

---

---

# СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ, УСТРОЙСТВА И СИСТЕМЫ, ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА СУДОВОЖДЕНИЯ, ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ СУДОВ

---

---

УДК 621.431.74-729.3

**С.П. Бойко**

Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского,  
690059, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50а

## РАСЧЕТ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОТИВОТЕЧНОЙ РЕГЕНЕРАЦИИ САМООЧИЩАЮЩИХСЯ ФИЛЬТРОВ ТОПЛИВНЫХ И СМАЗОЧНЫХ СИСТЕМ СУДОВЫХ ДИЗЕЛЕЙ

*Приводится методика расчета процесса регенерации обратным потоком промывной жидкости самоочищающихся фильтров (СОФ) топлив и масла. Рассмотрено гидродинамическое воздействие на отложившуюся в капилляре (поре) фильтровального материала частицу загрязнений. Выведено условие отрыва ее от ложи поры за счет подъемной силы, вызываемой потоком промывной жидкости. Проведено сравнение расчетных и экспериментальных данных по коэффициенту регенерации СОФ при разных значениях гидродинамических, адгезионных и седиментационных компонентов процесса.*

**Ключевые слова:** самоочищающийся фильтр, регенерация фильтра, очистка топлива и масла, фильтрование, промывка фильтрующих элементов.

**S.P. Boyko**

## CALKULATION OF EFFICIENCY OF REGENERATION OF SELF-CLEANING FILTER USED IN FUEL AND LUBRICANT SYSTEMS OF SHIP DIESEL ENGINES

*Given the method of calculation of the process of regeneration with return stream washing of lavage fluid self-cleaning filter (SCF) fuel and oil. Considered hydrodynamic influence on the deposited in the capillary filter material particle contamination. Concluded the condition of the tearing it off from the boxes pores at expense of lifting force made by the stream of the washing liquid. Carried out comparison of calculation and experimental data by the coefficient of regeneration with different values hydrodynamic adhesive and sedimentation components of the process.*

**Key words:** self-cleaning filter, regeneration of the filter, cleaning of fuel and oil, filtering, washing of the filtering elements.

В последние годы для очистки топлив и моторных масел на судах широкое распространение получили саморегенерирующиеся фильтры. Особенность функционирования их состоит в том, что фильтрующие элементы (ФЭ) этих очистителей длительно сохраняют свои рабочие характеристики за счет удаления накапливающихся в них загрязнений потоком промывной жидкости. В качестве промывной среды используется фильтруемое топливо или масло.

Для повышения эффективности процесса регенерации самоочищающихся фильтров (СОФ) обратным потоком фильтруемой жидкости необходимо увеличивать его скорость. Целью данной статьи является расчет величины скорости промывного потока СОФ, которая обеспечит требуемое качество регенерации. Коэффициент эффективности противотечной регенерации СОФ должен быть таковым, чтобы обеспечивалась длительная работа очистителя в течение 2–4 тыс. ч без его вскрытия для проведения химической очистки ФЭ.

Попытка идентифицировать процесс регенерации, рассмотрев силы, действующие на отфильтрованную частицу, в том числе вызываемые промывным потоком, представлена в исследованиях [1, 2]. Стохастическая модель регенерации СОФ, которая описана в отчете по НИР [1], довольно сложна. Реализация ее в расчетах эффективности промывки фильтра и дает завышенные значения коэффициента регенерации  $\phi_{pg}$ , особенно при рассмотрении удаления мелкодисперсной фазы загрязнений. В статье сделана попытка уточнения модели регенерации с использованием детерминированного подхода и представлений, приведенных в работах [1, 2].

Для расчета вероятности удаления отложившейся частицы загрязнений путем отрыва ее промывным потоком от ложи поры составляли баланс действующих на нее сил и моментов. Вследствие сложности учета связи дисперсной фазы с поверхностью капилляра (поры), а также учета влияющих на частицу и зависящих от ее формы лобовой и подъемной сил рассматриваются  $F_i$  в момент отрыва.

Удаление дисперсной фазы из капилляра имеет вероятностную природу. Особенно сложно учесть повторные осаждения на поверхность капилляра взвешенной, оторвавшейся от ложа поры частицы. Частица может сдвинуться параллельно продольной оси, оторваться от ложа и перейти во взвешенное состояние, повернуться вокруг точки контакта (рис. 1).

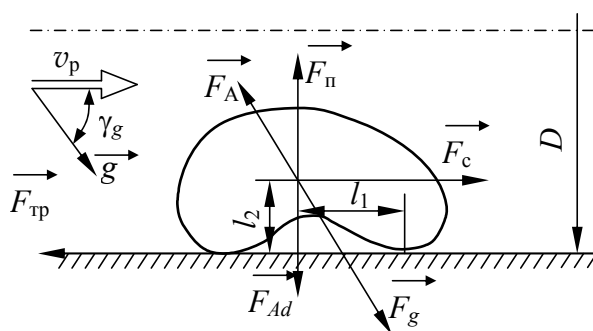


Рис. 1. Схема действия сил на смываемую частицу отложений в СОФ  
Fig. 1. Chart of action of forces on the washed off particle of sedimentations in SCF

Условия предельного равновесия частицы в момент отрыва представляют собой равенства

$$\left. \begin{aligned} F_c + F_{gA} \cos \gamma_g - f_{\text{тр}} (F_{gA} \sin \gamma_g + F_{Ad} - F_{\text{п}}) &\geq 0; \\ F_{Ad} + F_{gA} \sin \gamma_g - F_{\text{п}} &\geq 0; \\ (F_{\text{п}} - F_{gA} \sin \gamma_g) l_1 + (F_c + F_{gA} \cos \gamma_g) l_2 &\geq 0, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $F_g$  – сила тяжести;  $F_A$  – сила Архимеда;  $F_{Ad}$  – сила адгезии;  $F_{\text{п}}$  – подъемная сила;  $F_c$  – сила Стокса;  $F_{\text{тр}}$  – сила трения частицы о ложе поры;  $v_p$  – скорость промывного потока;  $D$  – диаметр поры;  $l_1, l_2$  – координаты центра тяжести частицы;  $\gamma_g$  – угол между направлением промывного потока и земным притяжением.

Первое уравнение в системе (1) представляет проекцию всех действующих на частицу сил на ось капилляра. Второе – перпендикулярно потоку. Третье уравнение определяет условия удаления частицы из капилляра за счет перекачивания. При этом опрокидывающие частицу моменты приведены относительно точек опоры.

Расшифровка  $F_i$  приведена в работе [2]. Сила сопротивления  $F_c$  и подъемная  $F_n$  найдены из условия параболического распределения скоростей по сечению канала. Решение системы уравнений (1) позволяет определить среднюю скорость потока в капилляре, которая переводит рассматриваемую частицу за счет действия подъемной силы во взвешенное состояние, что соответствует условию ее удаления при промывке капилляра.

Скорость промывного потока, при которой возникает наибольшая вероятность удаления частицы с отрывом и без отрыва от гладкой ложи, т.е. переводом во взвешенное состояние или скольжением (качением), выражается через критерий Рейнольдса

$$Re_p \geq \frac{f_{тр}}{1 + \beta_n f_{тр}} \left[ \frac{\rho_{эф} g d^2 \sin \gamma_g}{18 \mu_m} + \frac{Q_r}{72 \delta_d^2 \left( 1 + \frac{2\pi \delta_d}{\lambda_m} \right) \mu_m d} \right] \frac{D^2 \rho_m}{2 \mu_m \left( 2 - \frac{d}{D} \right) d}, \quad (2)$$

где  $Re_p$  – критерий Рейнольдса для потока в капилляре, при котором частица из него удаляется;  $\beta_n$  – характеристика подъемной силы в долях  $F_c$ ;  $f_{тр}$  – коэффициент трения;  $\delta_d$  – толщина сольватной оболочки частицы;  $\lambda_m$  – физическая константа масла при расчете коэффициента адгезии [2];  $Q_r$  – постоянная Гаммакера;  $d$  – диаметр частиц загрязнений;  $D$  – диаметр поры фильтровального материала (ФМ);  $\rho_{эф}$  – эффективная плотность частицы;  $\rho_m$  – плотность масла;  $\mu_m$  – вязкость масла.

При воздействии промывного потока на частицу возникает подъемная сила  $F_n$ . Под действием этой силы частица взвешивается и удаляется. Эффективное гидродинамическое воздействие на частицу, приводящее к ее удалению, при оценке  $F_n$  определяли посредством критерия  $Re_p$  по формуле

$$Re_p \geq \frac{D^2 \rho_m}{4 \mu_m d^2} \left( \frac{\rho_{эф} g d^2 \sin \gamma_g + \frac{Q_r}{4\pi \delta_d^2 \left( 1 + \frac{2\pi \delta_d}{\lambda_m} \right)}}{\rho_m \left( 1 - \frac{d}{D} \right) \left( 2 - \frac{d}{D} \right)} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (3)$$

При фильтровании в капилляре скапливается множество частиц. Удаление их противотоком с вероятностью 95 % возможно, если длительность промывки составляет  $\tau_p \geq \left( \frac{Re_\phi}{Re_p} \right)^{3,31} c_\phi \tau_\phi$ .

Параметр  $\tau_p$  зависит от массы и степени уплотнения дисперсной фазы в поровом пространстве, определяемых через характеристики цикла фильтрования:  $Re_\phi$  – критерий Рейнольдса при фильтровании;  $Re_p$  – критерий Рейнольдса при регенерации;  $\tau_\phi$  – продолжительность фильтрования;  $c_\phi$  – коэффициент отсева загрязнений фильтром;  $c$  – концентрация нерастворимых примесей в суспензии (топливе, масле).

При искусственной турбулизации промывного потока вероятность отрыва частиц по (3) хорошо согласуется с выраженным через массообмен в поре коэффициентом регенерации.

Последний может определяться с помощью средней скорости радиальных турбулентных пульсаций промывного потока  $\bar{v}_r$  на входе в ФЭ через интеграл вероятности erfх [3].

$$\varphi_{pg} = \operatorname{erf} \left[ \frac{2\rho_m^2 St_{dp}^2 \bar{v}_r^2}{3(St_{dp}^2 + 1)\rho_{эф} Dg} \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (4)$$

где  $St_{dp}$  – критерий Стокса [2] при обтекании промывным потоком частицы загрязнений, находящейся в русле поры ФМ;  $\bar{v}_r$  – скорость турбулентных пульсаций, создаваемых искусственно для интенсификации регенерации СОФ.

Проверку адекватности полученных на основе выражений (2)-(4) зависимостей для расчета «весового» коэффициента регенерации осуществляли на безмоторном стенде в лаборатории химмотологии МГУ им. адм. Г.И. Невельского. Коэффициент  $\varphi_{pg}$  определяли взвешиванием загрязненной фильтровальной сетки до и после действия на ее отложения стандартного (обратного) промывного потока.

Условия и методика испытаний описаны в работе [1]. В качестве загрязнителя использовалась кварцевая пыль с удельной поверхностью  $1,05 \text{ м}^2/\text{г}$ . Адгезионную составляющую частиц кварца к ложе пор усиливали, создавая на загрязнителе сольватную оболочку за счет использования отложений отработанного масла и специальных поверхностно-активных веществ [1].

В качестве ФМ использовались тканые сетки полотняного переплетения. Номинальная тонкость отсева их составляла 20–50 мкм. Испытываемые образцы представляли собой круги диаметром 30 мм. В качестве опоры фильтровального материала, чтобы исключить его продавливание, использовались сетки «грубого» плетения. Параметр промывки  $v_p$  превышал скорость фильтровального потока в 4–30 раз. Фильтрацию и промывку осуществляли с использованием моторного масла вязкостью 30–40 сСт на рабочем режиме. С этой целью его подогревали до температуры 60–70 °С. В качестве фильтровальной среды использовали масло М-10, загрязненное кварцевой пылью концентрацией 0,2 %.

На рис. 2 показана зависимость коэффициента регенерации СОФ от среднего размера  $m_d$  частиц загрязнений, отложившихся на ФС. Сходимость расчетов по модели (4) с экспериментальными данными хорошая. В области крупных частиц ( $m_d/\Delta_{0,95} > 0,4$ ) расчетные данные находятся в доверительных границах экспериментальных результатов, определенных с вероятностью 0,95. Упрощенный подход к расчету  $\varphi_{pg}$  по модели, приведенной в работе [1], дает худшую сходимость, особенно для мелкодисперсных загрязнений ( $m_d/\Delta_{0,95} < 0,4$ ). Для крупных частиц расхождения по предложенной зависимости и модели [1] незначительны. При этом расчетная зависимость  $\varphi_{pg}(m_d/\Delta_{0,95})$  по выражению (4) имеет меньшие отклонения от экспериментальных данных в сравнении с результатами, полученными по модели [1].

Интенсификация процесса промывки СОФ за счет увеличения скорости промывного потока показывает, что высокие значения коэффициента регенерации  $\varphi_{pg} = 0,85\text{--}0,98$  возможны при скоростях промывного потока, превышающие фильтровальный в 7–10 раз (рис. 3). Увеличение  $v_p$  до 0,1 м/с при вязкостях  $v_m = 30$  сСт обеспечивает эффективное функционирование СОФ со значением  $\varphi_{pg} > 0,95$ .

По точности идентификации процесса регенерации фильтров типа СОФ и ФМ [1, 2] наилучшую сопоставимость с экспериментальными данными дает модель (4). Во всех случаях при  $Re_p/Re_\phi > 9$  расчетные зависимости по  $\varphi_{pg}$  (рис. 3) ниже экспериментальных, а при

низких  $Re_p$  расхождение расчетных и экспериментальных результатов в среднем составляет 20 %. При этом экспериментальные значения  $\varphi_{pg}$  ниже расчетных. Такое явление объясняется пренебрежением учета взаимодействия частиц в ансамбле (группе) загрязнений при их удалении. Рассматриваемый процесс идентифицирован через удаление одиночных, не взаимодействующих друг с другом частиц дисперсной фазы.

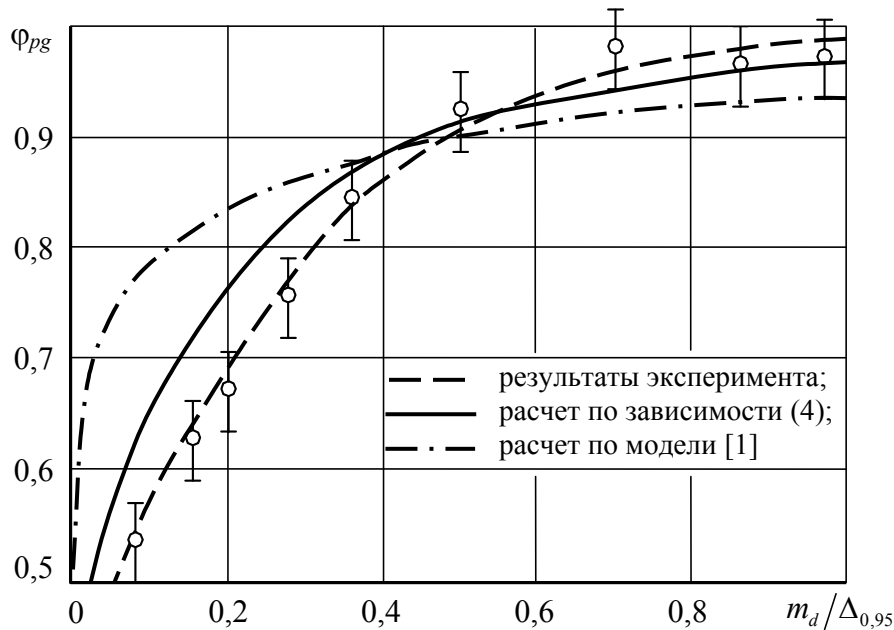


Рис. 2. Влияние размера частиц отложений на коэффициент регенерации СОФ  
Fig. 2. Influence of the size of particles of deposits on coefficient of regeneration of SCF

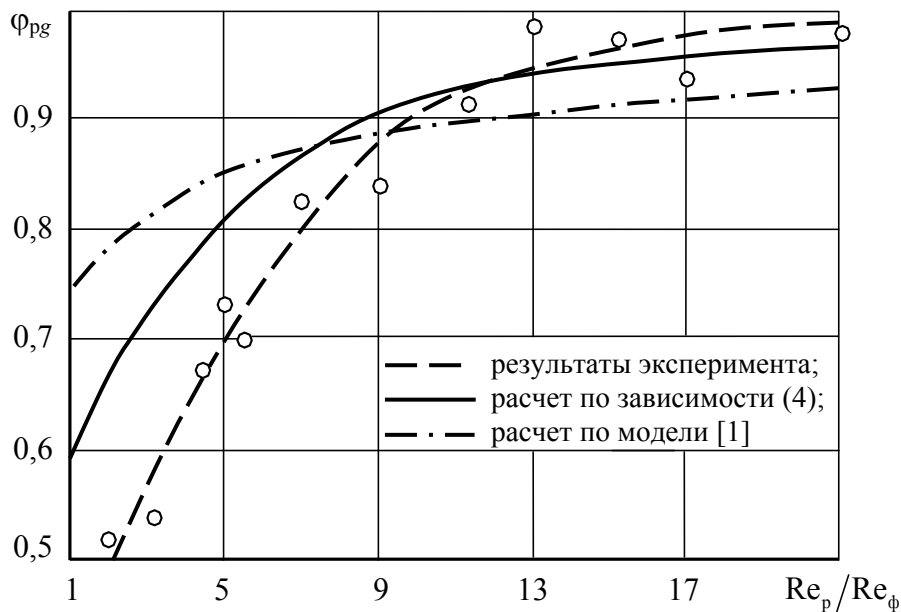


Рис. 3. Расчетные зависимости по  $\varphi_{pg}$  при разной интенсивности промывного потока  
Fig. 3. Calculation dependences for  $\varphi_{pg}$  at different intensity of illof lavage

Роль адгезионного удержания частиц ложей капилляра видно из рис. 4. Влияние адгезионной группы захвата  $N_{Adp}$ , идентифицируемой по методике [2], проявляется при  $N_{Adp} > 10^{-2}$ . Расчетные данные по  $\varphi_{pg}$  при оценке влияния адгезионного захвата хорошо согласуются с экспериментальными значениями этого коэффициента практически во всем диапазоне адгезионных свойств рабочей фазы загрязнений топлива и масла. Для искусственного загрязнителя расхождение теоретических зависимостей  $\varphi_{pg}(N_{Adp})$  от полученных экспериментально не превышает при использовании зависимости (4) 12 %.

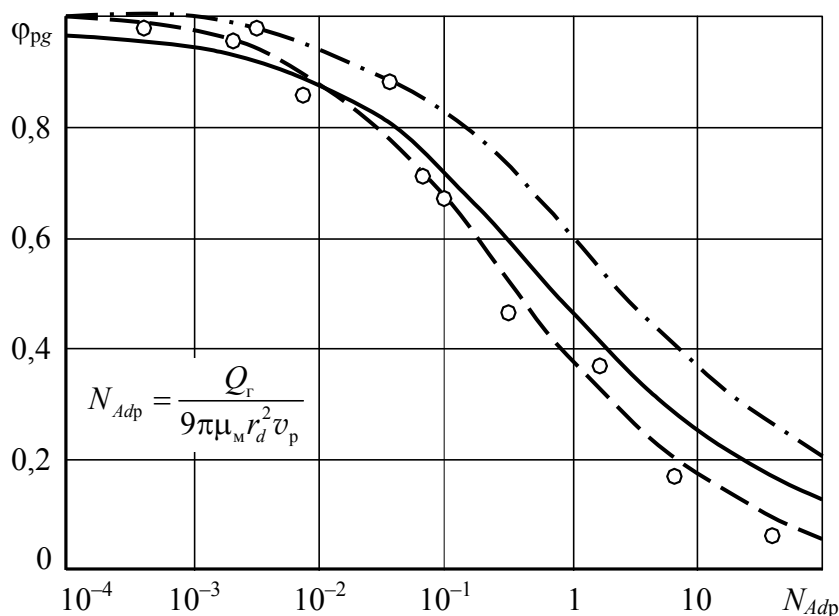


Рис. 4. Роль адгезионного удержания частиц ложей капилляра  
Fig. 4. Role of the adhesion withholding of particles of beds of capillary

Моделирование процесса противоточной регенерации СОФ на одиночных не взаимодействующих частицах загрязнений ФЭ показала допустимость использования разработанной методики для оценки эффективности данного процесса при отфильтровывании крупнодисперсного загрязнителя. При идентификации процесса регенерации СОФ, когда осуществляется фильтрация суспензии с мелкодисперсной фазой загрязнений, необходим иной подход, когда рассматривается удаление не одиночных, а взаимодействующих частиц дисперсной фазы, отложившихся в капиллярах и перешедших во взвешенное состояние под воздействием промывного потока.

Предложенная методика расчета процесса регенерации современных СОФ приемлема для судовых очистителей технических жидкостей, предназначенных для удаления крупнодисперсных загрязнителей, например, полнопоточного фильтрования моторных масел форсированных дизелей, для которых номинальная тонкость отсева  $\Delta_{0,95}$  составляет 30–50 мкм. В системах смазки таких ДВС крупнодисперсных загрязнителей незначительно, поэтому процесс регенерации моделируется по предлагаемой методике с высокой точностью.

## Выводы

1. Уточнены некоторые теоретические положения расчета эффективности регенерации самоочищающихся фильтров. Гидродинамическое воздействие на частицы загрязнений, вы-

зывающее разблокирование пор, взвешивание и унос дисперсной фазы из капилляра, определено по балансу массовых, гидродинамических и адгезионных сил с учетом вероятностной природы осаждения и размещения частицы в ложе, а также искусственных пульсаций промывного потока для повышения эффективности рассматриваемого процесса.

2. Получена модель процесса регенерации, позволяющая вести расчет его эффективности и периодичности химической мойки самоочищающихся фильтров в зависимости от гидродинамической интенсивности и продолжительности промывки обратным потоком, от особенностей конструкции фильтрующего элемента, блокировки пор отложениями, их адгезионной активности и уплотнения, размера пор и частиц дисперсной фазы, специфики структуры, регенерируемости фильтрующего материала и процесса фильтрования. Выявлено, что наибольшее влияние на  $\varphi_p$  оказывают  $Re_p$  промывного потока.

### **Список литературы**

1. Создание самоочищающихся фильтров повышенной эффективности и автономности для систем смазки дизелей: отчет о НИР / Дальневост. высш. инж. мор, уч-ще; Руководитель Г.П. Кича. – ХДТ-2/84ДС; № ГР 01840016833; Инв. № 02900033091. – Владивосток, 1989. – 116 с.
2. Кича Г.П., Перминов Б.Н., Надежкин А.В. Ресурсосберегающее маслоиспользование в судовых дизелях. – Владивосток: Мор. гос. ун-т, 2011. – 372 с.
3. Бойко С.П. Моделирование эффективности противотечной регенерации судовых самоочищающихся фильтров топлива и масла // Молодежь – Наука – Инновации: материалы 61-й Междунар. науч.-практ. конф. – Владивосток: Мор. гос. ун-т, 2013. – Т. 1. – С. 38–41.

**Сведения об авторе:** Бойко Сергей Петрович, аспирант; e-mail: nadezkin@msun.ru.