

## ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ПРОЦЕСС ОЧИСТКИ МОТОРНОГО МАСЛА ОТ ЧАСТИЦ САЖИ ПРИ РАДИАЛЬНОМ ФИЛЬТРОВАНИИ

В. М. Капцевич, В. К. Корнеева, И. В. Закревский

Белорусский государственный аграрный технический университет,  
пр. Независимости, 99, 220023, г. Минск, Беларусь, тел.: 8 (017) 267-12-54,  
e-mail: lerakor1974@mail.ru

Поступила 05.08.2023 г.

*Для случая радиального фильтрования моторного масла от частиц сажи, варьируя параметрами пористой среды и режимами фильтрования, теоретически показана возможность определения габаритных размеров фильтроэлемента, обеспечивающего требуемую степень очистки.*

**Введение.** Сажа является естественным побочным продуктом горения топлива. Длительный процесс эксплуатации масла или неполное сгорание топлива приводят к аномальному накоплению сажи, что оказывает вредное воздействие на свойства как самого масла, так и на работоспособность двигателя целом. В процессе старения масла в результате процесса агломерации частиц сажи размером 30–50 нм [1] происходит образование агломератов размером до 0,3–1 мкм (рис. 1) [2].

В процессе работы двигателя сажа частично удаляется масляным фильтром, однако размеры пор такого фильтра превышают, как правило, 5 мкм, в то время как частицы меньшего размера остаются в масляной системе двигателя. Наличие таких частиц в моторном масле приводит к повышенному абразивному износу деталей двигателя, вызывает образование нагара, шлама и способствует закупорке масляных каналов.

В работах [3, 4] нами было получено уравнение Ивасаки для радиального фильтрования и его решение для определения изменения концентрации частиц загрязнений в процессе очистки, а в работе [5] сделана попытка расчета процесса фильтрования моторного масла от сажи-стых частиц через волоконный фильтроэлемент.

Следует отметить, что особенностью моторного масла является сложная пологая зависимость его вязкости от температуры [6]. Такая его

особенность вызывает необходимость исследовать влияние температуры масла на процесс фильтрования.

Цель работы – теоретически оценить влияние температуры моторного масла на процесс его очистки от частиц сажи при радиальном фильтровании.

**Результаты и их обсуждение.** Решение уравнения Ивасаки для случая радиального фильтрования для определения изменения объемной концентрации частиц загрязнений  $C$ , % при начальной объемной концентрации частиц  $C_0$ , % с вероятностью осаждения на единичном коллекторе  $\alpha$  при фильтровании через цилиндрический образец с пористостью  $\Pi$  с внутренним радиусом  $r_0$  и текущей координатой в радиальном направлении  $r$ , м, имеет вид:

$$C = C_0 \exp \left[ -\frac{4(1-\Pi)\alpha}{D} \left( A \left( r^{5/3} - r_0^{5/3} \right) + B(r - r_0) + F(r^2 - r_0^2) + G \ln \frac{r}{r_0} \right) \right]. \quad (1)$$

В выражении (1) параметры  $X - A, B, F$  и  $G$  являются величинами прямопропорциональными величинам вероятностей столкновения  $\eta$  частиц загрязнений под действием механизмов диффузии, прямого столкновения, седиментации и инерции, соответственно (табл. 1).

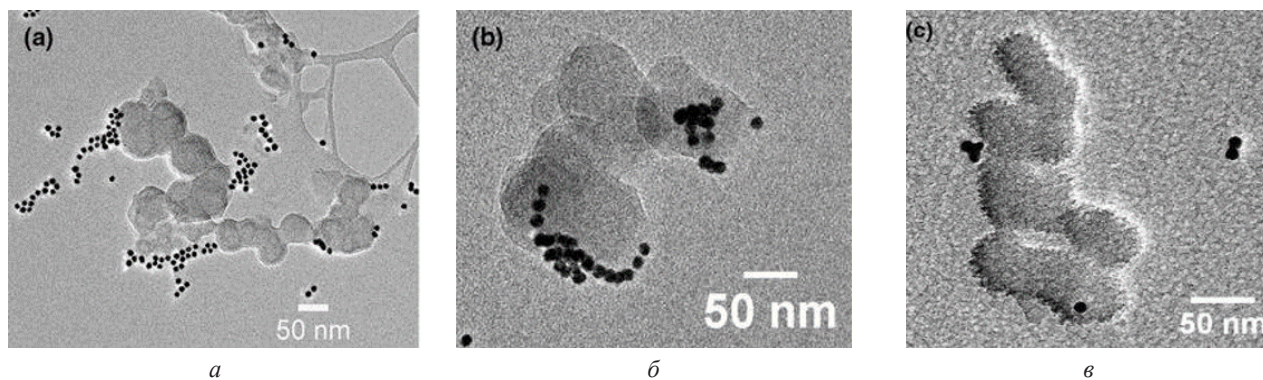


Рис. 1. 2D-ТЕМ-изображение частиц сажи в работающем моторном масле с линейными размерами (длина × ширина): а – 472 × 107 нм; б – 288 × 70 нм; в – 232 × 55 нм [2]

Таблица 1. Взаимосвязь параметров с величинами вероятностей столкновения частиц загрязнений с единичным коллектором при радиальном фильтровании

Механизмы осаждения	Параметр X	Вероятность столкновения η	Отношение X/η
Диффузия	$A = 0,54 \left( \frac{k_B T \Pi}{\mu d v_\phi r_0} \right)^{2/3}$	$\eta_{\text{диф}} = 0,9 \left( \frac{k_B T \Pi r}{\mu d v_\phi r_0} \right)^{2/3}$	$\frac{0,6}{r}$
Прямое столкновение	$B = \frac{3}{2} \left( \frac{d}{D} \right)^2$	$\eta_{\text{пр ст}} = \frac{3}{2} \left( \frac{d}{D} \right)^2$	1
Седиментация	$F = \frac{(\rho_\tau - \rho_\text{ж}) d^2 \Pi g}{36 \mu v_\phi r_0}$	$\eta_{\text{сед}} = \frac{(\rho_\tau - \rho_\text{ж}) d^2 \Pi g r}{18 \mu v_\phi r_0}$	$\frac{0,5}{r}$
Инерция	$G = \frac{\rho_\tau d^2 v_\phi r_0}{18 \mu D \Pi}$	$\eta_{\text{ин}} = \frac{\rho_\tau d^2 v_\phi r_0}{18 \mu D \Pi r}$	r

где  $k_B$  – постоянная Больцмана, равная  $1,3804 \cdot 10^{-23}$ , Дж/К;  $T$  – абсолютная температура, К;  $\mu$  – динамическая вязкость очищаемой жидкости, Па·с;  $d$  – диаметр частиц загрязнений, м;  $D$  – диаметр волокна, м;  $\rho_\tau$  и  $\rho_\text{ж}$  – соответственно плотность частиц загрязнений и очищаемой жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  $v_\phi$  – скорость фильтрации на входе в цилиндрическую перегородку, м/с;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>

Рассмотрим процесс осаждения частиц сажи с размерами  $d$ , равными  $0,5 \cdot 10^{-6}$  м ( $\rho_\tau = 2000$  кг/м<sup>3</sup>), на цилиндрическом фильтроэлементе пористостью  $\Pi = 0,4$  с  $r_0 = 2 \cdot 10^{-3}$  м из волокон диаметром  $D$ , равными  $50 \cdot 10^{-6}$  м на примере процесса фильтрования моторного масла М-10Г<sub>2</sub> (ГОСТ 8581-78) со скоростью  $v_0 = 10^{-5}$  м/с при различных температурах и со-

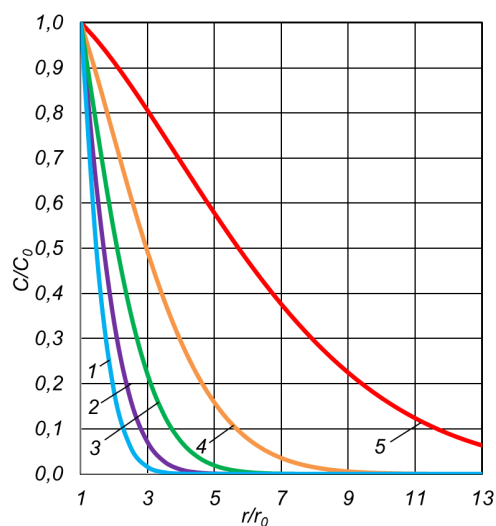


Рис. 2. Зависимость изменения относительной концентрации  $C/C_0$  от отношения радиусов  $r/r_0$  при различных температурах масла  $T$ : 1 – 373 К; 2 – 353 К; 3 – 333 К; 4 – 313 К; 5 – 293 К

ответствующим им значениям плотностей и вязкостей:  $T = 293 \text{ К}$  ( $\rho_{\text{ж}} = 900 \text{ кг/м}^3$ ,  $\mu = 0,836 \text{ Па}\cdot\text{с}$ );  $T = 313 \text{ К}$  ( $\rho_{\text{ж}} = 887 \text{ кг/м}^3$ ,  $\mu = 0,135 \text{ Па}\cdot\text{с}$ );  $T = 333 \text{ К}$  ( $\rho_{\text{ж}} = 876 \text{ кг/м}^3$ ,  $\mu = 0,046 \text{ Па}\cdot\text{с}$ );  $T = 353 \text{ К}$  ( $\rho_{\text{ж}} = 863 \text{ кг/м}^3$ ,  $\mu = 0,022 \text{ Па}\cdot\text{с}$ ) и  $T = 373 \text{ К}$  ( $\rho_{\text{ж}} = 851 \text{ кг/м}^3$ ,  $\mu = 0,012 \text{ Па}\cdot\text{с}$ ). Результаты проведенных расчетов представлены на рис. 2.

Анализ полученных результатов расчетов (рис. 2) показывает существенное влияние температуры  $T$  моторного масла на процесс осаждения сажи в поровых каналах волоконного фильтроэлемента. Так, при температуре  $T = 373 \text{ К}$  полная очистка от сажистых частиц достигается при отношении радиусов  $r/r_0$ , равном  $\approx 3$ , а при  $T = 393 \text{ К}$  —  $r/r_0$  превышает 13. Такое влияние на процесс очистки обусловлено уменьшением

вязкости  $\mu$  и плотности  $\rho_{\text{ж}}$  очищаемого масла с ростом температуры  $T$ , что однозначно приводит к возрастанию действия механизмов диффузии, седиментации и инерции. Таким образом, для достижения одной и той же степени очистки повышение температуры масла позволяет существенно уменьшить размеры фильтроэлемента.

На рис. 3 представлены результаты расчетов процесса осаждения частиц сажи, диаметром  $d$ , равным  $0,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}$  на цилиндрическом волоконном фильтроэлементе пористостью  $\Pi = 0,4$  с  $r_0 = 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$  из волокон различных диаметров  $D$ , равных 50, 100, 150, 200 и 250 мкм, при различных температурах:  $T = 313 \text{ К}$  (рис. 3, а);  $T = 333 \text{ К}$  (рис. 3, б);  $T = 353 \text{ К}$  (рис. 3, в)

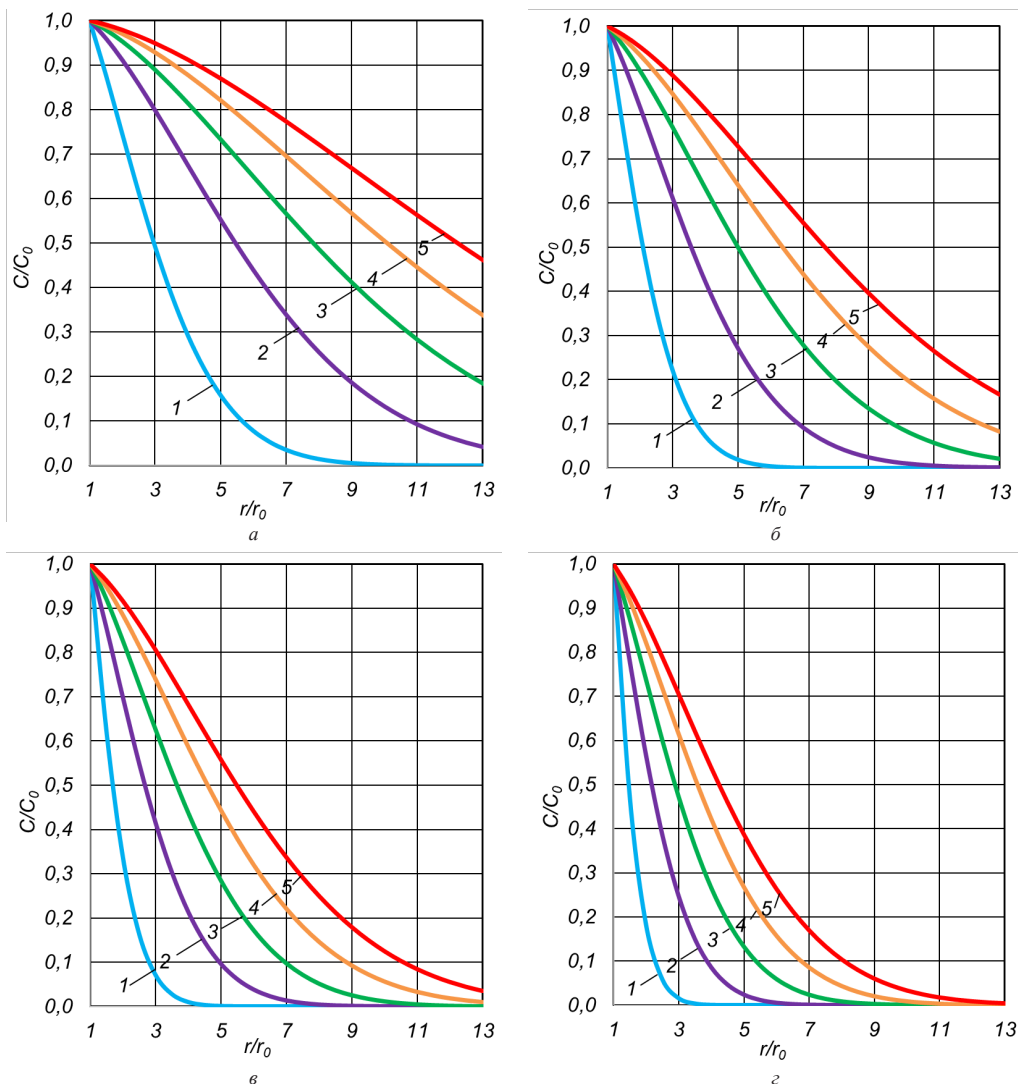


Рис. 3. Зависимость изменения относительной концентрации  $C/C_0$  от отношения радиусов  $r/r_0$  при различных температурах масла  $T$ : а — 313 К; б — 333 К; в — 353 К; г — 373 К, и различных диаметрах волокон  $D$ : 1 — 50 мкм; 2 — 100 мкм; 3 — 150 мкм; 4 — 200 мкм; 5 — 250 мкм

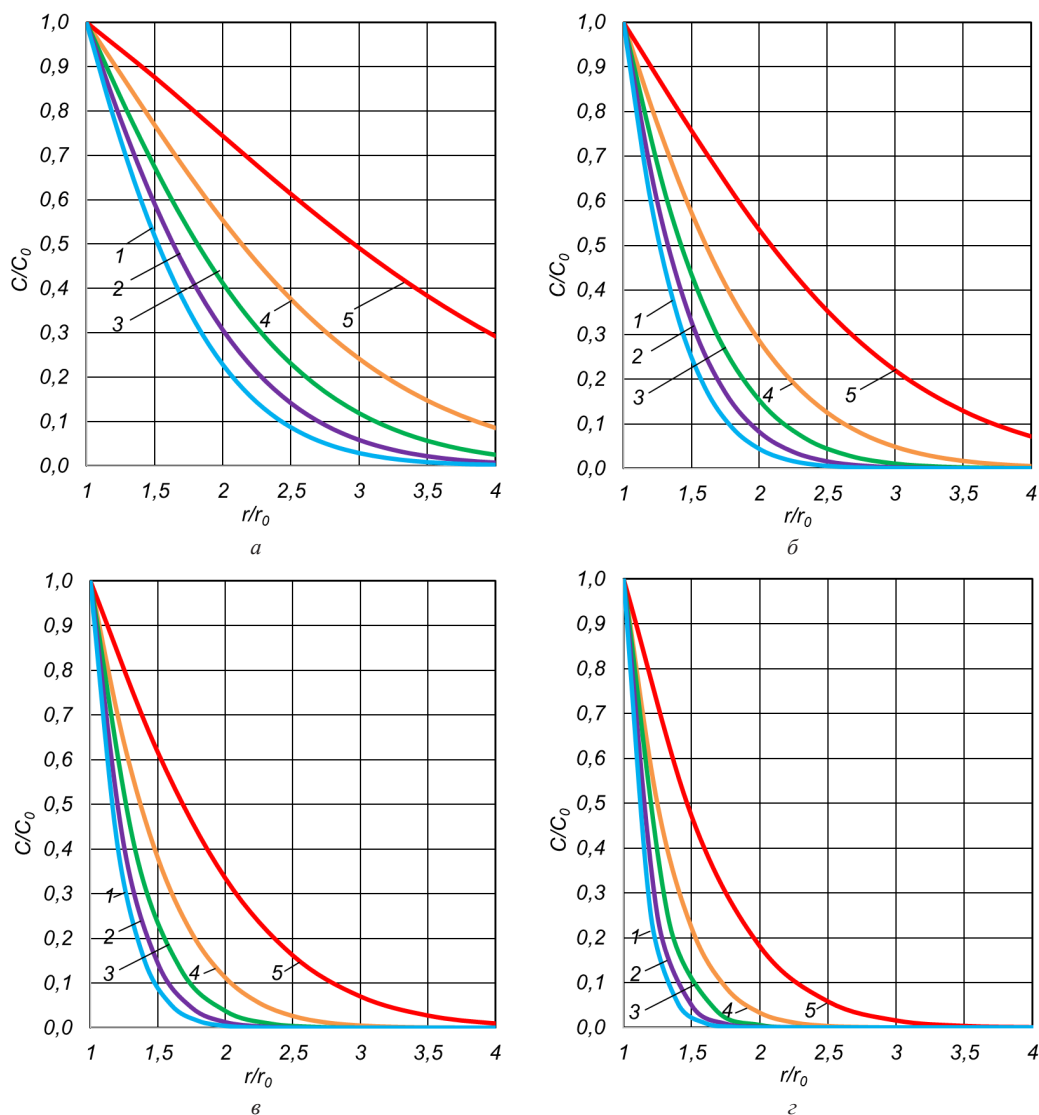


Рис. 4. Зависимость изменения относительной концентрации  $C/C_0$  от отношения радиусов  $r/r_0$  при различных температурах масла  $T$ : а – 313 К; б – 333 К; в – 353 К; г – 373 К, и различных значениях внутреннего радиуса фильтроэлемента  $r_0$ : 1 –  $10 \cdot 10^{-3}$  м; 2 –  $8 \cdot 10^{-3}$  м; 3 –  $6 \cdot 10^{-3}$  м; 4 –  $4 \cdot 10^{-3}$  м; 5 –  $2 \cdot 10^{-3}$  м

и  $T = 373$  К (рис. 3, г). Скорость фильтрования моторного масла  $v_0$  составляла  $10^{-5}$  м/с.

Результаты полученных зависимостей, представленные на рис. 3, свидетельствуют, с одной стороны, о влиянии диаметров волокон  $D$  на геометрические параметры фильтроэлемента, обеспечивающего требуемую степень очистки. С ростом диаметров волокон геометрические размеры фильтроэлемента возрастают. С другой стороны, повышение температуры  $T$  очищаемого моторного масла позволяет уменьшить геометрические параметры фильтроэлемента даже путем использования волокон большего размера.

На рис. 4 представлены результаты расчетов процесса осаждения частиц сажи, диаметром  $d$ ,

равным  $0,5 \cdot 10^{-6}$  м на цилиндрическом волокновом фильтроэлементе пористостью  $\Pi = 0,4$  из волокон диаметром  $D = 50$  мкм с различными значениями внутреннего радиуса  $r_0$ , равными  $2 \cdot 10^{-3}$ ,  $4 \cdot 10^{-3}$ ,  $6 \cdot 10^{-3}$ ,  $8 \cdot 10^{-3}$  и  $10 \cdot 10^{-3}$  м, при различных температурах:  $T = 313$  К (рис. 4, а);  $T = 333$  К (рис. 4, б);  $T = 353$  К (рис. 4, в) и  $T = 373$  К (рис. 4, г). Скорость фильтрования моторного масла  $v_0$  составляла  $10^{-5}$  м/с.

Полученные результаты расчетов (рис. 4) показывают, что как с увеличением внутреннего радиуса  $r_0$ , так и с увеличением температуры масла  $T$  габариты (толщина) фильтроэлемента уменьшаются.

**Заключение.** С использованием полученного решения уравнения Ивасаки для случая радиального фильтрования проведены расчеты процесса очистки моторного масла от частиц сажи при различных температурах, диаметрах волокон и внутренних радиусах цилиндрического волоконного фильтроэлемента.

Установлено, что варьирование параметрами пористой среды (диаметром волокон), размерами фильтроэлемента (внутренним радиусом), а также режимами фильтрования (температурой) позволяет определять габаритные размеры фильтроэлемента, обеспечивающего требуемую степень очистки.

### Литература

1. **Fitch, J.** Oil analysis basics / J. Fitch, D. Troyer. – 2 Ed. – Tulsa : Noria Corporation, 2010. – 198 p.
2. **Soot-in-Oil 3D** Volume Reconstruction Through the Use of Electron Tomography: An Introductory Study / A. La Rocca [et al.] // Tribology Letters. – 2015. – Vol. 61 (1). – doi:10.1007/s11249-015-0625-z
3. **Капцевич, В. М.** Отличительные особенности глубинного радиального фильтрования в цилиндрических фильтроэлементах / В. М. Капцевич, В. К. Корнеева, И. В. Закревский // Порошковая металлургия : респ. межвед. сб. науч. тр. – Минск, 2022. – Вып. 45. – С. 122–126.
4. **Корнеева, В. К.** Глубинное радиальное фильтрование в волоконных фильтроэлементах / В. К. Корнеева, В. М. Капцевич, И. В. Закревский // Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия, сварка : материалы 15-й Междунар. науч.-техн. конф., (Минск, 14–16 сент. 2022 г.). Нац. акад. наук Беларуси; редкол.: А. Ф. Ильющенко (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2022. – С. 237–241.
5. **Капцевич, В. М.** Расчет процесса очистки моторного масла от частиц сажи методом радиального фильтрования / В. М. Капцевич, В. К. Корнеева, И. В. Закревский // Порошковая металлургия: инженерия поверхности, новые порошковые композиционные материалы. Сварка = Powder Metallurgy: Surface Engineering, New Powder Composite Materials : сб. докл. 17-го Междунар. симп., Минск, 5–7 апр. 2023 г.: в 2 ч. / Нац. акад. наук Беларуси; редкол.: А. Ф. Ильющенко (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2023. – Ч. 1. – С. 116–120.
6. **Очистка** и регенерация смазочных материалов в условиях сельскохозяйственного производства / В. М. Капцевич [и др.]. – Минск : БГАТУ, 2007. – 232 с.

### INFLUENCE OF TEMPERATURE ON THE PROCESS OF ENGINE CLEANING OIL FROM SOOT PARTICLES WITH RADIAL FILTERING

V. M. Kapceovich, V. K. Korneeva, I. V. Zakrevskij

*Belarusian State Agrarian Technical University Independence Ave., 99, 220023, Minsk, Belarus,  
tel.: 8 (017) 267-12-54, e-mail: lerakor1974@mail.ru*

*For the case of radial motor oil filtration from soot particles, varying the parameters of the porous medium and filtration modes, the possibility of determining the overall filter element dimensions that provides the required degree of purification has been theoretically shown.*