

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И МАШИННО-ДВИЖИТЕЛЬНЫЕ КОМПЛЕКСЫ

DOI: 10.24143/2073-1574-2020-1-60-71
УДК 621.43.013:629.3

ЯЧЕИСТАЯ МОДЕЛЬ ФИЛЬТРОВАНИЯ ПРИ ОЧИСТКЕ ГОРЮЧЕ-СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ ОТ МЕХАНИЧЕСКИХ ПРИМЕСЕЙ

Л. А. Семенюк, Г. П. Кича, М. И. Тарасов

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

Разработана ячеистая модель очистки горюче-смазочных материалов посредством применения фильтровального материала сложной структуры, сформированной из ячеек с цилиндрическими и сферическими коллекторами. Корректировку перемещения частиц загрязнений в ячейках фильтровального материала предложено осуществлять с рассмотрением отклонений траекторий нерастворимых частиц под действием внешних сил относительно линий движения дисперсионной среды в ячейке. Рассмотрено стесненное (с учетом пристенных эффектов) движение полидисперсных частиц при возмущенном обтекании дисперсионной средой коллектора в форме цилиндра и сферы. Моделирование эффективности очистки моторных топлив и масел от механических примесей осуществлено с комплексным учетом основных механизмов отсева дисперсной фазы при фильтрации. Приведена схема ячеистой модели фильтрации с отмеченными на ней радиусами фильтровальной ячейки (оболочки) и коллектора, радиальными координатами положения частицы, угловыми координатами положения частицы и граничной траектории отсева, направлением действия силы тяжести (ускорения), векторами скорости набегающего потока и частицы, векторами радиальной и тангенциальной скорости. По результатам решения дифференциального уравнения численными методами проведено построение граничной траектории и найден фракционный коэффициент отсева. Проиллюстрированы результаты вычислительного эксперимента. Сделан вывод о том, что учет отклонения в расчете сопротивления движению частиц по Стоксу из-за близости коллектора снижает отфильтровываемость дисперсной фазы. Отмечена сложность численных методов реализации ячеистой стохастической модели фильтрации на основе метода конечных разностей. Рекомендовано рассматривать различные механизмы задерживания нерастворимых примесей во взаимодействии.

Ключевые слова: фильтрация, горюче-смазочные материалы, очистка топлив и масел, дисперсная фаза, фракционный коэффициент отсева.

Для цитирования: Семенюк Л. А., Кича Г. П., Тарасов М. И. Ячеистая модель фильтрации при очистке горюче-смазочных материалов от механических примесей // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2020. № 1. С. 60–71. DOI: 10.24143/2073-1574-2020-1-60-71.

Введение

Роль топливно- и маслоподготовки на судах в последние годы значительно возросла, что связано с ужесточением требований к эффективности очистки применяемых в дизелях горюче-смазочных материалов (ГСМ). Увеличение глубины переработки нефти при получении топлив приводит к повышенному их загрязнению абразивными продуктами – алюмосиликатами термokatалитического крекинга. Использование получаемых на его основе мазутов в двигателях внутреннего сгорания вызывает интенсификацию изнашивания деталей топливной аппаратуры и цилиндропоршневой группы [1].

Необходимость высокоэффективной очистки моторных масел (ММ) для тронковых форсированных дизелей, работающих на тяжелых сортах топлива, обусловлена повышенной скоростью их загрязнения нерастворимыми продуктами. Они довольно абразивны из-за повышенной зольности при легировании ММ термостойкими присадками [2]. Кроме того, масла для судовых тронковых дизелей с повышенным наддувом имеют высокие моюще-диспергирующие свойства [3], что затрудняет удаление из них очень диспергированных механических примесей.

Целесообразность надежной защиты топливной аппаратуры и деталей цилиндропоршневой группы дизелей от абразивного изнашивания привела к необходимости разработки фильтров повышенной эффективности. Наиболее предпочтительны для этой цели объемные (гранулированные) и поверхностные (волоконные) фильтровальные материалы (ФМ) с фильтровальными структурами разной пористости [1, 4].

Существующие модели фильтрования при очистке судовых сред (топлив и масел) не учитывают специфики их загрязнения, уровня диспергирования, адгезионных свойств и химмотологического аспекта отсева дисперсной фазы (ДФ) при взаимодействии частиц с фильтровальными структурами. Большинство моделей при оценке эффективности топливных и масляных фильтров по фракционному коэффициенту и полноте очистки получены на основе ситового отсева [1]. Другие механизмы отфильтровывания загрязнений довольно часто используются в сочетании с диффузионным отсевом [5, 6].

Сложность реализации ячеистой стохастической модели фильтрования на основе метода конечных разностей требует использования численных методов, которые довольно сложны в реализации [6]. Различные механизмы задерживания нерастворимых примесей должны рассматриваться во взаимодействии. Наибольшую сложность расчета фракционного коэффициента и полноты отсева при фильтровании вызывает объединение детерминированных и случайных воздействий на осаждаемую частицу в потоке с флуктуациями ее скорости из-за действия пристенных эффектов. Анализ загрязнений ГСМ, используемых на судах, доказал возможность пренебрежения влиянием диффузионных процессов на отсев ДФ большинства дисперсионных систем [1, 7], что упрощает моделирование эффективности фильтров.

Моделирование отсева дисперсной фазы объемными и поверхностными материалами на основе детерминированного подхода

Ячеистая модель фильтрования построена на использовании общих законов движения в структуре ФМ частиц загрязнения с дисперсионной средой при сложной гидродинамической обстановке. Описание перемещения ДФ в поровом пространстве выполнено на основе закона Стокса с введением поправок на стесненность движения и пристенные эффекты.

Ячеистая модель характерна для большинства ФМ: тканевых сеток, металлокерамики, насыпных гранулированных и нетканых волоконных материалов. Основные силы, действующие на частицу в потоке при фильтровании суспензии и обтекании коллектора, приводят к распределению ее скорости (рис. 1).

Ячейка в виде коллектора радиусом R_k с прилегающей оболочкой R_y статистически характеризует ФМ. Ее параметры определяются через пористость m материала согласно выражениям $R_y = R_k(1-m)^{-1/3}$ (сферический коллектор), $R_y = R_k(1-m)^{-1/2}$ (цилиндрический коллектор). Если при стесненном обтекании суспензией шара (цилиндра) частица под действием внешних сил касается коллектора, то она выделяется из дисперсионной среды.

Адгезионный захват обусловлен действием силы \vec{F}_{Ad} Лондона – Ван-дер-Ваальса [1, 7]. В связи с тем, что очищаемая среда содержит полярно активные компоненты: оксикислоты, смолы, асфальтены, образующие на поверхности сольватной оболочки частиц двойной полярно-ионный слой, следует учитывать силы электрокинетического взаимодействия \vec{F}_{DL} [6, 8]. Особенно это важно при наличии в ГСМ воды. Дзета-потенциал частиц ДФ и гранул (волокон) ФМ в значительной мере зависит от концентрации, особенно в ММ, диспергирующе-стабилизирующих присадок [3, 9].

Так как в состав топлив и масел могут входить продукты износа и алюмосиликаты, имеющие высокую плотность, то в модели фильтрования необходимо обязательно учитывать силы тяжести \vec{F}_g . Размеры углеродистых частиц загрязнения указывают на необходимость учета подъемных сил Архимеда \vec{F}_A [10].

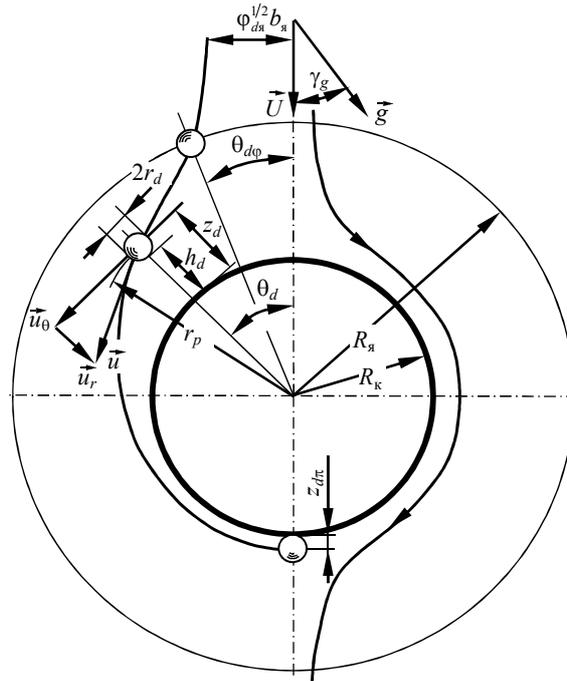


Рис. 1. Схема ячеистой модели фильтрации:

R_y, R_k – радиусы фильтровальной ячейки (оболочки) и коллектора, м; r_p, r_d, h_d и $z_{d\pi}$ – радиальные координаты положения частицы, м; θ_d, θ_{dp} – угловые координаты положения частицы и граничной траектории отсева, град; γ_g – направление действия силы тяжести (ускорения g), град; b_y – половинный размер фильтровальной ячейки, м; ϕ_{da} – фракционный коэффициент отсева ячейки; \vec{U}, \vec{u} – векторы скорости набегающего потока и частицы, м/с; $\vec{u}_r, \vec{u}_\theta$ – векторы радиальной и тангенциальной скорости, м/с

Для расчета сил и моментов, действующих на движущуюся частицу радиуса r_d в неограниченном потоке с вязкостью жидкости μ_m , при низких числах Рейнольдса и векторе скорости ДФ \vec{u} , согласно Стоксу использованы выражения [1, 7, 10]

$$\vec{F}_c = 6\pi\mu_m r_d \vec{u}; \quad \vec{T}_c = 8\pi\mu_m r_d^3 d\vec{u}.$$

Взаимодействие жидкости и частицы при движении суспензии через элементарную ячейку представляется следующими кинетическими уравнениями:

$$M_d \frac{d\vec{u}}{d\tau} = \vec{F}_{Ad} + \vec{F}_{DL} + \vec{F}_g + \vec{F}_A + \vec{F}_c;$$

$$J_d \frac{d\vec{\omega}_d}{d\tau} = \vec{T}_{Ad} + \vec{T}_{DL} + \vec{T}_g + \vec{T}_A + \vec{T}_c,$$

где M_d – масса, кг; J_d – момент инерции, кг·м²; $\vec{\omega}_d$ – вектор угловой скорости частицы, мрад/с.

Ван-дер-Ваальсова сила молекулярного притяжения между частицей и коллектором рассчитывается по формуле [1, 7, 8]

$$\vec{F}_{Ad} = \frac{2Q_\Gamma r_d^3}{3h_d^2 (2r_d + h_d)^2} \vec{e}_r, \quad (1)$$

где $Q_\Gamma = 10^{-20}$ – постоянная Гамакера, Дж; \vec{e}_r – единичный вектор в направлении r ; h_d – расстояние между частицей и коллектором, м.

Силу взаимодействия двойного слоя частицы и сферы (цилиндра) выражаем через их поверхностные потенциалы ξ_d и ξ_k [1]. Поэтому химмотологическое (электрокинетическое) взаимодействие их определяется согласно выражению [7]

$$\vec{F}_{DL} = \frac{\epsilon r_d K_D (\xi_k^2 + \xi_d^2)}{2} \left[\frac{2\xi_k \xi_d}{\xi_k^2 + \xi_d^2} - \exp(-K_D h_d) \right] \frac{\exp(-K_D h_d) \vec{e}_r}{1 - \exp(-2K_D h_d)}, \quad (2)$$

где ϵ – диэлектрическая проницаемость жидкости; K_D – обратная длине Дебая – Хюккеля величина, которая рассчитывается через температуру T дисперсионной среды, заряд электрона e , ионную валентность z_b и концентрацию ионов c_s по выражению

$$K_D = \left(\frac{8\pi e^2 c_s z_b}{\epsilon k_B T_M} \right)^{\frac{1}{2}}.$$

Сумму гравитационной и подъемной сил по направлению \vec{g} находили, задав угол их действия γ_g относительно ячейки (см. рис. 1):

$$\vec{F}_g + \vec{F}_A = \frac{4}{3} \pi r_d^3 \rho_{\text{эф}} g \left[\sin(\gamma_g + \theta_d) \vec{e}_\theta - \cos(\gamma_g + \theta_d) \vec{e}_r \right]. \quad (3)$$

Уравнение движения жидкости при обтекании сферы решали на основе граничных условий непротекания при соприкосновении с коллектором, равенства нулю радиальной скорости потока и касательных напряжений на боковых границах жидкой ячейки. Для этих условий функция тока принимает вид:

$$\Psi_c = \frac{U}{2} R_k^2 \sin^2 \theta \left(\frac{K_1}{r} - K_2 r \right) + K_3 r^2 + K_4 r^4, \quad (4)$$

где U – скорость набегающего потока, м/с.

Функции K_1 – K_4 зависят от пористости ФМ [7]:

$$\left. \begin{aligned} p_m = (1-m)^{1/3}, \quad w_m = 2 - 3p_m + 3p_m^5 - 2p_m^6, \quad K_1 = w_m^{-1}, \\ K_2 = -(3 + 2p_m^5)/w_m, \quad K_3 = (2 + 3p_m^5)/w_m, \quad K_4 = -p_m^5/w_m. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Скорость жидкости при обтекании сферического коллектора из-за симметричного течения относительно вертикальной оси может быть получена из выражения (4) с учетом формулы (5):

$$\vec{v} = - \left(\frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial \Psi_c}{\partial r} \right) \vec{e}_r + \left(\frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial \Psi_c}{\partial \theta} \right) \vec{e}_\theta. \quad (6)$$

Радиальную v_r и тангенциальную v_θ скорости находим по уравнениям [7]

$$\left. \begin{aligned} v_r = -U \cos \theta \left(\frac{K_1 R_k^3}{r^3} + \frac{K_2 R_k}{r} + K_3 + \frac{K_4 r^2}{R_k^2} \right); \\ v_\theta = U \sin \theta \left(-\frac{K_1 R_k^3}{2r^3} + \frac{K_2 R_k}{2r} + K_3 + \frac{2K_4 r^2}{R_k^2} \right). \end{aligned} \right\}$$

Поле скорости, описываемое уравнением (6), для удобства последующих расчетов аппроксимировали полиномом второй степени [2]:

$$\vec{v} = -A^s z^2 \vec{e}_r + (A_y^s y z + B_z^s + C^p z^2) \vec{e}_\theta,$$

где $A^s = \frac{\bar{A}^s U \cos \theta}{R_k^2}$, $A_y^s = \frac{\bar{A}^s U \sin \theta}{R_k^2}$, $B^s = \frac{\bar{B}^s U \sin \theta}{R_k}$, $C^p = \frac{\bar{C}^p U \sin \theta}{R_k^2}$, $\bar{A}^s = \bar{B}^s = \frac{3(1-p_m^5)}{w_m}$,

$$\bar{C}^p = \frac{3(1-4p_m^5)}{w_m}, \quad y = r(\theta - \theta_d).$$

Поле скорости жидкости есть суперпозиция поля заторможенного потока по нормали и тангенциально к поверхности сферического коллектора (первое и второе слагаемые) с включением линейного и параболического полей сдвигового течения (соответственно, третий и четвертый компоненты).

Для квазистационарного процесса фильтрации силы и моменты, действующие на частицу ДФ в координатных направлениях r и θ (см. рис. 1), должны находиться в равновесии. Вследствие симметрии задачи силы проявляются только в этих направлениях, спектр моментов действует нормально к плоскости чертежа.

На базе формул для расчета сил и моментов вязкого сопротивления с учетом пристенных эффектов, приведенных в [7, 10], уравнения равновесия сил и моментов формируются в виде следующей системы:

$$\left. \begin{aligned} F_r^n + F_r^t + F_r^r + f_r^s + f_r^l + f_r^p + F_{Adr} + F_{DLr} + F_{gr} + F_{Ar} &= 0; \\ F_\theta^n + F_\theta^t + F_\theta^r + f_\theta^s + f_\theta^l + f_\theta^p + F_{g\theta} + F_{A\theta} &= 0; \\ T_\varphi^n + T_\varphi^t + T_\varphi^r + t_\varphi^s + t_\varphi^l + t_\varphi^p &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Символами F, f и T, t обозначены силы и моменты вязкого сопротивления, действующие соответственно на движущуюся частицу в движущейся жидкости. Верхние индексы характеризуют следующее: n, t – частица перемещается по нормали и касательной к поверхности коллектора; r – частица движется с осью вращения, параллельной поверхности; s представляет осимметричный заторможенный поток относительно коллектора; l, p дают представление сдвигового течения с линейным и параболическим полем скоростей соответственно.

Из системы уравнений (7), проецируя на r и θ выраженные формулами (1)–(3) внешние силы совместно с компонентами \vec{F}_c и \vec{T}_c после приведения их к безразмерному виду, имеем:

$$\left. \begin{aligned} N_{DL} \left\{ E_{kd} - \exp[-E_{DL}(\bar{z}_d - 1)] \right\} \frac{\exp[E_{DL}(\bar{z}_d - 1)]}{1 - \exp[-2E_{DL}(\bar{z}_d - 1)]} - \bar{F}_r^n \bar{u}_r - \\ - \frac{N_{Ad}}{(\bar{z}_d - 1)^2 (\bar{z}_d + 1)^2} - N_{gA} \cos(\gamma_g + \theta_d) - \bar{f}_r^s \bar{A}^s \bar{z}_d^2 \bar{r}_d^2 \cos \theta_d &= 0; \\ N_{gA} \sin(\gamma_g + \theta_d) - \bar{F}_\theta^t \bar{u}_\theta + \bar{F}_\theta^r \bar{w}_d + \bar{f}_\theta^l \bar{B}^l \bar{z}_d \bar{r}_d \sin \theta_d + \bar{f}_\theta^p \bar{C}^p \bar{z}_d^2 \bar{r}_d^2 \sin \theta_d &= 0; \\ \bar{T}_\varphi^t \bar{u}_\theta - \bar{T}_\varphi^r \bar{w}_d + t_\varphi^l \bar{B}^l \bar{z}_d \bar{r}_d \sin \theta_d + t_\varphi^p \bar{C}^p \bar{z}_d^2 \bar{r}_d^2 \sin \theta_d &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Приведение к безразмерному виду позволило выделить группы отсева, действующие на отфильтровываемую частицу. Адгезионная $N_{Ad} = Q_r / 9\pi\mu_m r_d^2 U$, химмотологическая $N_{DL} = \in k_D (\zeta_k^2 + \zeta_d^2) / 12\pi\mu_m U$ и гравитационная $N_{gA} = 2r_d^2 (\rho_d - \rho_m) g / 9\mu_m U$ группы являются, соответственно, отношением вандерваальсовых, электрокинетических двойного слоя и гравитационных сил к силе вязкого сопротивления.

Электрокинетический (химмотологический) симплекс $N_{DL} = \in k_D (\zeta_k^2 + \zeta_d^2) / 12\pi\mu_m U$, $E_{kd} = 2\zeta_k \zeta_d / (\zeta_k^2 + \zeta_d^2)$ зависит от потенциалов частицы и коллектора. Симплекс двойного слоя $E_{DL} = k_D r_d$ использован для представления F_{DL} в безразмерном виде.

Решив систему уравнений (8) относительно \bar{u}_r и \bar{u}_θ , получили выражения для скорости движения частицы при обтекании жидкостью сферического коллектора:

$$\bar{u}_r = \frac{1}{\bar{F}_r^n} \left[N_{DL} \left\{ E_{kd} - \exp[-E_{DL}(\bar{z}_d - 1)] \right\} \frac{\exp[-E_{DL}(\bar{z}_d - 1)]}{1 - \exp[-2E_{DL}(\bar{z}_d - 1)]} - \frac{N_{Ad}}{(\bar{z}_d - 1)^2 (\bar{z}_d + 1)^2} - N_{gA} \cos(\gamma_g + \theta_d) - \bar{f}_r^s \bar{A}^s \bar{z}_d^2 \bar{r}_d^2 \cos \theta_d \right]; \quad (9)$$

$$\bar{u}_\theta = \frac{\sin \theta_d}{\bar{T}_\phi \bar{F}_\theta^l - \bar{T}_\phi^l \bar{F}_\theta^r} \left[\frac{\bar{T}_\phi^r N_{gA} \sin(\gamma_g + \theta_d)}{\sin \theta_d} + \bar{B}^l \bar{z}_d \bar{r}_d (\bar{T}_\phi^r \bar{f}_\theta^l + \bar{F}_\theta^r \bar{t}_\phi^l) + \bar{C}^p \bar{z}_d \bar{r}_d (\bar{T}_\phi^r \bar{f}_\theta^p + \bar{F}_\theta^r \bar{t}_\phi^p) \right]. \quad (10)$$

Эффективность ячеистой модели рассчитываем путем построения траектории движения частиц ДФ при обтекании сферического коллектора суспензией. Так как $\bar{u}_r = d\bar{r}_p/d\bar{\tau}$ и $\bar{u}_\theta = r_p d\theta_d/d\bar{\tau}$, выразив $\bar{z}_d = \bar{r}_p - \bar{R}_k$ после деления (9) на (10) и последующего преобразования, находим:

$$\begin{aligned} \frac{d\bar{r}_p}{d\theta_d} = & \left(N_{DL} \left\{ E_{kd} - \exp[-E_{DL}(\bar{r}_p - \bar{R}_k - 1)] \right\} \frac{\exp[-E_{DL}(\bar{r}_p - \bar{R}_k - 1)]}{1 - \exp[-2E_{DL}(\bar{r}_p - \bar{R}_k - 1)]} - \frac{N_{Ad}}{(\bar{r}_p - \bar{R}_k - 1)^2 (\bar{r}_p - \bar{R}_k + 1)^2} - \right. \\ & - N_{gA} \cos(\gamma_g + \theta_d) - \bar{f}_r^s \bar{A}^s (\bar{r}_p - \bar{R}_k)^2 \bar{r}_d^2 \cos \theta_d \left. \right) / \left(\bar{C}^p (\bar{r}_p - \bar{R}_k)^2 \bar{r}_d^2 (\bar{T}_\phi^r \bar{f}_\theta^p + \bar{F}_\theta^r \bar{t}_\phi^p) + \right. \\ & \left. + (\bar{B}^l (\bar{r}_p - \bar{R}_k) \bar{r}_d (\bar{T}_\phi^r \bar{f}_\theta^l + \bar{F}_\theta^r \bar{t}_\phi^l) + \bar{T}_\phi^r N_{gA} \sin(\gamma_g + \theta_d) / \sin \theta_d) \cdot (\bar{r}_p (\bar{T}_\phi^r \bar{F}_\theta^l - \bar{T}_\phi^l \bar{F}_\theta^r) / \bar{F}_r^n \sin \theta_d) \right). \quad (11) \end{aligned}$$

Задерживающая способность фильтровальной ячейки определяется расчетом траектории движения частицы на границе захвата (см. рис. 1). Граничная траектория как бы разделяет поток на две составляющие – внутреннюю (зону отсева) и наружную (фильтрата). Внутренняя – располагаемая между вертикальной осью симметрии и граничной траекторией, из которой частица оседает на коллектор. Наружная зона формирует поток, из которого частицы заданного размера за один проход через фильтровальную ячейку не удаляются.

Характеристикой границы захвата служит траектория, заканчивающаяся в точке с координатами $\bar{r}_p - \bar{r}_{p\pi}$ и $\theta_d = \theta_{d\pi}$. Для большинства случаев вполне допустимо считать, что координата $\bar{r}_{p\pi}$ равна $\bar{R}_k + 1$.

По координате пересечения граничной траектории контуров (радиуса \bar{R}_y) фильтровальной ячейки можно судить о ее задерживающей способности. Фракционный коэффициент отсева определяется отношением потока внутри граничной траектории на входе в ячейку к объему дисперсионной среды, поступающей в нее в единицу времени. При одинаковом значении скорости U набегающего потока в фильтровальную ячейку для зоны захвата и проскока

$$\Phi_{d\pi} = \left(\frac{b_\phi}{b_y} \right)^2 = \sin^2 \theta_{d\pi}.$$

Линейная b_ϕ и угловая $\theta_{d\pi}$ координаты отсева находятся по условию $b_\phi = \lim_{\theta_d \rightarrow 0} (\bar{r}_p \sin \theta_{d\pi})$ или $\theta_d = \theta_{d\pi}$ при $\bar{r}_p - \bar{R}_y$ построением граничной траектории в результате решения уравнения (11).

Возможно упрощение дифференциального уравнения (11) за счет представления функции тока не формулой (4), а в виде [5, 8]

$$\psi_c = 0,75 A_c U (r - R_k)^2 \sin^2 \theta,$$

где $A_c = \frac{2(1 - p_m^5)}{w_m}$.

При замене $1/\bar{F}_r^n$ на $F_1(\bar{h}_d)$, \bar{f}_r^s и \bar{f}_θ^l , соответственно, на $F_2(\bar{h}_d)$ и $F_3(\bar{h}_d)$ согласно рекомендациям [7, 10] для условий $N_{DL} \leq N_{Ad}$ и $\gamma_g = 0$ уравнение (11) после замены координат \bar{r}_p на \bar{h}_d преобразуется в зависимость

$$\frac{d\bar{h}_p}{d\theta_d} = - \frac{\left[\frac{3}{2}(\bar{h}_d + 1)^2 F_2(\bar{h}_d) + N_{gA} \frac{\bar{R}_k^2}{A_c} \right] \cos\theta_d + \frac{N_{gA} \frac{\bar{R}_k^2}{A_c}}{(\bar{h}_d + 2)^2 \bar{h}_d^2}}{\frac{3}{2}(\bar{h}_d + 1) \frac{F_3(\bar{h}_d)}{F_1(\bar{h}_d)} \sin\theta_d}. \quad (12)$$

Решение задачи с коллектором в форме цилиндра при детерминированном подходе допустимо расчетом траекторий частиц по выражению (11) с принятием $\bar{A}^s = 2A_{ц}$, $\bar{B}^l = 4A_{ц}$ и $\bar{C}^p = 0$.

Константы, учитывающие особенности обтекания неизолированного цилиндра, находящегося в центре фильтровальной ячейки, получены по функции тока $\psi_{ц}$:

$$\psi_{ц} = 2A_{ц}U \frac{(r - R_k)^2}{R_k} \sin\theta,$$

где $A_{ц} = \frac{1}{2(1-m) - \ln(1-m) - \frac{3+(1-m)^2}{2}}$.

Упрощенное выражение, по которому можно построить граничную траекторию, имеет вид:

$$\frac{d\bar{h}_d}{d\theta_d} = - \frac{\left[2(\bar{h}_d + 1)^2 F_2(\bar{h}_d) + N_{gA} \frac{\bar{R}_k^2}{A_{ц}} \right] \cos\theta_d + \frac{N_{Ad} \frac{\bar{R}_k^2}{A_{ц}}}{\bar{h}_d^2 (\bar{h}_d + 2)^2}}{4(\bar{h}_d + 1) \frac{F_3(\bar{h}_d)}{F_1(\bar{h}_d)} \sin\theta_d}. \quad (13)$$

Фракционный коэффициент отсева волоконных материалов при детерминированном решении определяется с использованием уравнения (13) по схеме

$$\varphi_{dя} = \frac{2A_{ц}}{\bar{R}_k \bar{b}_я} \lim_{\theta_d \rightarrow 0} (\bar{h}_d + 1)^2 \sin\theta_d = \frac{b_\phi}{b_я} = \sin\theta_{d\phi}.$$

При фильтровании через $n_я$ последовательно располагаемых ячеек фракционный коэффициент отсева выразится соотношением

$$\varphi_{d\phi} = 1 - \prod_{i=1}^{n_я} (1 - \varphi_{dяi}). \quad (14)$$

При задании фракционного состава загрязнителя распределением $F(d)$ полнота отсева фильтра рассчитывается по формуле

$$\Phi_\phi = \int_0^{d_{\max}} \varphi_{d\phi} F(d) dd.$$

Анализ результатов расчета эффективности фильтрования по ячеистой модели

Построение граничной траектории и нахождение фракционного коэффициента отсева осуществляли по результатам решения обыкновенного дифференциального уравнения (11) численными методами. Все коэффициенты F , f и T затабулированы как функция \bar{z}_p и \bar{h}_p в целом ряде работ [7–10]. Для решения уравнения (11) и его упрощенных модификаций (12) и (13) использо-

вали схему Рунге – Кутта четвертого порядка с левыми разностями по времени, начиная с координат $\bar{r}_{p\pi} = \bar{R}_k + 1$ и $\theta_d = \pi$ [2, 7]. На каждом шаге поправочные коэффициенты пересчитывали.

Выполненные расчеты подтвердили существенное влияние на задерживающий эффект процесса торможения частиц у препятствия (коллектора) (рис. 2, а). Здесь представлены результаты вычислительного эксперимента $\Phi_{d\alpha}(\bar{r}_d, N_{gA})$ при $N_{Ad} = 1,5 \cdot 10^{-5}$ [8].

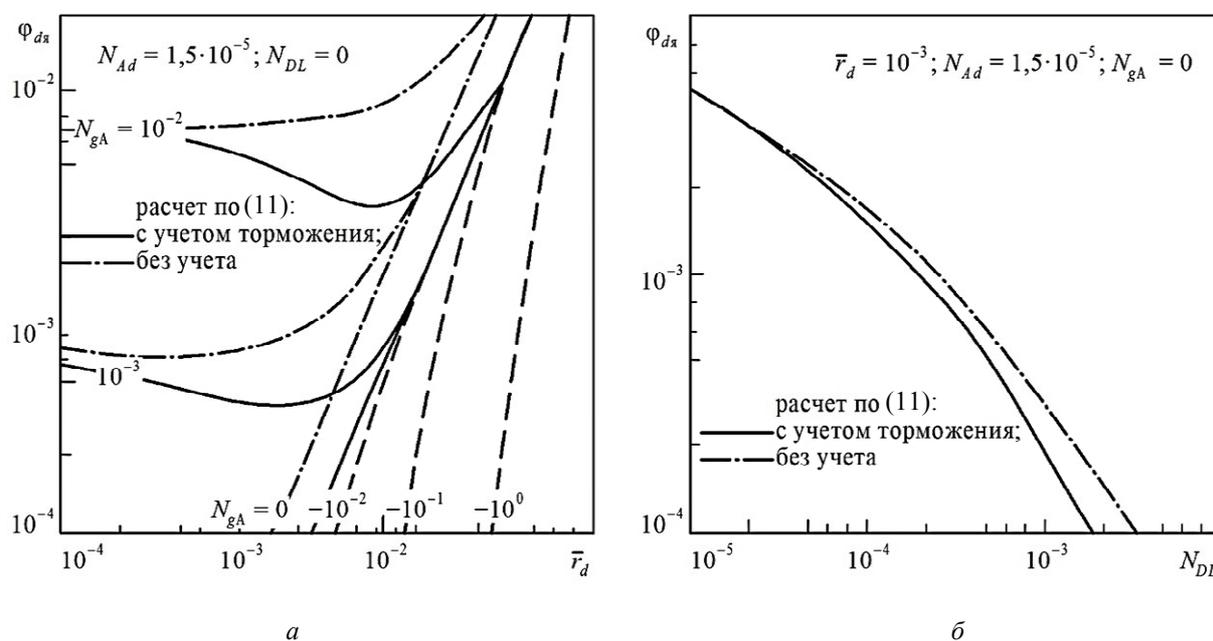


Рис. 2. Сравнение расчетных данных по отфильтровыванию частиц дисперсной фазы при действии разных групп отсева: а – влияние размера частиц и гравитационной группы отсева; б – зависимость фракционного коэффициента отсева от действия химмотологической группы

Штрих-пунктирные линии соответствуют варианту, когда вязкостное взаимодействие частицы с коллектором не учитывалось. Для мелкодисперсной фазы загрязнений ($\bar{r}_d < 10^{-3}$) им можно пренебречь в широком диапазоне действия сил гравитации. По мере увеличения размера частиц отклонения в значениях $\Phi_{d\alpha}$, рассчитываемого с учетом торможения в сравнении с данными, полученными без его учета, растут. Согласно рис. 2, а в зависимости $\Phi_{d\alpha}(\bar{r}_d, N_{gA})$ при $N_{Ad} = 1,5 \cdot 10^{-5}$ разница в показателях фракционного коэффициента отсева (расчет выполнен без учета и с учетом торможения) достигает максимума при $\bar{r}_d < 3 \cdot 10^{-3}$ ($N_{gA} = 10^{-3}$) и $\bar{r}_d < 10^{-2}$ ($N_{gA} = 10^{-2}$). При дальнейшем увеличении размера частиц он стабилизируется. Значение $\Phi_{d\alpha}$ для условий расчета с учетом торможения всегда ниже.

Положительные значения гравитационной группы отсева N_{gA} способствуют отфильтровыванию ДФ, отрицательные – снижению эффективности очистки. Таким образом, можно заключить, что учет отклонения в расчете сопротивления движению частицы по Стоксу из-за близости коллектора уменьшает отфильтровываемость ДФ.

Важность учета химмотологической группы N_{DL} иллюстрирует рис. 2, б. Полярно активные молекулы присадок к маслу и продукты его старения при довольно невысоких значениях адгезионной составляющей в балансе сил групп отсева ($N_{Ad} = 1,5 \cdot 10^{-5}$) снижают отфильтровывание ДФ. Роль торможения при осаждении частиц на коллектор из-за действия вязкостных эффектов снижается (см. рис. 2, б). По мере увеличения значений N_{DL} падение $\Phi_{d\alpha}$ возрастает [8].

Проверка эффективности разработанной ячеистой модели для коллектора в форме цилиндра осуществлялась идентификацией эффективности нетканых ФМ. Суспензия послойно проходит через ряд фильтровальных ячеек, и интегрально эффективность ее очистки зависит от ряда факторов. На рис. 3 приведена эффективность фильтрования в зависимости от пористости и адгезионной активности ФМ, числа фильтровальных слоев n_f .

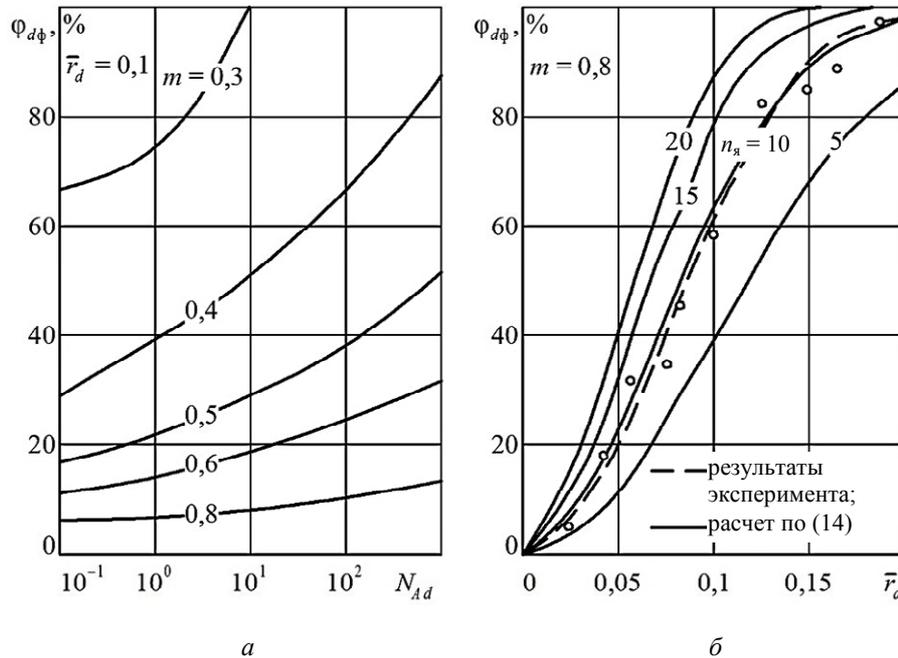


Рис. 3. Влияние на эффективность фильтрования:
 a – адгезионной группы отсева; b – размера частиц

Наполняемость ФМ волокнами (снижение пористости материала) и увеличение адгезионной группы захвата способствуют росту фракционного коэффициента отсева (рис. 3, a). Фракционная эффективность фильтра растет по мере увеличения толщины (числа фильтровальных слоев) ФМ. При этом послойное возрастание фракционного коэффициента отсева у частиц разного размера неодинаково (рис. 3, b).

Первые слои ФМ по ходу фильтра воспринимают большую «грязевую» нагрузку, чем конечные. Этот факт указывает на рациональность использования, особенно в объемных ФМ, слоев с разной задерживающей способностью и фильтровальными характеристиками.

Сопоставление полученных по ячеистой модели расчетных данных с результатами эксперимента (рис. 3, b) доказало, что зависимость $\Phi_{d\phi}(\bar{r}_d)$ в обоих случаях принадлежит одной генеральной совокупности. Суммы квадратов отклонений точек опытов от теоретической и аппроксимирующей зависимостей практически одинаковы. Разница между расчетными и экспериментальными данными статистически незначима.

Разработанные очистные модели фильтрования позволяют с удовлетворительной точностью прогнозировать эффективность современных топливно- и маслоочистителей судовых энергетических установок. Кроме того, они дают возможность направленно формировать поровую структуру применяемых в них ФМ для интенсификации процесса очистки ГСМ.

Выводы

1. Математическое описание перемещения ДФ и дисперсионной среды в поровом пространстве, формируемом ячеистой моделью, выполнено с использованием закона Стокса и с введением поправок на стесненность движения его торможения из-за влияния коллектора. Сопротивление движению частиц в фильтровальной ячейке и вязкостные эффекты оценены посредством суперпозиции найденных частных решений. Эффекты вязкости при движении частиц

в поровом пространстве получены аппроксимацией линейного и параболического полей сдвигового течения, а также поля осесимметричного заторможенного потока. Используются функции тока для возмущенного обтекания коллектора в форме сферы и цилиндра.

2. Уточнена теория фильтрации на основе адгезионного захвата, седиментации и других задерживающих механизмов, которая комплексно учитывает физико-механическое (электрокинетическое) взаимодействие полидисперсной нерастворимой фазы загрязнений с фильтрующей перегородкой сложной структуры, состоящей из ячеек со сферическими и цилиндрическими коллекторами. Доказаны адекватность полученной ячеистой модели и возможность использования ее для интенсификации эффективности фильтров и управления структурой ФМ с целью создания топливо- и маслоочистителей с высокими технико-экономическими характеристиками.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Кича Г. П., Перминов Б. Н., Надежкин А. В.* Ресурсосберегающее маслоиспользование в судовых дизелях: моногр. Владивосток: Изд-во Мор. гос. ун-та им. адм. Г. И. Невельского, 2011. 372 с.
2. *Кича Г. П., Липин Г. М., Полоротов С. П.* Триботехнические характеристики нерастворимых продуктов загрязнения моторных масел и их влияние на износ двигателя // Трение и износ. 1986. Т. 7. № 6. С. 1068–1078.
3. *Кича Г. П., Перминов Б. Н., Надежкин А. В., Завадский С. А.* Моделирование изнашивания судовых тронковых дизелей при использовании унифицированных моторных масел // Трение и износ. 2004. Т. 25. № 6. С. 635–641.
4. *Кича Г. П., Надежкин А. В., Семенюк Л. А.* Пути повышения эффективности тонкой очистки моторного масла совершенствованием фильтровальных нетканых материалов в маслоочистителях судовых дизелей // Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. Сер.: Морская техника и технология. 2018. № 4. С. 31–41.
5. *Кича Г. П., Перминов Б. Н., Голенищев А. В.* Стохастическая ячеистая модель очистки горючесмазочных материалов ДВС фильтрованием // Науч. проблемы трансп. Сибири и Дальнего Востока. 2009. № 1. С. 246–251.
6. *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. Т. 2. № 3. С. 112–121.
7. *Tichy J. A.* A model of lubrication filtration // Trans. ASME, J. Lubric. Technol. 1981. Vol. 103. N. 1. P. 81–89.
8. *Rajagopalan R., Tien C.* Trajectory analysis of deep-bed filtration with the sphere-in-cell porous media model // AIChE J. 1976. Vol. 22. N. 3. P. 523–533.
9. *Pajatakes A. C., Tien C., Turian R. M.* A new model for granular porous media: Model formulation // AIChE J. 1973. Vol. 19. P. 58–66.
10. *Spielman L. A., Fitzpatrick J. A.* Theory for particle collection under London and gravity forces // J. Col. Sci. 1973. Vol. 42. N. 3. P. 607–623.

Статья поступила в редакцию 10.10.2019

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.

Тарасов Максим Игоревич – Россия, 690059, Владивосток; Морской государственный университет им. адмирала Г. И. Невельского; аспирант кафедры судовых двигателей внутреннего сгорания; nadezkin@msun.ru.



CELLULAR FILTRATION MODEL IN PURIFYING FUELS AND LUBRICANTS FROM MECHANICAL IMPURITIES

L. A. Semeniuk, G. P. Kicha, M. I. Tarasov

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

Abstract. The paper describes a cellular model of fuel and lubricants cleaning developed by using a filtering material with a complex structure of cells with cylindrical and spherical collectors. It was offered to carry out the correction of moving dirty particles in cells of a filtering material subject to deviations of trajectories of insoluble particles under the external forces concerning trajectory of the dispersive medium in a cell. The constrained motion of polydisperse particles (subject to parietal effects) under perturbed flow of cylindrical and spherical collectors by the dispersion medium has been considered. Modeling efficient purification of motor fuels and oils from mechanical impurities has been carried out with a complex account of the main mechanisms of dispersion phase elimination during filtration. There has been given a diagram of the cellular filtration model with the radii of the filter cell (shell) and collector, the radial coordinates of the particle position, the angular coordinates of the particle position and the boundary screening path, the direction of gravity (acceleration), the velocity vectors of the incoming flow and a particle, the vectors of the radial and tangential velocity. According to the results of solving the differential equation by numerical methods, the boundary trajectory was constructed and the fractional dropout coefficient was found. The results of a computational experiment are illustrated. It has been inferred that considering the deviation when calculating the resistance against the particle motion using Stokes method reduces the filterability of the dispersed phase due to the proximity of the collector. The complexity of numerical methods for implementing a cellular stochastic filtering model based on the finite difference method is noted. It is recommended to consider various mechanisms of restraining the insoluble impurities in the interaction.

Key words: filtration, fuels and lubricants, fuel and oil purification, dispersion phase, fractional dropout coefficient.

For citation: Semeniuk L. A., Kicha G. P., Tarasov M. I. Cellular filtration model in purifying fuels and lubricants from mechanical impurities. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies*. 2020;1:60-71. (In Russ.) DOI: 10.24143/2073-1574-2020-1-60-71.

REFERENCES

1. Kicha G. P., Perminov B. N., Nadezhkin A. V. *Resursosberegayushchee masloispol'zovanie v sudovyh dizelyah: monografiya* [Resource-saving oil use in marine diesel engines: monograph]. Vladivostok, Izd-vo Mor. gos. un-ta im. adm. G. I. Nevel'skogo, 2011. 372 p.
2. Kicha G. P., Lipin G. M., Polorotov S. P. Tribotekhnicheskie karakteristiki nerastvorimyyh produktov zagryazneniya motornyh masel i ih vliyanie na iznos dvigatelya [Tribological characteristics of insoluble motor oil pollutants and their effect on engine wear]. *Trenie i iznos*, 1986, vol. 7, no. 6, pp. 1068-1078.
3. Kicha G. P., Perminov B. N., Nadezhkin A. V., Zavadskij S. A. Modelirovanie iznashivaniya sudovyh tronkovykh dizelej pri ispol'zovanii unificirovannyh motornyh masel [Modeling wear of marine diesel engines using unified engine oils]. *Trenie i iznos*, 2004, vol. 25, no. 6, pp. 635-641.
4. Kicha G. P., Nadezhkin A. V., Semenyuk L. A. Puti povysheniya effektivnosti tonkoj ochistki motor-nogo masla sovershenstvovaniem fil'troval'nyh netkanyh materialov v masloochistitelyah sudovyh dizelej [Ways to improve efficiency of fine cleaning of engine oil by improving filter non-woven materials in marine diesel engine oil cleaners]. *Vestnik Astrahanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Morskaya tekhnika i tekhnologiya*, 2018, no. 4, pp. 31-41.
5. Kicha G. P., Perminov B. N., Golenishchev A. V. Stokhasticheskaya yacheistaya model' ochistki goryuche-smazochnyh materialov DVS fil'trovaniem [Stochastic cellular model of ICE fuels and lubricants cleaning]. *Nauchnyye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka*, 2009, no. 1, pp. 246-251.
6. Vorob'ev B. N., Nadezhkin A. V., Kicha G. P. Stokhasticheskoe modelirovanie razdeleniya slozhnyh geterogennyh sistem sudovyh ustrojstv na osnove predstavlenij i apparata sluchajnyh markovskih processov [Stochastic modeling separation of complex heterogeneous systems of ship machinery based on representations and apparatus of random Markov processes]. *Morskie intellektual'nye tekhnologii*, 2017, vol. 2, no. 3, pp. 112-121.

7. Tichy J. A. A model of lubrication filtration. Trans. *ASME, J. Lubric. Technol.*, 1981, vol. 103, no. 1, pp. 81-89.
8. Rajagopalan R., Tien C. Trajectory analysis of deep-bed filtration with the sphere-in-cell porous media model. *AIChE J.*, 1976, vol. 22, no. 3, pp. 523-533.
9. Pajatakes A. C., Tien C., Turian R. M. A new model for granular porous media: Model formulation. *AIChE J.*, 1973, vol. 19, pp. 58-66.
10. Spielman L. A., Fitzpatrick J. A. Theory for particle collection under London and gravity forces. *J. Col. Sci.*, 1973, vol. 42, no. 3, pp. 607-623.

The article submitted to the editors 10.10.2019

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.

Tarasov Maxim Igorevich – Russia, 690059, Vladivostok; Maritime State University named after Admiral G. I. Nevelskoy; Postgraduate Student of the Department of Ship Internal Combustion Engines; nadezkin@msun.ru.

