее экономичным способом очистки при большом объеме технических жидкостей является очистка с помощью гидроциклонов, которые позволяют непрерывно извлекать механические примеси с постоянно высокой

эффективностью [4]. Однако процессы, происходящие в рабочей зоне, являются малоизученными, особенно с полями электрической природы, что сдерживает их массовое использование на производствах.

## ИНФОРМАЦИОННЫЙ АНАЛИЗ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Существует большое число различных конструкций магнитных гидроциклонов (рис. 1), однако наиболее часто используемый – гидроциклон с радиальным магнитным полем (гидроциклон Фрикера) [4-8].

Существуют различные методики расчета эффективности гидроциклонов. Большинство из них основаны на эмпирических и полуэмпирических зависимостях, которые являются пригодными только к конкретному типу. Для магнитных гидроциклонов задача усложняется, т.к. помимо магнитной силы на частицы будет действовать и силы коагуляции.

В качестве оценки эффективности гидроциклона часто применяют такой параметр как диаметр среза [9]. Диаметр среза имеют такие частицы, которые будут улавливаться с вероятностью в 50 %.

Дж. Чен предложил находить диаметр среза частиц в магнитном гидроциклоне, исходя из равенства сил, действующих на частицу [5].

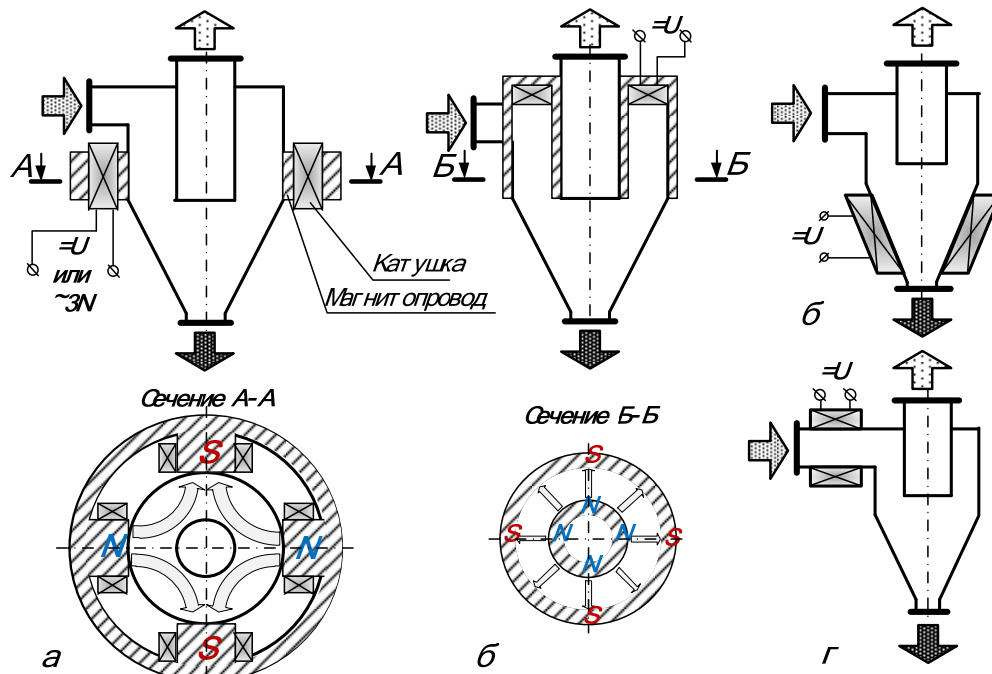


Рисунок 1 – Магнитные гидроциклоны: а – гидроциклон Уотсона; б – гидроциклон Фрикера; в – гидроциклон с коагулятором на входе

$$d_{50m} = \sqrt{\frac{18 \cdot \eta_c \cdot R \cdot v_r}{(\rho - \rho_c) \cdot v_\tau - R \cdot \mu_0 \cdot \alpha \cdot H \cdot \text{grad} H}} \quad (1)$$

где  $v_\tau$  и  $v_r$  – тангенциальная и радиальная составляющие скорости частицы в жидкости, м/с;  $R$  – расстояние между частицей и центром циклона, м;  $d_i$  – диаметр сферической частицы, м;  $\rho$ ,  $\rho_c$  – плотность частицы и жидкости соответственно, кг/м<sup>3</sup>;  $\eta_c$  – вязкость, кг/м·с;  $\mu_0$  – магнитная постоянная, 4π·10<sup>-7</sup> Гн/м;  $\alpha$  – магнитная восприимчивость, о.е.;  $H$ ,  $\text{grad}H$  – напряженность поля (А/м) и скорость ее изменения (А/м<sup>2</sup>) в направлении движения частиц.

Граничный диаметр в [8] находится следующим образом:

$$d_{lim} = \sqrt[3]{\frac{2 \cdot \mu \cdot v_r \cdot r}{\alpha \cdot H_0^2 \cdot (p-1) \cdot (2 \cdot r/D)^{2(p-1)} + (\rho - \rho_0) \cdot v_\tau}} \quad (2)$$

где  $H_0$  – напряженность магнитного поля на полюсе, А/м;  $p$  – число пар полюсов;  $D$  – диаметр гидроциклона, м.

Но данными уравнениями практически невозможно воспользоваться из-за большого числа неиз-

вестных величин, определение которых даже в лабораторных условиях вызывает серьезные затруднения, и в особенности неучета сил коагуляции.

### ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Коагуляция в процессе извлечения магнитных сил играет одну из ключевых ролей, поэтому ее неучет является грубейшей ошибкой, а сила взаимодействия двух частиц между собой в отдельных случаях на порядок больше, чем сила магнитного притяжения. Была разработана методика расчета выходной концентрации механических примесей из магнитного гидроциклона, основанная на базовых законах физики и применимая к аппаратам любого типа [10,11].

На рис. 2 а, б представлены графики, показывающие преимущества магнитных гидроциклонов перед обычными для улавливания магнитных примесей.

Как мы можем видеть из рис. 2 а, концентрация частиц для шарообразных частиц с диаметром  $d=40 \cdot 10^{-6}$  м в магнитном гидроциклоне с напряженностью  $H=1 \cdot 10^4$  А/м уменьшилась на 7,8 %, а при напряженности  $H=4 \cdot 10^4$  А/м – на 31,9 %. Увеличение напряженности магнитного поля будет способствовать дальнейшей

коагуляції частиц (т.е. укрупненню), що в кінцевому итоге приведе до збільшенню ефективності апарата. Одним из факторов, впливаючим на процес сепарації в магнітному гідроциклоне – це входна концентрація частиц. Чем она выше, тем менше напруження поля потребується для коагуляції частиц (рис. 2 б). Если входная концентрация частиц будет увеличена в 5 раз, то эффективность очистки частиц с диаметром

$d=40 \cdot 10^{-6}$  м при напруженности  $H=4 \cdot 10^4$  А/м увеличится на 54,6 %. В действительности, эффективность сепарации при высокой входной концентрации будет выше чем при нормальном режиме работы; причина данного эффекта нагрузки на эффективность разделения до сих пор не установлена. Схематически процесс коагуляции в рабочей зоне гидроциклона представлен на рис. 2 с, d.

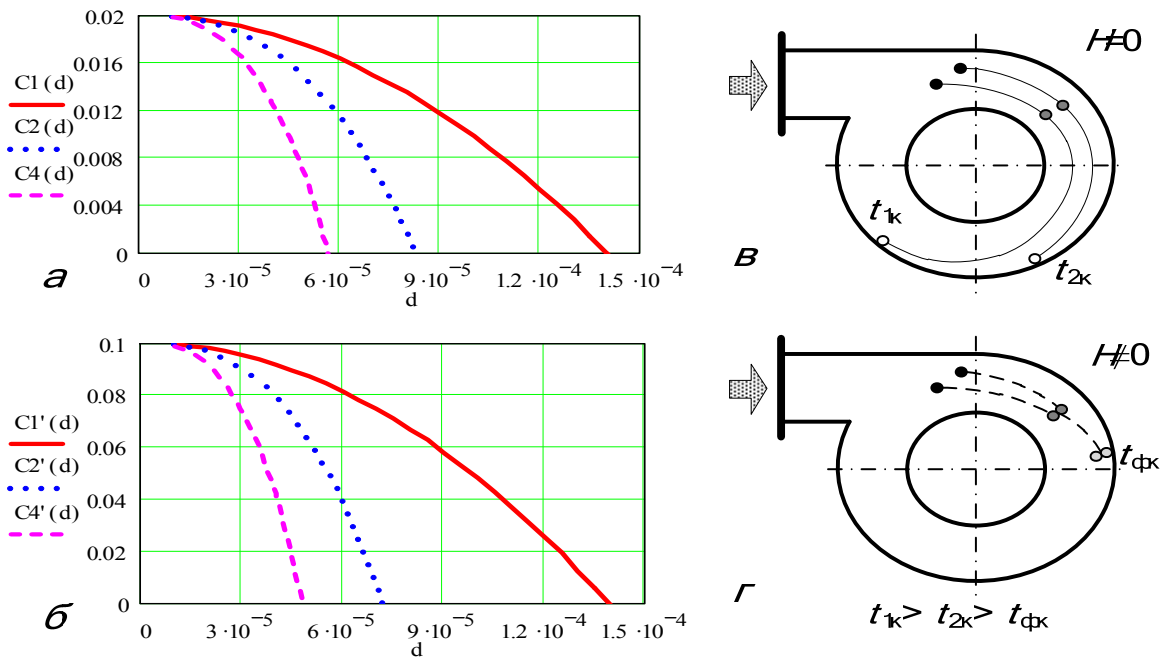


Рисунок 2 – Зависимости выходной концентрации от диаметра примесей при различных значениях концентрации: а)  $C_{ex}=0,02 \text{ кг/м}^3$ ; б)  $C_{ex}=0,1 \text{ кг/м}^3$ . ( $C_1$  и  $C_1'$  –  $H=0 \cdot 10^4 \text{ А/м}$ ;  $C_2$  и  $C_2'$  –  $H=1 \cdot 10^4 \text{ А/м}$ ;  $C_4$  и  $C_4'$  –  $H=4 \cdot 10^4 \text{ А/м}$ )

В [12] приведен сравнительный анализ сил, действующих на частицу с целью определения наиболее эффективного конструкторского решения. Было подтверждено, что основное назначение магнитного поля в гидроциклонах – это обеспечение флокулообразование, благодаря этому увеличивается масса частиц и, соответственно, действующая на них центробежная сила. В связи с этим наиболее оптимальный вариант с точки зрения эффективности/затраты – это гидроциклон с радиальным магнитным полем (рис. 1 б). Гидроциклон Фрикера имеет один недостаток – магнитная сила действует от периферии к центру. С целью направить действие магнитной силы в противоположную

сторону и, соответственно, увеличить эффективность очистки применяют специальные насадки [13].

Для того чтобы оценить эффективность очистки работы магнитных аппаратов инерционного типа требуется исследование процессов, происходящих в рабочей камере магнитных гидроциклонов, в частности модель коагуляции магнитных частиц в криволинейном потоке.

В [14] представлена математическая модель взаимодействия двух частиц в цилиндрической части рабочей камере гидроциклона, выполненной в полярной системе координат:

$$\begin{aligned}
 \frac{d^2 R_1}{dt^2} &= R_1 \cdot \left( \frac{d\theta_1}{dt} \right) - A_1 \cdot \frac{dR_1}{dt} - B_1 \cdot \frac{1}{R_1^{2n_R+1}} - E_1 \cdot \frac{(R_1 - R_2 \cdot \cos(\theta_1 - \theta_2)) \cdot (R_1 \cdot R_2)^{-n_R}}{(R_1^2 + R_2^2 - 2 \cdot R_1 \cdot R_2 \cdot \cos(\theta_1 - \theta_2))^{\frac{3}{2}}}; \\
 \frac{d^2 \theta_1}{dt^2} &= -\frac{2}{R_1} \frac{d\theta_1}{dt} \cdot \frac{dR_1}{dt} + A_1 \cdot \left( U_\theta - R_1 \cdot \frac{d\theta_1}{dt} \right) + E_1 \cdot \frac{R_2 \cdot \sin(\theta_2 - \theta_1) \cdot (R_1 \cdot R_2)^{-n_R}}{(R_1^2 + R_2^2 - 2 \cdot R_1 \cdot R_2 \cdot \cos(\theta_1 - \theta_2))^{\frac{3}{2}}}; \\
 \frac{d^2 R_2}{dt^2} &= R_2 \cdot \left( \frac{d\theta_2}{dt} \right) - A_2 \cdot \frac{dR_2}{dt} - B_2 \cdot \frac{1}{R_2^{2n_R+1}} - E_1 \cdot \frac{(R_2 - R_1 \cdot \cos(\theta_1 - \theta_2)) \cdot (R_1 \cdot R_2)^{-n_R}}{(R_1^2 + R_2^2 - 2 \cdot R_1 \cdot R_2 \cdot \cos(\theta_1 - \theta_2))^{\frac{3}{2}}}; \\
 \frac{d^2 \theta_2}{dt^2} &= -\frac{2}{R_2} \frac{d\theta_2}{dt} \cdot \frac{dR_2}{dt} + A_2 \cdot \left( U_\theta - R_2 \cdot \frac{d\theta_2}{dt} \right) - E_2 \cdot \frac{R_1 \cdot \sin(\theta_2 - \theta_1) \cdot (R_1 \cdot R_2)^{-n_R}}{(R_1^2 + R_2^2 - 2 \cdot R_1 \cdot R_2 \cdot \cos(\theta_1 - \theta_2))^{\frac{3}{2}}};
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

где  $R_i, \theta_i$  – координаты частиц в полярной системе;  $A_i, B_i, C_i, E_i$  – коэффициенты при действиях сил сопротивления среды, магнитной, Магнуса и Саффмана, взаимодействия 2х частиц соответственно.

Изменение напряженности поля в рабочей камере гидроциклона приведено в [15], а допущения при использовании данной модели – в [16].

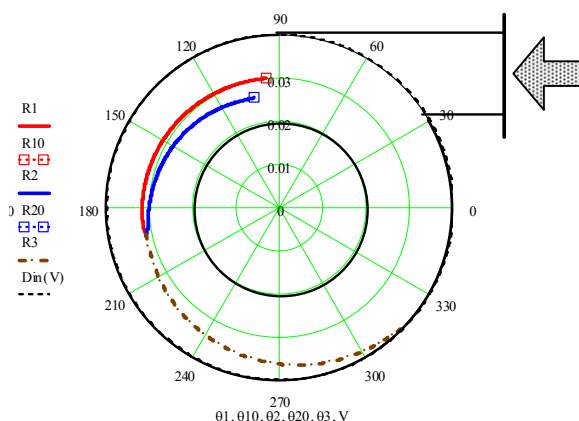


Рисунок 3 – Результаты решение математической модели коагуляции двух частиц в рабочей камере гидроциклона с радиальным магнитным полем: — - траектория движение частиц под действием магнитного поля; - - - траектория движение образовавшейся флоккулы. ( $t=0,063$  с)

Система уравнений (3) решалась численным методом с использованием MathCAD для частных случаев (рис. 3):  $d_1=70$  мкм;  $d_2=90$  мкм; частицы – железный порошок, среда – вода;  $H_0=4 \cdot 10^4$  А/м. Начальные условия:  $R_{10}=0,037$  м;  $R_{20}=0,03$  м;  $\theta_{10}=1,75$  рад;  $\theta_{10}=1,6$  рад;  $V_{R10}=V_{R20}=0$  м/с;  $V_{\theta10}=V_{\theta20}=2$  м/с.

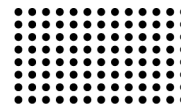
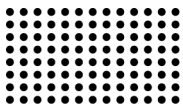
Как мы можем видеть из рис. 3, образовавшаяся флоккула интенсивней двигается к внешней стейки гидроциклона, что ведет к общему увеличению эффективности работы.

### ВЫВОДЫ

Из вышеперечисленного можно сделать вывод о том, что применение полей магнитной природы в традиционных способах очистки является одним из эффективных способов увеличения эффективности очистки вязких сред от механических примесей. Создание математических моделей позволяет более полно раскрыть процессы, происходящие внутри аппаратов, что в свою очередь ведет к созданию устройств с высшей эффективностью работы.

### ЛИТЕРАТУРА:

1. Toplivo, smazochnye materialy i tekhnicheskie zhidkosti: uchebnoe posobie/ V.V. Ostrikov, S.A. Nagornov, O.A. Klejmenov, V.D. Prokhorenkov, I.M. Kurochkin, A.O. Khrennikov, D.V. Dorovskikh. – Tambov: Izd-vo Tamb. gos. tekhn. un-ta, 2008. – 304 s.
2. Kuznecov A.V. Toplivo i smazochnye materialy / A.V. Kuznecov. – M.: KolosS, 2007. – 199 s.
3. Aleksandrov, E. E. Povyshenie resursa tekhnicheskikh sistem putem ispol'zovaniya ehlektricheskikh i magnitnykh polej [Tekst] : Monografija / E. E. Aleksandrov, I. A. Kravec, E. N. Lysikov [i dr.]. – Khar'kov : NTU «KhPI», 2006. – 544 s.
4. Masjutkin E. P. Ochistka tekhnicheskikh primesej v magnitnykh gidrociklonakh [Tekst] / E. P. Masjutkin, V. I. Prosvirnin, B. A. Avdeev // Rybnoe khozajjstvo Ukrainy. – Kerch' : KGMTU, 2011. – № 3 (74). – S. 35-40.



5. 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.
6. Ternovskij I.G. Gidrociklonirovanie - I.G. Ternovskij, A.M. Kutepov. - M.: Nauka, 1994. - 350 s.
7. Freeman, R.J. The progress of the magnetic hydrocyclone [Text] / R.J. Freeman, N.A. Rowson, T.J. Veasey, I.R. Harris/ - Magnetic and Electrical Separation, 2002. - Vienna: Hindawi. - Vol. 4, pp. 139-149.
8. Premaratne, W.A.P.J. Development of a magnetic hydrocyclone separation for the recovery of titanium from beach sands [Text] / W.A.P.J. Premaratne, N.A. Rowson. // Physical Separation in Science and Engineering, 2003. - Vienna: Hindawi. - Vol. 12, No. 4, pp. 215–222.
9. Hydrocyclones: Analysis and Applications / by L. Svarovsky, M.T. Thew - Springer Netherlands, 1992. – r. 440.
10. Masjutkin E. P. Analiz osnov teorii i metodov rascheta gidrociklonov s silovymi poljami ehlektricheskoy prirody (prodolzhenie) [Tekst] / E. P. Masjutkin, V. I. Prosvirnin, B. A. Avdeev // Rybnoe khozajstvo Ukrainy. – Kerch' : KGMTU, 2011. – № 1 (78). – S. 34-38.
11. Masjutkin E.P. K raschetu magnitnogo gidrociklona [Tekst] / E.P. Masjutkin, V.I. Prosvirnin, B. A. Avdeev // Problemy ehnergosbezhenija i mekhanizacii v gorno-metallurgi-cheskom komplekse: materialy VII mezhdunar. nauch.-tekhn. konf., 8 maja 2012 g. – Krivoj Rog : KNU, 2012, – S. 89-94.
12. Avdeev B.A. Analiz vozdeystvija magnitnogo polja na process separacii v gidrociklonakh [Tekst] / B.A. Avdeev // Tekhnicheskij audit i rezervy proizvodstva. – Khar'kov, 2013. - № 5/4(13). - S. 45-47.
13. Pat. UA 85261, MPK V04S 5/24, Magnitnij gidrociklon / Prosvirnin V.I., Masjutkin E.P., Avdeev B.O., Prosvirina E.V., Masjutkin D.E. (UA). – u 2013 07331; Zajavl. 10.06.2013; Opubl. 11.11.2013; Bjul. № 21.
14. Avdeev B.A. Chislennoe reshenie zadachi o koaguljacii dvukh chastic v potoke tekucej srede v poljarnykh koordinatakh / B.A. Avdeev, E. P. Masjutkin, V.I. Prosvirnin // Izvestija vysshikh uchebnykh zavedenij. Severo-Kavkazskij region. Tekhnicheskie nauki. – Novocherkassk, 2014. - №4. – S. 15-20.
15. Prosvirnin V.I. Model' raspredelenija radial'nogo magnitnogo polja v gidrociklone [Tekst] / V.I. Prosvirnin, S.P. Golikov, B.A. Avdeev // Vestnik Khersonskogo nacional'nogo tekhnicheskogo universiteta. – Kherson : KhNTU, 2013. – № 1(46). – S. 300-304.
16. Avdeev B.A. Model' dvizhenija chastic v magnitnom gidrociklone [Tekst] / B.A. Avdeev // Tekhnicheskij audit i rezervy proizvodstva. – Khar'kov, 2013. - № 5/1(13). - S. 36-41.