

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ, СИСТЕМЫ И УСТРОЙСТВА

УДК 629.063.7

Б. А. Авдеев,
асп.;

Е. П. Масюткин,
канд. техн. наук, проф.;

В. И. Просвирнин,
д-р техн. наук, проф.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА КОАГУЛЯЦИИ В КРИВОЛИНЕЙНОМ ПОТОКЕ В МАСЛЯНЫХ СИСТЕМАХ СУДОВЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

MODELING OF COAGULATION PROCESS IN THE CURVILINEAR FLOW IN THE OIL SYSTEM OF SHIP POWER PLANTS

Разработана модель коагуляции частиц в рабочей камере гидроциклов с радиальным магнитным полем, в основу которой положен подход Лагранжа. В качестве сил, действующих на частицы, рассматривались силы коагуляции, центробежная и сила сопротивления среды как наиболее существенные. Модель выполнена в цилиндрической системе координат как наиболее удобная в использовании для аппаратов очистки вязких сред инерционного типа. Механизм коагуляции описан и проиллюстрирован. Математическая модель была численно решена при заданных параметрах, результаты решения системы дифференциальных уравнений представлены в виде проекции графиков. Помимо траекторий движения и времени коагуляции было рассчитано расстояние между коагулирующими частицами. Показано, что магнитное поле способствует процессу флокулообразования, что, в свою очередь, увеличивает центробежную силу в гидроциклоне, вследствие чего степень очистки возрастает.

The model of the coagulation of particles in the operation chamber of watercrafts (hydrocycles) with a radial magnetic field has been developed. It is based on the Lagrangian approach. As the forces acting on the particles, there were considered coagulation forces, centrifugal force and resistance of the medium as the most significant. The model is performed in a cylindrical coordinate system as the most convenient for devices to use for the treatment of viscous fluid inertial type. Coagulation mechanism is described and illustrated. A mathematical model was numerically solved for the given parameters; the results of solving a system of differential equations are presented in the form of a projection graphs. In addition to the trajectories and the coagulation time the distance between the particles coagulating was calculated. It is shown that the magnetic field promotes coagulation process, which in turn increases the centrifugal force in a hydrocyclone, and as a result increases the degree of purification.

Ключевые слова: математическая модель, магнитный гидроциклон, коагуляция.

Key words: mathematical model, magnetic hydrocyclone, coagulation.

Введение

В статье приведена математическая модель коагуляции двух частиц в рабочей зоне гидроциклонов с радиальным магнитным полем, выполненная в цилиндрической системе координат. Несмотря на то, что циклоны и гидроциклоны используются повсеместно, в настоящее время не существует приемлемой и точной модели кинетики частиц в криволинейном потоке.

Анализ современных судовых энергетических установок показывает, что вопросы, связанные с повышением эффективности двигателей внутреннего сгорания (ДВС) до сих пор актуальны. Основным типом двигателя на всех современных судах как речного, так и морского флота, является ДВС, при этом годовые расходы на горюче-смазочные материалы могут превышать стоимость

самого дизеля в несколько раз. В связи с тем, что потери мощности на износ при неправильной эксплуатации составляют в среднем 15 – 20 %, процесс регенерации масел является одним из важнейших и неотложных на водном транспорте, поскольку если вовремя не выполнить замену моторного масла, то износ ДВС увеличится на 150 – 200 % [1].

Существуют четыре базовых метода механической очистки технических жидкостей: гравитационный, инерционный, ситовый и сепарационный (под действием внешнего воздействия). В связи с тем, что наиболее опасными примесями в моторном масле выступают продукты износа, которые по своей природе являются ферромагнитными, эффективность очистки железосодержащих дисперсных сред может интенсифицироваться путем наложения магнитного поля на известные устройства [2].

Механические примеси большого размера в неочищенной вязкой среде легко удаляются с помощью известных методов очистки. Однако большая часть примесей является мелкими дисперсными частицами, которые ввиду малого размера плохо поддаются извлечению традиционными способами [3]. Поэтому возникла необходимость применять специальные или комбинированные методы очистки. Одним из наиболее перспективных является наложение полей электрической природы, где коагуляция в значительной степени повышает эффективность очистки.

Коагуляция — процесс объединения мелких частиц в более крупные под действием сил сцепления. Маленькие частицы объединяются в большие агломераты, называемые *флокулами*, которые можно значительно легче извлечь из вязких сред.

В качестве примера успешного применения магнитных полей с традиционными методами очистки может служить *магнитный гидроциклон*. Существуют различные конструкции этих аппаратов, однако наибольшую популярность получил гидроциклон с радиальным магнитным полем, приведенный на рис. 1, с принципом действия и конструкцией которого подробно можно ознакомиться в [4].

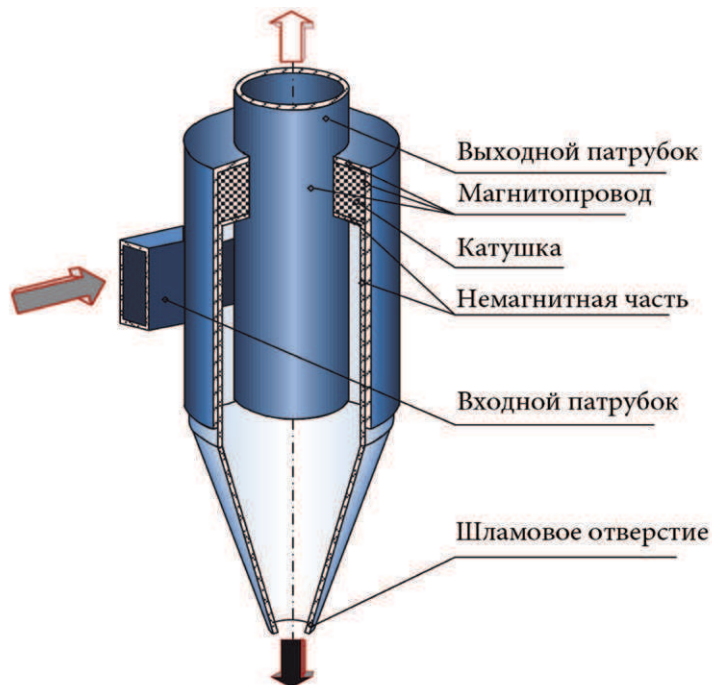


Рис. 1. Гидроциклон с радиальным магнитным полем

Динамике частиц в рабочей камере циклонов и гидроциклонов посвящен ряд исследований. Успехи в области моделирования движения сплошной среды неоспоримы без наложения магнитного поля [5] – [8]. Однако процесс коагуляции или полностью отсутствует, или носит эмпирический характер и определяется с помощью экспериментально найденных поправочных коэффици-

ентов, применить которые можно только к конкретным аппаратам. Ранее была разработана модель коагуляции двух частиц в криволинейном потоке, выполненная в полярных координатах, однако и она требует дальнейшего совершенствования [9]. Так как процесс сепарации в рабочей камере гидроциклона является сложным и не поддается полностью аналитическому или теоретическому решению, прибегнем к некоторым допущениям, аналогично изложенным в [10]:

- процесс является установившимся;
- осредненная скорость движения жидкости постоянна по времени и по сечению;
- среда не реагентоспособна;
- не учитывается отскок частиц от стенок гидроциклона;
- не учитывается тепловая (броуновская) коагуляция частиц в гидроциклоне;
- не учитывается влияние турбулентных пульсаций скорости на движение частицы.

Основная часть

Рассмотрим случай, когда две коагулирующие частицы имеют следующие координаты: первая частица — $(R_1; \theta_1; Z_1)$, вторая — $(R_2; \theta_2; Z_2)$, причем $R_1 \neq R_2$, $\theta_1 \neq \theta_2$, $Z_1 \neq Z_2$ (рис. 2 а).

Расстояние между двумя коагулирующими частицами в цилиндрической системе координат выразим из теоремы косинусов:

$$S = \sqrt{s^2 + z^2}; \quad z = Z_2 - Z_1; \quad (1)$$

$$s^2 = R_1^2 + R_2^2 - 2 \cdot R_1 \cdot R_2 \cdot \cos(\theta_1 - \theta_2).$$

Разложим F_F на тангенциальную, радиальную и аксиальную составляющие (рис. 2 б, в):

$$\begin{aligned} F'_{F1} &= -F_F \cdot \cos \alpha_1; & F'_{F2} &= -F_F \cdot \sin \alpha_2; \\ F_{FR1} &= -F'_{F1} \cdot \cos \varphi_1; & F_{FR2} &= -F'_{F2} \cdot \cos \varphi_2; \\ F_{F\theta1} &= F'_{F1} \cdot \sin \varphi_1; & F_{F\theta2} &= -F'_{F2} \cdot \sin \varphi_2; \\ F_{FZ1} &= F_F \cdot \sin \alpha_1; & F_{FZ2} &= F_F \cdot \cos \alpha_2. \end{aligned} \quad (2)$$

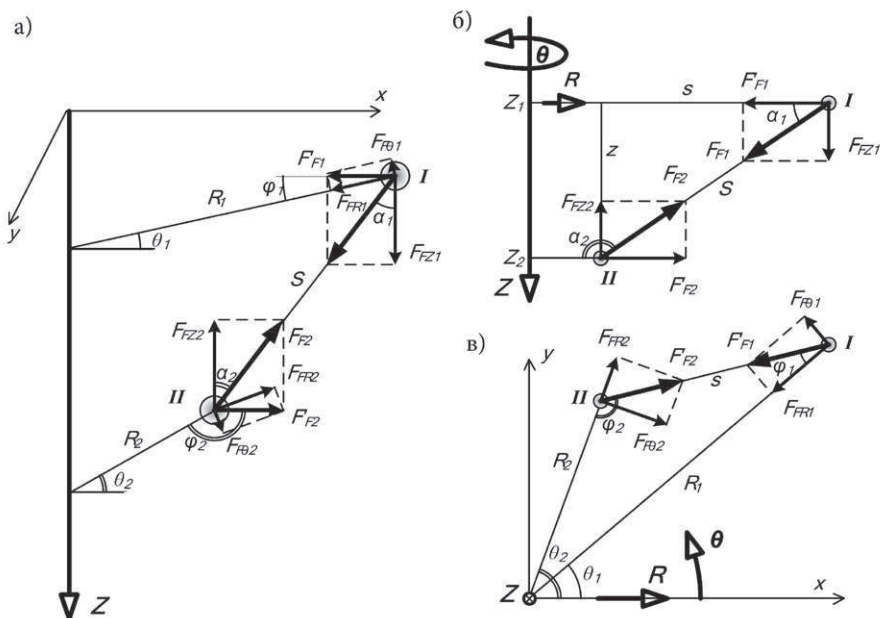


Рис. 2. Коагуляция частиц в рабочей камере магнитного гидроциклона (а), проекции по осям (б), (в)

Значения $\cos \varphi_1$ и $\cos \varphi_2$ могут быть выражены из теоремы косинусов, значения $\cos \alpha_1$, $\cos \alpha_2$ — из теоремы Пифагора:

$$\begin{aligned}\sin \alpha_1 &= \cos \alpha_2 = \frac{z}{S}; \quad \cos \alpha_1 = \sin \alpha_2 = \frac{s}{S}; \\ \cos \varphi_1 &= \frac{R_2 - R_1 \cdot \cos(\theta_1 - \theta_2)}{s}; \quad \sin \varphi_1 = \frac{R_1 \cdot \sin(\theta_1 - \theta_2)}{s}; \\ \cos \varphi_2 &= \frac{R_1 - R_2 \cdot \cos(\theta_1 - \theta_2)}{s}; \quad \sin \varphi_2 = \frac{R_2 \cdot \sin(\theta_1 - \theta_2)}{s}.\end{aligned}\quad (3)$$

Сила коагуляции для шарообразных частиц может быть представлена в следующем виде [2]:

$$F_F = \frac{\pi^3 \cdot \mu_0 \cdot d_1^2 \cdot d_2^2 \cdot H_1 \cdot H_2 \cdot \alpha_1 \cdot \alpha_2}{9S^2}, \quad (4)$$

где μ_0 — магнитная постоянная, $4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м; H_1, H_2 — напряженности магнитного поля для каждой частицы соответственно, А/м; d_1, d_2 — диаметры сферических частиц, м; α_1, α_2 — магнитные восприимчивости, о. е.

Для расчета магнитной силы и определения напряженности поля в конкретной точке магнитного гидроциклона воспользуемся регрессионной моделью распределения поля по радиусу и высоте [11]:

$$H(R, Z) = \left[H_A + (H_0 - H_A) \cdot e^{-\frac{Z \cdot n_z}{h_c}} \right] \cdot \left(\frac{D_0}{2 \cdot R} \right)^{n_R},$$

где H_0, H_A — напряженность поля в верхней и нижней точке рабочей камере гидроциклона соответственно, А/м; h_c — высота цилиндрической части гидроциклона, м; D_0 — диаметр выходного патрубка, м; n_z, n_R — поправочные коэффициенты, служащие для более точного воспроизведения напряженности поля в рабочей камере аппарата, о. е.

Подставив значения радиальной, тангенциальной и аксиальной составляющих силы коагуляции (1) – (4) в уравнения движения частиц [9], получим математическую модель процесса коагуляции частиц в гидроциклоне с радиальным магнитным полем в цилиндрической системе координат:

$$\begin{aligned}\frac{d^2 R_1}{dt^2} &= R_1 \cdot \left(\frac{d\theta_1}{dt} \right) - A_1 \cdot \frac{dR_1}{dt} - B_1 \cdot H_1 \cdot dH_{R1} + E_1 \cdot \frac{H_1 \cdot H_2 \cdot \cos \alpha_1 \cdot \cos \varphi_1}{S^2}; \\ \frac{d^2 \theta_1}{dt^2} &= -\frac{2}{R_1} \frac{d\theta_1}{dt} \cdot \frac{dR_1}{dt} + A_1 \cdot \left(U_\theta - R_1 \cdot \frac{d\theta_1}{dt} \right) - E_1 \cdot \frac{H_1 \cdot H_2 \cdot \cos \alpha_1 \cdot \sin \varphi_1}{S^2}; \\ \frac{d^2 Z_1}{dt^2} &= g + A_1 \cdot \left(U_z - \frac{dZ_1}{dt} \right) - B_1 \cdot H_1 \cdot dH_{Z1} + E_1 \cdot \frac{H_1 \cdot H_2 \cdot \sin \alpha_1}{R^2}; \\ \frac{d^2 R_2}{dt^2} &= R_2 \cdot \left(\frac{d\theta_2}{dt} \right) - A_2 \cdot \frac{dR_2}{dt} - B_2 \cdot H_2 \cdot dH_{R2} + E_2 \cdot \frac{H_1 \cdot H_2 \cdot \sin \alpha_2 \cdot \cos \varphi_2}{S^2}; \\ \frac{d^2 \theta_2}{dt^2} &= -\frac{2}{R_2} \frac{d\theta_2}{dt} \cdot \frac{dR_2}{dt} + A_2 \cdot \left(U_\theta - R_2 \cdot \frac{d\theta_2}{dt} \right) + E_1 \cdot \frac{H_1 \cdot H_2 \cdot \sin \alpha_2 \cdot \sin \varphi_2}{S^2}; \\ \frac{d^2 Z_2}{dt^2} &= g + A_2 \cdot \left(U_z - \frac{dZ_2}{dt} \right) - B_2 \cdot H_2 \cdot dH_{Z2} + E_2 \cdot \frac{H_1 \cdot H_2 \cdot \cos \alpha_2}{S^2}; \\ A_i &= \frac{18\mu\varphi_{wi}^2}{d_i^2 \cdot C_K \cdot (\rho_i - 0,5\rho_f)}; \quad B_i = \frac{\mu_0 \cdot \alpha_i}{(\rho_i - 0,5\rho_f)}; \\ E_1 &= \frac{2}{3} \cdot \frac{\pi^2 \cdot \mu_0 \cdot d_2^2 \cdot \alpha_1 \cdot \alpha_2}{d_1 \cdot \rho_1}; \quad E_2 = \frac{2}{3} \cdot \frac{\pi^2 \cdot \mu_0 \cdot d_1^2 \cdot \alpha_1 \cdot \alpha_2}{d_2 \cdot \rho_2}; \\ H_i &= \left[H_A + (H_0 - H_A) \cdot e^{-\frac{Z_i \cdot n_z}{h_c}} \right] \cdot \left(\frac{D_0}{2 \cdot R_i} \right)^{n_R}.\end{aligned}\quad (5)$$

$$dH_{Ri} = \frac{\partial H_i}{\partial R} = - \left[H_A + (H_0 - H_A) \cdot e^{-\frac{Z_i n_Z}{h_C}} \right] \cdot \left(\frac{D_0}{2} \right)^{n_R} \cdot \frac{n_R}{R_i^{n_R+1}};$$

$$dH_{Zi} = \frac{\partial H_i}{\partial Z} = - \frac{n_Z}{h_C} \cdot (H_0 - H_A) \cdot e^{-\frac{Z_i n_Z}{h_C}} \cdot \left(\frac{D_0}{2 \cdot R_i} \right)^{n_R};$$

$$S = \sqrt{R_1^2 + R_2^2 - 2 \cdot R_1 \cdot R_2 \cdot \cos(\theta_1 - \theta_2) + (Z_2 - Z_1)^2},$$

где μ — коэффициент кинематической вязкости, $\text{м}^2/\text{с}$; φ_W — коэффициент несферичности частицы, о. е.; C_K — коэффициент коррекции Коннингема, о. е.; ρ_i, ρ_f — плотность частиц и вязкой среды соответственно, $\text{кг}/\text{м}^3$; i — индекс частицы; U_θ, U_Z — соответственно тангенциальная и аксиальная скорость движения жидкости, $\text{м}/\text{с}$; g — ускорение свободного падения, $9,81 \text{ м}/\text{с}^2$; dH_{Ri}, dH_{Zi} — частные производные напряженности поля [6], соответственно, по осям R и Z , $\text{А}/\text{м}^2$.

Система уравнений (5) решалась численным методом с помощью MathCAD 2001 для частных случаев (рис. 3): частицы — железо; $d_1 = d_2 = 50 \text{ мкм}$; среда — масло; $H_0 = 4 \cdot 10^4 \text{ А}/\text{м}$; $U_R = 0 \text{ м}/\text{с}$; $U_\theta = 2 \text{ м}/\text{с}$; $U_Z = 0,5 \text{ м}/\text{с}$; $D_0 = 0,05 \text{ м}$; $D = 0,1 \text{ м}$; $h_C = 0,2 \text{ м}$.

Начальные условия: $R_{10} = 0,036 \text{ м}$; $R_{20} = 0,033 \text{ м}$; $\theta_{10} = 1,8 \text{ рад}$; $\theta_{20} = 1,75 \text{ рад}$; $Z_1 = 0 \text{ м}$; $Z_2 = 0,002 \text{ м}$; $v_{R10} = v_{R20} = 0 \text{ м}/\text{с}$; $v_{\theta 10} = v_{\theta 20} = 2 \text{ м}/\text{с}$; $v_{Z10} = v_{Z20} = 0,5 \text{ м}/\text{с}$.

Граничными условиями является момент соударения частиц, т. е. процесс протекает до тех пор, пока удовлетворяется условие ρ_i, ρ_f .

Следует отметить, что на рис. 3 приведены абсолютные разности между координатами:

$$\Delta R = R_1 - R_2; \Delta \theta = \theta_1 - \theta_2; \Delta Z = Z_2 - Z_1.$$

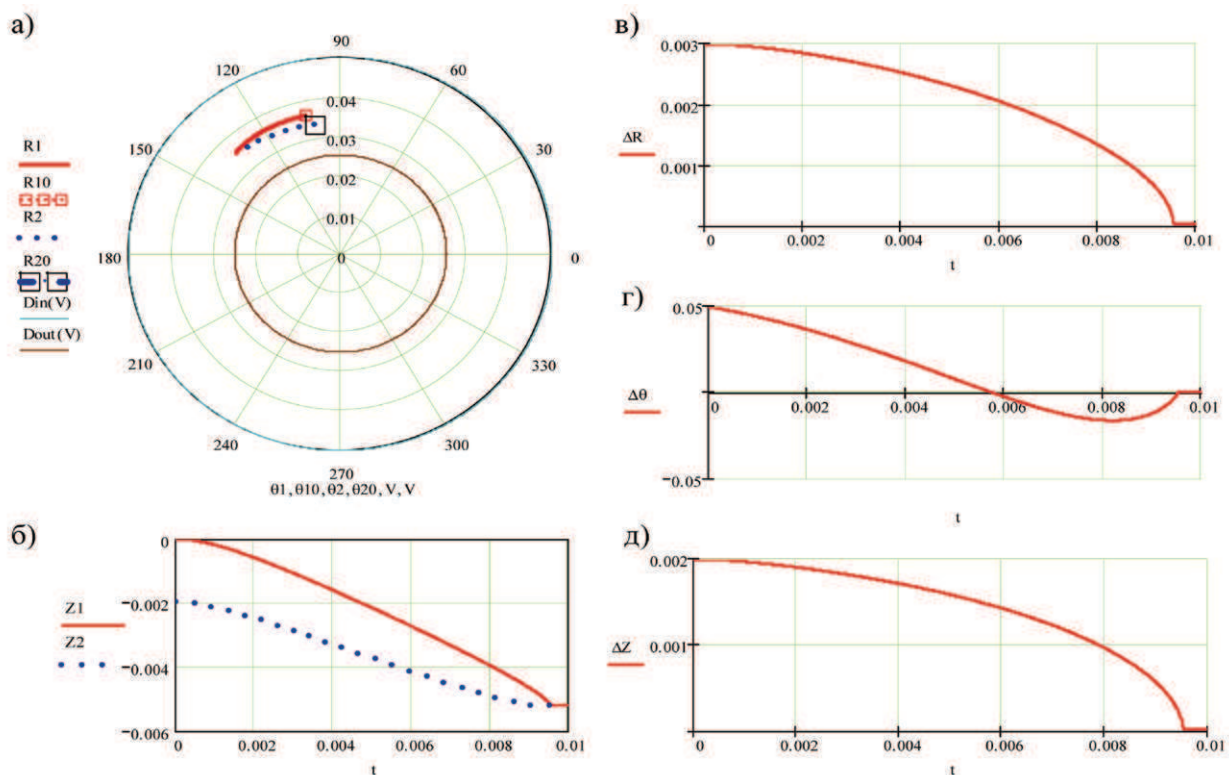


Рис. 3. Результаты численного исследования математической модели процесса коагуляции двух частиц в рабочей камере гидроциклона (а, б) и разницы между радиальными (в), тангенциальными (г) и аксиальными (д) составляющими

Выводы

1. Составлена математическая модель, описывающая коагуляции двух частиц в рабочей камере гидроциклона с радиальным магнитным полем в цилиндрической системе координат на основании подхода Лагранжа.
2. Данная математическая модель была решена численным методом при заданных условиях.
3. Магнитное поле способствует процессу флокулообразования, что, в свою очередь, увеличивает центробежную силу в гидроциклоне, вследствие чего степень очистки возрастает.

Список литературы

1. *Возницкий И. В.* Судовые двигатели внутреннего сгорания: в 2 т. / И. В. Возницкий. — Т. 2. — М.: Моркнига, 2008. — 282 с.
2. *Александров Е. Е.* [и др.]. Повышение ресурса технических систем путем использования электрических и магнитных полей: монография / Е. Е. Александров, И. А. Кравец, Е. Н. Лысиков [и др.]. — Харьков: НТУ «ХПИ», 2006. — 544 с.
3. Судовой механик: справочник / под ред. А. А. Фока. — Т. 2. — Одесса: Феникс, 2010. — 1032 с.
4. *Масюткин Е. П.* Очистка технических жидкостей от магнитных примесей в инфраструктуре водного транспорта / Е. П. Масюткин, В. И. Просвирнин, Б. А. Авдеев // Рыбное хозяйство Украины. — Керчь: КГМТУ, 2012. — № 3 (80). — С. 40–49.
5. *Svarovsky L.* Solid-Liquid Separation / L. Svarovsky. — Oxford: Butterworth-Heinemann, 2000. — 569 p.
6. *Zhang L.* CFD numerical simulation of Archimedes spiral inlet hydrocyclone / L. Zhang, L. Wei, B. H. Chang, et al. // 6th International Conference on Pumps and Fans with Compressors and Wind Turbines. — 2013. — P. 111–117.
7. *Capela Moraes C. A.* Turbulence Modelling in Hydrocyclone Flow / C. A. Capela Moraes, A. P. Silva Freire // Proceedings of the 10th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering. — ENCIT. — 2004. — P. 20–42.
8. *Зиганшин М. Г.* Расчетные параметры осаждения взвеси в аппаратах с вращательным движением мультифазных потоков. — Ч. 1. — Современные методы моделирования / М. Г. Зиганшин, А. М. Зиганшин, Р. М. Гильфанов // Изв. КазГАСУ. — 2010. — № 1 (13). — С. 186–192.
9. *Авдеев Б. А.* Численное решение задачи о коагуляции двух частиц в потоке текучей среды в полярных координатах / Б. А. Авдеев, Е. П. Масюткин, В. И. Просвирнин // Изв. вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. — Новочеркасск, 2014. — № 4 (179). — С. 13–17.
10. *Авдеев Б. А.* Модель движения частиц в магнитном гидроциклоне / Б. А. Авдеев // Технический аудит и резервы производства. — 2013. — № 5/1 (13). — С. 36–41.
11. *Просвирнин В. И.* Модель распределения радиального магнитного поля в гидроциклоне / В. И. Просвирнин, С. П. Голиков, Б. А. Авдеев // Вестник Херсонского национального технического университета. — Херсон: ХНТУ. — 2013. — № 1 (46). — С. 300–304.