

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И МАШИННО-ДВИЖИТЕЛЬНЫЕ КОМПЛЕКСЫ

DOI: 10.24143/2073-1574-2019-1-34-45
УДК 621.43.013:629.3

СТОХАСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА РАЗДЕЛЕНИЯ СЛОЖНЫХ ГЕТЕРОГЕННЫХ ДИСПЕРСНЫХ СИСТЕМ В ЦЕНТРИФУГАХ С РАДИАЛЬНО-ОСЕВЫМ ПОТОКОМ

Л. А. Семенюк, Г. П. Кича, А. В. Надежкин

*Морской государственный университет им. адмирала Г. И. Невельского,
Владивосток, Российская Федерация*

Рассмотрены процессы разделения в аппаратах со сложной гидродинамической обстановкой. Новизна подхода при их теоретическом исследовании заключается не только в учёте действия центробежного поля и поля случайных сил, как это было реализовано ранее для простейших конструкций, но и в подробном рассмотрении радиальных и осевых потоков. Перемещение частиц исследуется в стесненных условиях осаждения при взаимодействии их друг с другом. Идентифицированы процессы разделения в центробежных аппаратах разного типа с учётом стохастичности, стесненного движения совокупности реальных частиц и возможности их диспергирования и коагуляции. Совокупное детерминированное и стохастическое воздействие на дисперсную фазу в центробежном поле описано посредством дифференциального уравнения, решение которого даёт возможность рассчитать с большой точностью фракционную и общую эффективность центрифугирования. Разработан и реализован полуаналитический метод приближенного решения нестационарных краевых задач центрифугирования для одно- и двумерных стохастических моделей. По сравнению с разностными схемами, метод Фаэдо – Галёркина приводит к решению систем уравнений с меньшим числом неизвестных, заданных во всех значениях аргументов. Использование метода возможно только в случае однородных краевых условий и ограничено возможностью подбора полной системы функций, удовлетворяющих им. Предлагаемый подход к идентификации очистки горюче-смазочных материалов предпочтителен, поскольку довольно полно отражает сущность происходящих в центрифугах с радиально-осевым потоком процессов. Обобщение стохастических воздействий на центрифугирование с учётом гидродинамических особенностей движения потоков разделяемых сред в центробежном поле позволяет расчётным путём, без модельных экспериментов определять все показатели очистки топлив и масел от механических примесей, прогнозировать общую и фракционную эффективность топливо- и маслоочистителей двигателей внутреннего сгорания. Разработанный метод идентификации разделения сложных дисперсных систем нацелен на синтез систем и аппаратов маслоочистки и топливоподготовки повышенной эффективности с заданными параметрами качества очистки в эксплуатационных условиях.

Ключевые слова: стохастическая модель центрифугирования, марковские процессы, разделение гетерогенных систем, гидродинамика центробежных аппаратов, эффективность топливо- и маслоочистителей, коэффициенты отсева.

Для цитирования: Семенюк Л. А., Кича Г. П., Надежкин А. В. Стохастическая модель процесса разделения сложных гетерогенных дисперсных систем в центрифугах с радиально-осевым потоком // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2019. № 1. С. 34–45. DOI: 10.24143/2073-1574-2019-1-34-45.

Введение

Процесс разделения в центробежных очистителях (ЦО) с радиально-осевым сливом усложнён наличием радиальной скорости потока. Кроме того, в этих аппаратах из-за путевого отбора фугата осевая скорость потока зависит от координаты в направлении оси ротора.

Ряд центрифуг имеет очень сложную гидродинамическую обстановку, обусловленную особенностями подвода и отвода жидкости в ротор [1, 2], конструкцией питающих каналов, наличием свободной поверхности центрифугируемой жидкости [3]. Гидродинамика таких объектов изучена недостаточно полно. Учёт её специфики в расчёте процесса разделения, особенно в условиях стохастичности, должного развития не получил. С позиций оценки эффективности центрифугирования ЦО указанного типа не исследованы. Весьма трудна для них идентификация осаждения при изменении агрегатного состояния дисперсной фазы (ДФ) [4].

Новый подход к идентификации процесса центрифугирования горюче-смазочных материалов (ГСМ) заключается в комплексном учёте полидисперсности и многофазности загрязнителя, взаимодействия частиц ДФ, стохастичности разделения и сложной гидродинамики потоков в аппаратах очистки. Разработка теории разделения сложных дисперсионных сред (ДС) в центробежном поле с исследованием специфики твёрдой фазы и гидродинамической обстановки в ЦО главным образом нацелена на адекватную оценку эффективности центрифугирования нефтепродуктов в системах топливоподготовки и маслоочистки дизелей при очистке их от вредных нерастворимых примесей.

Особенностью подхода является использование дифференциального уравнения движения частицы в радиальном и осевом направлениях в поле действия центробежных сил инерции [5]. Уравнение, описывающее детерминированное воздействие на ДФ, дополняется членом, учитывающим стохастичность процесса разделения.

Постановка и решение многомерных задач центрифугирования в аппаратах со сложной гидродинамикой

Случайная составляющая скорости может быть вызвана турбулентными пульсациями, стесненностью движения ДФ, ограниченностью пространства, приводящими к флуктуации. Стохастичность обусловлена также объединением частиц при столкновениях и разрушением вторичных образований вследствие действия гидродинамических факторов [4].

Ранее [6] было доказано, что случайное воздействие на ДС в центробежном поле является дельта-коррелированной функцией времени с неравным средним значением и заданной интенсивности. Центрифугирование можно считать простым марковским процессом и выражать его эффективность через многомерную плотность вероятности. Перечисленные представления позволяют учитывать при оценке качества очистки ГСМ совместные действия на осаждение частиц в центробежном поле детерминированных и случайных факторов.

Особенностью очистителей с комбинированным радиально-осевым сливом (рис. 1), которые нашли широкое применение на судах, является наличие напорного осевого потока Q_z и безнапорного радиального слива Q_r (первый, как правило, представляет собой фугат, поступающий потребителю; второй – поток, идущий на гидрореактивный привод ротора при истечении через сопла).

Возможны и другие схемы реализации Q_z и Q_r в системах топливоподготовки и маслоочистки на судах [7].

Переносная скорость движения частиц в роторе центрифуги по z и r принята равной скорости жидкости в этом же направлении. Скорость потока центрифугируемой жидкости v_z и v_r , если считать её идеальной, можно определить решением уравнения Лапласа для потенциала скорости ψ [8]:

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \psi}{\partial r} \right)_r + r \frac{d^2 \psi}{dz^2} = 0. \quad (1)$$

Приняв осевую скорость v_z на входе в центрифугу равной $Q_{\text{ц}} / \pi (R_{\text{ц}}^2 - r_0^2)$ и радиальную v_{r0} на радиусе $r_0 - Q_{\text{ц}} / 2\pi r_0 H_{\text{ц}}$, получим решение уравнения (1) в виде

$$\psi = \frac{Q_{\text{ц}} z}{\pi (R_{\text{ц}}^2 - r_0^2)} + \frac{Q_r (r^2 - 2z - 2R_{\text{ц}}^2 \ln r)}{4\pi H_{\text{ц}} (R_{\text{ц}}^2 - r_0^2)}. \quad (2)$$

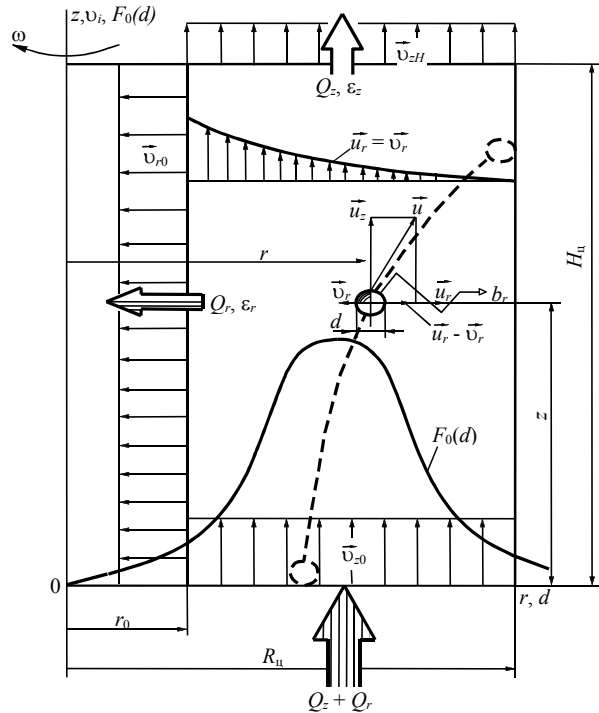


Рис. 1. Расчётная схема центрифуги с комбинированным сливом:

ω – угловая скорость вращения ротора, м/с; $v_{(r,z)}$ – осевая и радиальная скорости движения потока в роторе, м/с;
 $u_{(r,z)}$ – скорость движения частицы в координатах r и z , м/с; ε – коэффициент выноса частиц из ротора;
 b_r – интенсивность случайного воздействия на частицу в направлении координаты r , Дж/(кг·с);
 $F_0(d)$ – дифференциальная функция распределения массы частиц по диаметру, мкм⁻¹;
 $R_{ц}$ – радиус ротора, м; z, r – координаты положения частиц в роторе, м; $H_{ц}$ – высота ротора, м

Вследствие путевого радиального отбора жидкости по высоте центрифуги выражение для осевой и радиальной скорости потоков внутри ротора, согласно (1), имеет вид [6]:

$$v_z = \frac{Q_z + Q_r \left(1 - \frac{z}{H_{ц}}\right)}{\pi(R_{ц}^2 - r_0^2)}; \quad v_r = \frac{Q_z \left(r - \frac{R_{ц}^2}{r}\right)}{2\pi H_{ц}(R_{ц}^2 - r_0^2)}.$$

Если пренебречь изменением осевой скорости потока по высоте ротора и принять её равной $v_z = \frac{2Q_z + Q_r}{2\pi(R_{ц}^2 - r_0^2)}$, то уравнение, описывающее воздействия внешних сил на радиальное пе-

ремещение по радиусу r частицы диаметром d в центробежном поле с частотой вращения ω , преобразуется следующим образом:

$$\frac{dr}{d\tau} = \frac{d^2 \rho_{эф} \omega^2 r}{18k_{\psi} k_c \mu_m} + \frac{Q_r \left(r - \frac{R_{ц}^2}{r}\right)}{2\pi H_{ц}(R_{ц}^2 - r_0^2)} - \frac{\xi(\tau)}{3\pi k_{\psi} k_c \mu_m d^3} \quad (3)$$

где $\xi(\tau)$ – совокупность случайных воздействий на ДС; μ_m – вязкость центрифугируемой жидкости, Па·с; $\rho_{эф} = \rho_d - \rho$ – эффективная плотность частиц, кг/м³; k_{ψ}, k_c – коэффициенты, учитывающие отклонения размера частицы от стохастивного диаметра (учитывает влияние формы частиц и их концентрацию) [5]; τ – время процесса, с.

Для рассматриваемой конструкции очистителя концентрация частиц $W(r, d, \tau)$ может быть определена решением дифференциального уравнения

$$\frac{\partial W}{\partial \tau} = -\frac{\partial [(\alpha_{rd}r - \gamma_r)W]}{\partial r} + \frac{b_r}{2} \frac{\partial^2 W}{\partial r^2} \quad (4)$$

с соответствующими выражению (3) коэффициентами

$$\gamma_r = \frac{Q_r R_{ц}^2}{2\pi H_{ц} (R_{ц}^2 - r_0^2)},$$

$$\alpha_{rd} = \alpha_r + \alpha_d = \frac{Q_r}{2\pi H_{ц} (R_{ц}^2 - r_0^2)} + \frac{\rho_{эф} \omega^2 d^2}{18k_{\psi} k_c \mu_m}.$$

Граничные условия, указывающие на отсутствие перемещения частиц вдоль радиуса при достижении ими стенки аппарата ($r = R_{ц}$), а также зоны противотока ($r = r_0$) и определяющие унос частиц из центрифугируемой жидкости и с радиальным сливом соответственно, могут быть записаны в виде

$$W(r_0, \tau) = W(R_{ц}, \tau) = 0.$$

За начальное при $\tau = 0$ принимали условие:

$$W(r, 0) = W_0(\tau) = \frac{2r}{R_{ц}^2 - r_0^2},$$

характеризующее равномерное распределение частиц одного диаметра по площади поперечного сечения ротора.

После введения безразмерных переменных $\bar{\tau} = \frac{b_r \tau}{2(R_{ц} - r_0)^2}$, $\bar{r} = \frac{r - r_0}{R_{ц} - r_0}$ дифференциальное

уравнение (4), граничные и начальные условия имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial W}{\partial \bar{\tau}} &= -\frac{\partial [a(\bar{r})W]}{\partial \bar{r}} + \frac{\partial^2 W}{\partial \bar{\tau}^2}; \\ W|_{\bar{r}=0} &= W|_{\bar{r}=1} = 0; \quad W|_{\bar{\tau}=0} = \frac{2[(R_{ц} - r_0)\bar{r} + r_0]}{R_{ц}^2 + r_0^2}, \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где $a(\bar{r}) = \frac{2(R_{ц} - r_0)}{b_r} \left\{ \alpha_{rd} [(R_{ц} - r_0)\bar{r} + r_0] - \frac{\gamma_r}{(R_{ц} - r_0)\bar{r} + r_0} \right\}$.

Решение системы (5) искали по методу Фаэдо – Галёркина [9, 10] по следующему алгоритму:

- находятся собственные функции дифференциального оператора, соответствующего переменной d ;
- для заданных переменных определяются собственные функции дифференциального оператора и по ним составляется набор задач Штурма – Лиувилля;
- после решения трансцендентного уравнения находятся собственные числа и по каждому из них записываются соответствующие функции;
- решается система обыкновенных дифференциальных уравнений для определения $C_d(\tau)$ и фиксируется приближенное решение для вычисления плотности вероятности;
- исходя из граничных условий составляются интегральные выражения для расчёта эффективности центрифугирования.

$$W_n = \sum_{k=1}^n C_k(\tau) \psi_k(\bar{r}), \quad (6)$$

где $\psi_k(\bar{r})$ – ортонормированные собственные функции (2) задачи:

$$\psi'' = \lambda \psi; \quad \psi|_{\bar{r}=0} = \psi|_{\bar{r}=1} = 0. \quad (7)$$

Коэффициенты $C_k(\bar{\tau})$ определялись из соотношения:

$$\int_0^1 \left[\frac{\partial W_n}{\partial \bar{\tau}} - \frac{\partial^2 W}{\partial \bar{r}^2} + \frac{\partial [a(\bar{r})W_n]}{\partial \bar{r}} \right] \psi_k(\bar{r}) d\bar{r} = 0 \quad (k = 1, 2, 3, \dots, n). \quad (8)$$

Решение задачи (7) представлено в виде

$$\psi_k(\bar{r}) = \sqrt{2} \sin k\pi\bar{r}, \quad \lambda_k = -(k\pi)^2.$$

Подставляя найденные $\psi_k(\bar{r})$ в (6) и (7), получили систему линейных обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка с постоянными коэффициентами, которую использовали для определения $C_k(\bar{\tau})$:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dC_k}{d\bar{\tau}} &= -(k\pi)^2 C_k - \sum_{i=1}^n C_i \int_0^1 a(\bar{r}) \psi_i(\bar{r})' \psi_k(\bar{r}) d\bar{r}; \\ C_k(0) &= C_{0k} = \int_0^1 \frac{2}{R_u^2 + r_0^2} [\bar{r}(R_u + r_0) + r_0] \psi_k(\bar{r}) d\bar{r} = \\ &= \frac{2\sqrt{2} [R_u(-1)^{k+1} + r_0]}{k\pi(R_u^2 + r_0^2)} \quad (k = 1, 2, 3, \dots, n). \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Интегрируя входящее в (9) выражение

$$I_{ik} = -2 \int_0^1 (a(\bar{r}) \sin k\pi\bar{r})' \sin i\pi\bar{r} d\bar{r}$$

по частям, получили:

$$I_{ik} = 2k\pi \int_0^1 a(\bar{r}) \sin i\pi\bar{r} \cos k\pi\bar{r} d\bar{r} = k\pi \int_0^1 a(\bar{r}) [\sin(i+k)\pi\bar{r} + \sin(i-k)\pi\bar{r}] d\bar{r}.$$

Для вычисления I_{ik} применили одну из квадратурных формул [11, 12].

Задача (9) в матричной форме записывается в виде

$$\frac{\partial \mathbf{C}}{\partial \bar{\tau}} = \mathbf{A}_n \mathbf{C}; \quad \mathbf{C}(0) = \mathbf{C}_0,$$

где $\mathbf{C} = (C_1(\bar{\tau}), C_2(\bar{\tau}), \dots, C_n(\bar{\tau}))$; $\mathbf{C}_0 = (C_{01}, C_{02}, \dots, C_{0n})$;

$$\mathbf{A}_n = \{a_{ij}\}_{i,j=1}^n; \quad a_{ii} = -(i\pi)^2 + I_{ii}; \quad a_{ij} = I_{ij}.$$

Окончательно приближенное решение задачи (6) приняло вид:

$$W_n^{(l)} = \sum_{i=1}^n \left(\sum_{k=0}^l A_n^k C_0 \frac{\bar{\tau}^k}{k!} \right)_i \sqrt{2} \sin i\pi\bar{r}. \quad (10)$$

Относительная концентрация частиц диаметра d в поперечном сечении ротора центрифуги в момент $\bar{\tau}$ составила:

$$C_d(\bar{\tau}) = \sum_{i=1}^n \left(\sum_{k=0}^l A_n^k C_0 \frac{\bar{\tau}^k}{k!} \right) \frac{\sqrt{2}}{i\pi} [(-1)^{k+1} + 1]. \quad (11)$$

По физическому смыслу $C_d(\bar{\tau})$ эквивалентно коэффициенту пропускания ε_{dz} в направлении оси z , т. е. характеризует относительное количество частиц, уходящих с потоком Q_z . Доля их, уносимая потоком Q_r , находится, согласно (5), как поток вероятности через внутреннюю обечайку ротора:

$$\bar{\varepsilon}_{dr} = \int_0^{\bar{r}} \left(-a(\bar{r})W + \frac{\partial W}{\partial \bar{r}} \right)_{\bar{r}=0} d\bar{r}. \quad (12)$$

Аналогично рассчитываем поток частиц через наружную обечайку ротора, определяющий полный фракционный коэффициент отсева центрифуги:

$$\varphi_{d\text{и}} = \int_0^{\bar{r}} \left(-a(\bar{r})W + \frac{\partial W}{\partial \bar{r}} \right)_{\bar{r}=1} d\bar{r}. \quad (13)$$

Переход к локальным задерживающим характеристикам центрифуги можно осуществить через безразмерные потоки очищаемости жидкости $\bar{Q}_z = Q_z / (Q_z + Q_r)$ и $\bar{Q}_r = Q_r / (Q_z + Q_r)$:

$$\varphi_{dz} = 1 - \frac{\bar{\varepsilon}_{dz}}{\bar{Q}_z} = 1 - \frac{Q_z + Q_r}{Q_z} \varepsilon_{dz}; \quad (14)$$

$$\varphi_{dr} = 1 - \frac{\bar{\varepsilon}_{dr}}{\bar{Q}_r} = 1 - \frac{Q_z + Q_r}{Q_r} \varepsilon_{dr}, \quad (15)$$

где φ_{dz} и φ_{dr} – фракционные коэффициенты отсева для потоков Q_z и Q_r – отображают качество очистки жидкости в напорном и свободном сливах.

Полный и локальные коэффициенты отсева связаны посредством относительных показателей эффективности очистки $\bar{\varphi}_{dz}$ и $\bar{\varphi}_{dr}$:

$$\varphi_{d\text{и}} = \bar{\varphi}_{dz} + \bar{\varphi}_{dr} = \bar{Q}_z \varphi_{dz} + \bar{Q}_r \varphi_{dr}. \quad (16)$$

Если состав загрязнителя на входе в ЦО задан дифференциальной функцией распределения $F(d)$, то полноту отсева $\varphi_{\text{и}}$ можно получить на основе (16) интегрированием выражения [6]

$$\varphi_{\text{и}} = \int_{d_{\text{мин}}}^{d_{\text{макс}}} \varphi_{d\text{и}} F(d), \quad (17)$$

где $F(d)$ – задаваемая дифференциальная функция распределения размера частиц по d .

Интенсивность случайных воздействий b_{0r} , Дж/(кг·с), является квазидиффузионным параметром и отвечает за подвижность частиц в роторе центрифуги. По своему физическому смыслу она может быть интерпретирована как количество энергии, передаваемое в единицу времени ДФ массой в 1 кг в результате взаимного столкновения частиц при стесненном их движении.

Степень подвижности частиц в различных аппаратах неодинакова и зависит от конструктивных особенностей очистителя, его расходной характеристики и общей концентрации твёрдой фазы в суспензии C на входе в очиститель [13, 14]. Стохастичность процесса центрифугирования предлагается учитывать по выражению¹, найденному методом множественной корреляции:

$$b_0 = 6,5 \cdot 10^{-16} \left(\frac{r_0}{H_{\text{и}}} \right)^{0,52} \left(\frac{R_{\text{и}}}{H_{\text{и}}} \right)^{0,65} \left(\frac{Q_z}{Q_z + Q_r} \right)^{0,84} c^{0,37}. \quad (18)$$

Анализ (18) доказывает рациональность конструкций с радиально-осевым сливом для управления фракционной задерживающей характеристикой очистителя. Увеличение радиального слива способствует уменьшению подвижности и флуктуации скорости частиц в радиальном направлении, что выгодно для полнопоточных центрифуг, когда необходимо понизить полноту отсева ГСМ от общих загрязнений при полном удалении опасных частиц механических примесей. Продолжительность работы ЦО между чистками ротора в таком случае повышается.

Расчётно-экспериментальная оценка эффективности центрифуги с радиально-осевым потоком

Возможности разработанной модели (5) проверены на очистителе МЦН-5П (КС) с комбинированным сливом. Из графических зависимостей (рис. 2²) видно, что фракционные коэффици-

¹ В зависимости для b_{0r} концентрация c задана в % масс.

² На рис. 2 фракционные характеристики уноса и отсева для удобства суммирования показателей центрифугирования смещены.

енты пропускания $\bar{\varepsilon}_{dz}$ и $\bar{\varepsilon}_{dr}$ для мелких частиц и коэффициенты отсева $\bar{\varphi}_{dz}$, $\bar{\varphi}_{dr}$ для $d \geq 30$ мкм определяются в основном соотношением потоков Q_z и Q_r .

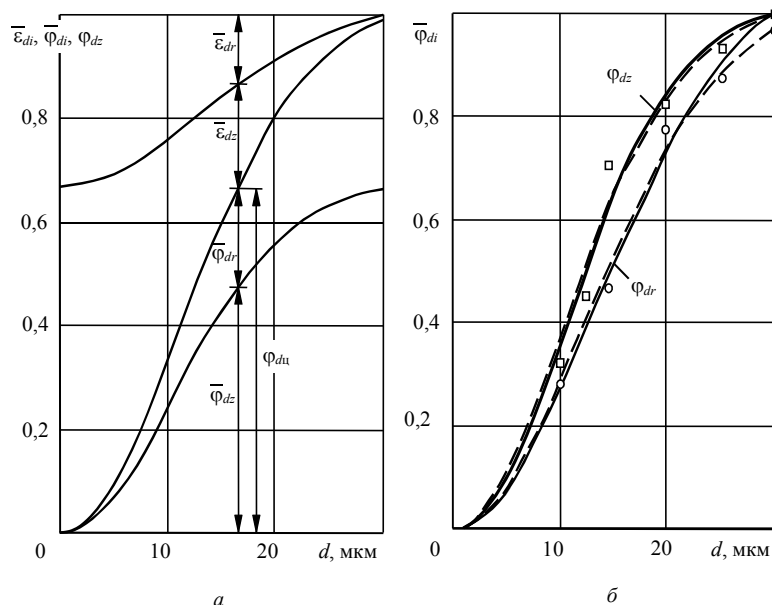


Рис. 2. Общая (а) и локальная (б) фракционная эффективность центрифуги с комбинированным сливом: $Q_z = 0,67 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$; $Q_r = 0,33 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$; $V_p = 1\,560 \text{ см}^3$; $\omega = 760 \text{ рад/с}$; $H_{II} = 152 \text{ мм}$; $r_0 = 18 \text{ мм}$; $R_{II} = 60 \text{ мм}$; $b_0 = 2,5 \cdot 10^{-13} \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{с})$; $\mu = 0,03 \text{ Па} \cdot \text{с}$; $\rho_d = 2\,500 \text{ кг}/\text{м}^3$; $\rho = 870 \text{ кг}/\text{м}^3$;
— расчётные данные; - - - экспериментальные результаты

Адекватность расчётной модели (5) и соответствие её экспериментальным данным проверены по локальным фракционным коэффициентам отсева (рис. 3).

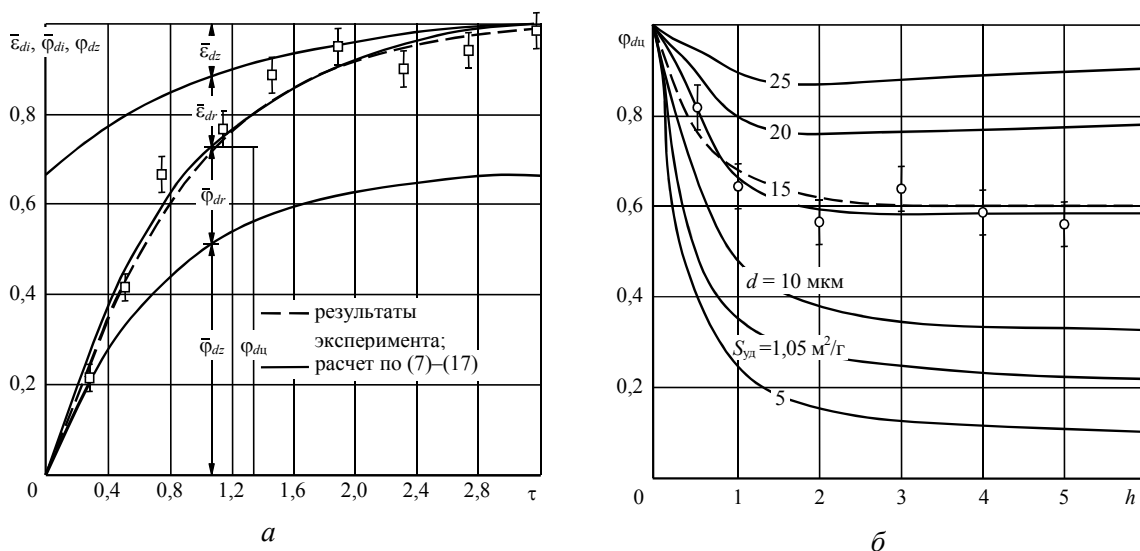


Рис. 3. Влияние безразмерных параметров $\bar{\tau}$ (а) и \bar{h} (б) на унос и отфуговывание ДФ при очистке моторного масла

Сходимость результатов расчёта и эксперимента высока. Теоретические зависимости полностью располагались в доверительных границах экспериментальных значений φ_{dz} и φ_{dr} . Коэффициенты отсева, полученные в опытах, отличались от расчётных максимально на 12 %.

Среднее квадратическое отклонение экспериментальных точек от теоретической и аппроксимирующей кривых примерно одинаково и составляло 4–7 %. Погрешность эксперимента при определении фракционных коэффициентов отсева находилась в пределах 3–6 %.

Для тех же условий центрифугирования выполнено решение при разном времени $\bar{\tau} = \alpha_{dr} \tau$ пребывания частиц в центробежном поле. Расчётом и экспериментально определено влияние на $\varphi_{dц}$ не только $\bar{\tau}$, но и безразмерного параметра $\bar{h} = (R_{ц} - r_0) \sqrt{\alpha_{rd} / b_r}$ (см. рис. 3, б), представляющего отношение детерминированного воздействия к стохастическому. Сходимость данных расчёта и эксперимента для функций ε_{dr} , $\varphi_{dц}(\bar{\tau})$ и $\varphi_{dц}(\bar{h})$ – хорошая. Сопоставление расчётных и экспериментальных зависимостей по критерию Вилькоксона [14] подтверждает, что они принадлежат к одной генеральной совокупности. Теоретические зависимости почти полностью располагаются в поле рассеяния экспериментальных данных, полученных с доверительной вероятностью 95 % по результатам трёх параллельных проб.

При понижении \bar{h} вследствие роста интенсивности случайных воздействий на ДФ эффективность отсева частиц увеличивается. Если $\bar{h} > 8$, стохастичностью процесса для частиц $d > 10$ мкм можно пренебречь. У большинства конструкций ЦО при очистке ГСМ от крупнодисперсных загрязнителей \bar{h} находится в диапазоне 2–25.

Для некоторых ДС при разделении их в центрифуге с цилиндрическим ротором радиальные составляющие силы инерции и силы Кориолиса имеют один и тот же порядок, и пренебречь одной из них (что сделано во многих работах) недопустимо.

Достаточно высокую точность расчёта отфуговывания тяжёлых частиц ДФ ($\rho_{\text{эф}} > 3\,000$ кг/см³) можно получить, учитывая в одной из составляющих α_{rd} в формуле (4) действие сил Кориолиса [5].

Адекватность детерминированной модели (ДМ) при определении полноты отсева видна из сопоставления результатов расчёта и эксперимента (табл.).

Эффективность очистителя МЦН-5П (КС)* по полноте отсева

Загрязнитель	Полнота отсева, %		Погрешность расчёта, %
	Расчётная	Экспериментальная	
Кварцевый с $S_{\text{уд}} = 1,05$ м ² /г: $d_m = 5,5$ мкм; $v_d = 0,7$	16,2**	16,8 ± 1,5	3,6
	18,4	16,8 ± 1,5	9,5
Кварцевый с $S_{\text{уд}} = 0,56$ м ² /г: $d_m = 11,7$ мкм; $v_d = 0,85$	46,3	47,2 ± 3,1	1,9
	44,8	47,2 ± 3,1	5,1
Продукты регенерации саморегенерирующегося фильтра с параметрами: $b_d = 8,6$ мкм; $p_d = 1,84$	25,8	27,1 ± 1,9	4,8
	29,2	27,1 ± 1,9	7,7
	2,5	2,4 ± 0,2	4,2
$b_d = 2,3$ мкм; $p_d = 2,08$	3,1	2,4 ± 0,2	29,2

* Параметры ЦО приведены на рис. 2.

** Расчёт выполнен по стохастической модели (СМ).

Для крупнодисперсных загрязнителей сходимость теоретических и опытных данных по полноте отсева – хорошая. Для мелкодисперсных нерастворимых продуктов погрешность расчёта превышает 15 %, что требует использования СМ.

Формулы расчёта эффективности центрифугирования по ДМ [3] рекомендованы для условий центрифугирования: $\bar{h} \geq 5$. При $\bar{h} < 5$ удовлетворительные результаты расчёта $\varphi_{dц}$ могут быть получены только по СМ.

Баланс ДФ при прохождении ДС через ротор зависит от распределения потоков (см. рис. 3, а). Увеличение доли Q_r способствует уменьшению коэффициента уноса частиц $\bar{\varepsilon}_{dz}$ в главную магистраль дизеля. При этом общая эффективность очистки $\varphi_{dц}$ и $\varphi_{ц}$ как моно-, так и полидисперсной фазы загрязнения практически не понижается. Указанная особенность важна для полнопоточных очистителей. Через поток Q_r можно управлять балансом загрязнений в роторе и значительно повысить эффективность центрифугирования поступающего к потребителю масла [15]. Разработанная СМ показывает способы реализации в условиях стохастичности возможностей и преимуществ ЦО с радиально-осевыми потоками [7].

Расчётные общие характеристики по коэффициенту и полноте отсева очистителя с оптимизированными потоками Q_z и Q_r хорошо согласуются с результатами эксперимента (см. рис. 3, б; табл.). Расхождение между теоретическими и экспериментальными данными по $\varphi_{ц}$ значительно

больше, чем по $\varphi_{dц}$. Теоретические зависимости располагаются в границах доверительного интервала почти всех экспериментальных точек.

Разработанные теоретические основы центрифугирования с учётом стохастичности в 1,5–4 раза повысили точность расчёта эффективности ЦО. Расчётные методики универсальны и могут быть использованы для создания аппаратов различных конструкций и назначений [15]. Предложенная теория применима в системе автоматизированного проектирования высокоэффективных очистителей, а также при разработке новых научно-технических решений и направлений инженерного оформления аппаратов и систем топливо- и маслоочистки судовой дизельной энергетической установки.

Выводы

1. Разработаны с использованием представлений и аппарата случайных марковских процессов принципиально новые СМ центробежной очистки многофазных гетерогенных систем с полидисперсным загрязнителем, характерные для работающих в двигателях внутреннего сгорания моторного масла и топлив. Модели позволяют синтезировать очистительные комплексы высокой эффективности для условий случайных интенсивных воздействий на ДФ рабочих сред судовой дизельной энергетической установки в эксплуатации.

2. Обобщение опыта центрифугирования и близких ему разделительных процессов подтвердило:

- случайные воздействия на ДС в центробежном поле являются дельта-коррелированной функцией времени с нулевым средним значением и заданной интенсивностью;
- центрифугирование можно считать простым марковским процессом и выражать его эффективность через многомерную плотность вероятности.

Перечисленные представления позволяют учитывать при оценке качества очистки совместные действия на осаждение частиц в центробежном поле детерминированных и случайных факторов.

3. Приведена общая схема представления и реализации многомерных задач центрифугирования при любом числе действующих на ДФ детерминированных и случайных факторов. Проиллюстрированы способы формирования начальных и граничных условий для ЦО разного конструктивного исполнения. Разработаны расчётные зависимости для локальной и общей оценки эффективности центрифугирования по фракционному коэффициенту и полноте отсева (уноса).

Идентификация процесса разделения сложных многофазных систем в центробежном поле осуществлена по многоступенчатой схеме: постановка и решение многомерных стохастических задач центрифугирования, реализация упрощенных задач в детерминированной постановке с коррекцией на стохастичность и без неё. Получен критерий, связывающий детерминированное и стохастическое воздействия на частицы, по которому определяется правомерность использования ДМ очистки. Стохастическая модель обеспечивает высокую точность расчёта эффективности центрифугирования как с разрушением, так и без разрушения ДФ.

4. Адекватность разработанных СМ доказана по критерию Вилькоксона. Согласно данному критерию, все теоретические кривые $\varphi_{dц}(d)$ и $\varepsilon_{dц}(d)$ согласуются с экспериментальными зависимостями фракционного коэффициента отсева (уноса) от стоксовского диаметра частиц. Они принадлежат к одной генеральной совокупности. Разница между расчётными и экспериментальными $\varphi_{dц}(d)$ кривыми статистически незначима. Теоретические зависимости, найденные полуаналитическим методом Фаэдо – Галёркина на основе усложненных одно- и многомерных моделей, располагаются в основном в доверительных границах экспериментальных значений $\varphi_{dц}$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шепельский Ю. Л. Развитие конструкций маслоочистителей для судовых дизелей // Двигателестроение. 1985. № 7. С. 20–23.
2. Кича Г. П. Очистка масла в двигателях внутреннего сгорания // Химия и технология топлив и масел. 1985. № 2. С. 28–30.
3. Соколов В. И. Современные промышленные центрифуги. М.: Машиностроение, 1967. 523 с.
4. Кича Г. П., Латин А. М. Идентификация процесса центрифугирования систем с неустойчивой дисперсной фазой // Повышение уровня технической эксплуатации дизелей речного флота: сб. науч. тр. Новосибирск: НИИВТ, 1988. С. 140–153.

5. Кича Г. П. Новые стохастические модели процесса очистки горюче-смазочных материалов в ДВС // Двигателестроение. 1989. № 11. С. 18–23.
6. Кича Г. П., Семенюк Л. А., Таращан Н. Н. Оптимизация параметров комбинированного масляного фильтра, функционирующего в составе комплекса «дизель–топливо–масло» // Транспортное дело России. 2017. № 4. С. 96–102.
7. Кича Г. П., Перминов Б. Н., Надежкин А. В. Ресурсосберегающее маслоиспользование в судовых дизелях: моногр. Владивосток: Изд-во МГУ им. адм. Г. И. Невельского, 2011. 372 с.
8. Лойцянский Л. Г. Механика жидкостей и газов. М.: Высш. шк., 1982. 685 с.
9. Флетчер К. Численные методы на основе метода Галёркина. М.: Мир, 1988. 352 с.
10. Кича Г. П., Загородников Ю. И., Осипов О. В. Стохастическая модель процесса центрифугирования моторного масла в СЭУ // Повышение уровня технической эксплуатации дизелей речного флота: сб. науч. тр. Новосибирск: НИИВТ, 1988. С. 126–139.
11. Михлин С. Г. Вариационные методы в математической физике. М.: Наука, 1970. 512 с.
12. Михлин С. Г. Линейные уравнения в частных производных. М.: Высш. шк., 1977. 431 с.
13. Воробьев Б. Н., Надежкин А. В., Кича Г. П. Стохастическое моделирование разделения сложных гетерогенных систем судовых устройств на основе представлений и аппарата случайных марковских процессов // Мор. интеллектуал. технологии. 2017. № 3. Т. 2. С. 112–121.
14. Кича Г. П., Надежкин А. В., Семенюк Л. А. Новые стохастические модели очистки топлив и масел судовыми центробежными аппаратами со сложной гидродинамической обстановкой // Мор. интеллектуал. технологии. 2018. № 4. Т. 5. С. 77–90.
15. Кича Г. П. Эксплуатационная эффективность новых маслоочистительных комплексов в форсированных дизелях // Двигателестроение. 1987. № 6. С. 25–29.

Статья поступила в редакцию 05.12.2018

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Семенюк Людмила Анатольевна — Россия, 690059, Владивосток; Морской государственный университет им. адмирала Г. И. Невельского; аспирант кафедры судовых двигателей внутреннего сгорания; selyan11@yandex.ru.

Кича Геннадий Петрович — Россия, 690059, Владивосток; Морской государственный университет им. адмирала Г. И. Невельского; д-р техн. наук, профессор; начальник кафедры судовых двигателей внутреннего сгорания; kicha@msun.ru.

Надежкин Андрей Вениаминович — Россия, 690059, Владивосток; Морской государственный университет им. адмирала Г. И. Невельского; д-р техн. наук, доцент; профессор кафедры судовых двигателей внутреннего сгорания; nadezkin@msun.ru.



STOCHASTIC MODEL OF SEPARATION PROCESS OF COMPLEX HETEROGENEOUS DISPERSION SYSTEMS IN CENTRIFUGES WITH RADIAL-AXIAL FLOW

L. A. Semeniuk, G. P. Kicha, A. V. Nadezhkin

*Maritime State University named after Admiral G. I. Nevelskoy,
Vladivostok, Russian Federation*

Abstract. The article describes separation processes in apparatus with complex hydrodynamic conditions. The new approach to the theoretical study consists in taking into account the action of the centrifugal field and the field of random forces, as it was implemented earlier for the simplest structures, but also in a detailed examination of the radial and axial flows. The movement of particles is investigated in the cramped conditions of precipitation during their interaction with each other. The processes of separation in centrifugal devices of various types have been identified,

subject to stochasticity, constrained movement of a set of real particles and the possibility of their dispersion and coagulation. The combined deterministic and stochastic effects on the dispersed phase in a centrifugal field are described by means of a differential equation, the solution of which makes it possible to calculate the fractional and total centrifugation efficiency with high accuracy. A semi-analytical method has been developed and implemented for one- and two-dimensional stochastic models for the approximate solution of non-stationary centrifugal boundary value problems. Compared to difference schemes Faedo-Galerkin method gives the solution of equation systems with a smaller number of unknowns defined in all values of the arguments. The use of the method is possible only in the case of homogeneous boundary conditions and is limited by the possibility of selecting a complete system of functions that would satisfy them. The proposed approach to identification of refining fuels and lubricants is preferable since it fully reflects the essence of the processes occurring in centrifuges with a radial-axial flow. Generalization of stochastic effects on centrifugation, taking into account the hydrodynamic features of the flow of shared media in a centrifugal field, allows calculating all indicators of cleaning fuels and oils from mechanical impurities without model experiments, predicting the total and fractional efficiency of fuel oil filters and oil filters of the internal combustion engines. The developed identification method of separating complex dispersed systems is aimed at the synthesis of systems and devices for oil purification and fuel oil preparation of increased efficiency with predetermined parameters of purification quality in operating conditions.

Key words: stochastic model of centrifugation, Markov processes, separation of heterogeneous systems, hydrodynamics of centrifugal apparatuses, efficiency of fuel and oil cleaners, attrition rate.

For citation: Semeniuk L. A., Kicha G. P., Nadezhkin A. V. Stochastic model of separation process of complex heterogeneous dispersion systems in centrifuges with radial-axial flow. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies*. 2019;1:34-45. (In Russ.) DOI: 10.24143/2073-1574-2019-1-34-45.

REFERENCES

1. Shepel'skii Iu. L. Razvitie konstruksii masloochistitelei dlia sudovykh dizelei [Developing design for oil cleaners in ship diesels]. *Dvigatelistroenie*, 1985, no. 7, pp. 20-23.
2. Kicha G. P. Ochistka masla v dvigateliakh vnutrennego sgoraniia [Oil cleaning in internal combustion engines]. *Khimiia i tekhnologiia topliv i masel*, 1985, no. 2, pp. 28-30.
3. Sokolov V. I. *Sovremennye promyshlennye tsentrifugi* [Modern industrial centrifuges]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1967. 523 p.
4. Kicha G. P., Lapin A. M. Identifikatsiia protsessa tsentrifugirovaniia sistem s neustoichivoi dispersnoi fazoi [Identification of centrifugation process in systems with unstable dispersed phase]. *Povyshenie urovnia tekhnicheskoi ekspluatatsii dizelei rechnogo flota: sbornik nauchnykh trudov*. Novosibirsk, NIIVT Publ., 1988. Pp. 140-153.
5. Kicha G. P. Novye stokhasticheskie modeli protsessa ochistki goriuche-smazochnykh materialov v DVS [New stochastic models of oils in internal combustion engines]. *Dvigatelistroenie*, 1989, no. 11, pp. 18-23.
6. Kicha G. P., Semeniuk L. A., Tarashchan N. N. Optimizatsiia parametrov kombinirovannogo maslianogo fil'tra, funktsioniruiushchego v sostave kompleksa «dizel'-toplivo-maslo» [Optimization of parameters of the combined oil filter functioning as a part of the "diesel-fuel-oil complex"]. *Transportnoe delo Rossii*, 2017, no. 4, pp. 96-102.
7. Kicha G. P., Perminov B. N., Nadezhkin A. V. *Resursosberegaiushchee masloispol'zovanie v sudovykh dizeliakh: monografiia* [Resource saving oil utilizing in ship diesels: monograph]. Vladivostok, Izd.-vo MGU imeni admirala G. I. Nevel'skogo, 2011. 372 p.
8. Loitsianskii L. G. *Mekhanika zhidkosti i gazov* [Mechanics of liquids and gases]. Moscow, Vysshaia shkola Publ., 1982. 685 p.
9. Fletcher K. *Chislennye metody na osnove metoda Galerkina* [Numerical methods based on Galerkin method]. Moscow, Mir Publ., 1988. 352 p.
10. Kicha G. P., Zagorodnikov Iu. I., Osipov O. V. Stokhasticheskaia model' protsessa tsentrifugirovaniia motornogo masla v SEU [Stochastic model of motor oil centrifugation in ship power plants]. *Povyshenie urovnia tekhnicheskoi ekspluatatsii dizelei rechnogo flota: sbornik nauchnykh trudov*. Novosibirsk, NIIVT Publ., 1988. Pp. 126-139.
11. Mikhlin S. G. *Variatsionnye metody v matematicheskoi fizike* [Variations methods in mathematical physics]. Moscow, Nauka Publ., 1970. 512 p.
12. Mikhlin S. G. *Lineinye uravneniia v chastnykh proizvodnykh* [Linear equations in partial derivatives]. Moscow, Vysshaia shkola Publ., 1977. 431 p.

13. Vorob'ev B. N., Nadezhkin A. V., Kicha G. P. Stokhasticheskoe modelirovanie razdeleniia slozhnykh geterogennykh sistem sudovykh ustroystv na osnove predstavlenii i apparata sluchainykh markovskikh protsessov [Stochastic modelling of separation of complex heterogeneous systems of ship machinery based on conceptions and apparatus of random Markov processes]. *Morskie intellektual'nye tekhnologii*, 2017, no. 3, vol. 2, pp. 112-121.

14. Kicha G. P., Nadezhkin A. V., Semeniuk L. A. Novye stokhasticheskie modeli ochistki topliv i masel sudovymi tsentrobezhnymi apparatami so slozhnoi gidrodinamicheskoi obstanovkoi [New stochastic models of purification of fuels and oils by using ship centrifugal apparatus with complex hydrodynamic environment]. *Morskie intellektual'nye tekhnologii*, 2018, no. 4, vol. 5, pp. 77-90.

15. Kicha G. P. Eksploatsionnaia effektivnost' novykh masloochistitel'nykh kompleksov v forsirovannykh dizeliakh [Operational efficiency of new oil cleaning complexes in forced diesels]. *Dvigatelistroenie*, 1987, no. 6, pp. 25-29.

The article submitted to the editors 05.12.2018

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Semeniuk Liudmila Anatolievna – Russia, 690059, Vladivostok; Maritime State University named after Admiral G. I. Nevelskoy; Postgraduate Student of the Department of Ship Internal Combustion Engines; selyan11@yandex.ru.

Kicha Gennadiy Petrovich – Russia, 690059, Vladivostok; Maritime State University named after Admiral G. I. Nevelskoy; Doctor of Technical Sciences, Professor; Head of the Department of Ship Internal Combustion Engines; kicha@msun.ru.

Nadezkin Andrey Veniaminovich – Russia, 690059, Vladivostok; Maritime State University named after Admiral G. I. Nevelskoy; Doctor of Technical Sciences, Assistant Professor; Professor of the Department of Ship Internal Combustion Engines; nadezkin@msun.ru.

