



MATHEMATICAL MODEL FOR SIMULATION OF OPERATION OF CENTRIFUGAL OIL FILTER OF DIESEL LOCOMOTIVE

Kasimov Obidzhon Toirdzhonovich¹
Keldibekov Zokirbek Olloberdievich²

¹candidate of technical sciences, associate professor of the Department of "Locomotives and locomotive equipment",

²assistant of the Department of "Locomotives and locomotive equipment", State Transport University, Uzbekistan, Tashkent
<https://doi.org/10.5281/zenodo.17035659>

ARTICLE INFO

Received: 25th August 2025

Accepted: 30th August 2025

Online: 31st August 2025

KEYWORDS

Diesel engines of diesel locomotives, diesel oil system, centrifugal oil filter of a diesel locomotive, mathematical model for simulating the operation of a centrifugal oil filter of a diesel locomotive, algorithm, program for the MATHCAD 15 programming environment.

ABSTRACT

The article presents a mathematical model for simulating the operation of a centrifugal oil filter of a diesel locomotive, allowing to evaluate the efficiency of their operation and the quality of screening of particles of different sizes during operation, numerical studies were carried out in the programming environment MATHCAD 15.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАБОТЫ ЦЕНТРОБЕЖНОГО МАСЛЯНОГО ФИЛЬТРА ДИЗЕЛЯ ТЕПЛОВОЗА

Касимов Обиджон Тоирджонович¹
Келдибеков Зокирбек Оллобердиевич²

¹доктор (PhD) технических наук, доцент кафедры "Локомотивы и локомотивное хозяйство",

Засистент кафедры "Локомотивы и локомотивное хозяйство", Ташкентский государственный транспортный университет, Узбекистан, Ташкент
<https://doi.org/10.5281/zenodo.17035659>

ARTICLE INFO

Received: 25th August 2025

Accepted: 30th August 2025

Online: 31st August 2025

ABSTRACT

В статье представлена математическая модель для моделирования работы центробежного масляного фильтра дизеля тепловоза, позволяющие оценить эффективность их работы и качество отсева частиц разных размеров в процессе эксплуатации, численные исследования проведены в среде программирования MATHCAD 15.

**KEYWORDS**

Дизельные двигатели локомотивов, дизельная масляная система, центробежный масляный фильтр дизеля тепловоза, математическая модель для моделирования работы центробежного масляного фильтра дизеля тепловоза, алгоритм, программа для среды программирования MATHCAD 15.

Расчет работы центробежного фильтра масляной системы дизеля, а также моделирование работы и оценка эффективности систем очистки моторного масла различных серий тепловозов представлено в научных работах [1,2,3,4].

Нами в статье [5] дана разработанная методика для расчета масляного фильтра дизеля включает в себя определение оптимального размера, пропускной способности и тонкости фильтрации в зависимости от характеристик двигателя, условий эксплуатации и типа используемого масла. Основная цель – обеспечить эффективную очистку масла от загрязняющих частиц, предотвращая износ двигателя и продлевая его ресурс. Предлагаемая методика расчета основана на научных работах [3÷4].

Наибольший эффект очистки масла в масляной системе дизеля тепловоза достигается посредством применения центробежных фильтров. Центробежные аппараты обеспечивают достаточную тонкость очистки масла и возможность их неоднократного применения.

Если расстояние от оси вращения ротора OO равно R , то момент количества движения вытекающего объема жидкости (масла), создающего вращение центрифуги будет равен

$$M_{кр} = R \cdot \rho_{ж} \cdot V_{ж} \cdot (V_{\phi} - n \cdot R), \quad (1)$$

где n – частота вращения ротора центрифуги.

Используя уравнение (1), можно записать дифференциальное уравнение движения центрифуги в виде [3,4]

$$J \cdot \frac{dn}{dt} = M_{кр} = R \cdot \rho_{ж} \cdot V_{ж} \cdot (V_{\phi} - n \cdot R), \quad (2)$$

где J – момент инерции ротора центрифуги масляного фильтра дизеля относительно оси вращения OO ;

$$V_{ж} = V_{\phi} \cdot S = V_{\phi} \cdot \pi \cdot \left(\frac{d_{\phi\Pi}}{2}\right)^2 = \alpha \cdot \pi \cdot \left(\frac{d_{\phi\Pi}}{2}\right)^2 \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{P_{pp}}{\rho_{ж}}}. \quad (3)$$

где α – коэффициент сжатия струи масла; $r = \frac{d_{\text{ФП}}}{2}$ – радиус фильтрующей поверхности; $V_{\text{Ф}}$ – скорость фильтрации масла.

Средняя скорость фильтрации $V_{\text{Ф}}$ равна [3÷4]

$$V_{\text{Ф}} = \sqrt{2 \cdot \frac{P_{\text{РР}} - P_{\text{ОЧМ}}}{\rho_{\text{Ж}}} + 2 \cdot g \cdot h}. \quad (4)$$

Если давление $P_{\text{РР}}$ велико по сравнению с $P_{\text{ОЧМ}}$ (атмосферное), то пренебрегая $P_{\text{ОЧМ}}$ и h , получим
$$V_{\text{Ф}} = \sqrt{2 \cdot \frac{P_{\text{РР}}}{\rho_{\text{Ж}}}}. \quad (5)$$

Подставим в уравнение (2) $V_{\text{Ж}}$ и $V_{\text{Ф}}$ из уравнений соответственно (3) и (4), получим

$$J \cdot \frac{dn}{dt} = R \cdot \rho_{\text{Ж}} \cdot \pi \cdot \left(\frac{d_{\text{ФП}}}{2}\right)^2 \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{P_{\text{РР}}}{\rho_{\text{Ж}}}} \cdot \left(\sqrt{2 \cdot \frac{P_{\text{РР}}}{\rho_{\text{Ж}}}} - n \cdot R\right). \quad (6)$$

Когда давление $P_{\text{РР}}$ и, следовательно, скорость фильтрации $V_{\text{Ф}}$ постоянны, решение уравнения (6) можно записать в виде

$$n = \frac{1}{R} \cdot \left[V_{\text{Ф}} - (V_{\text{Ф}} - n_0 \cdot R) \cdot e^{\frac{R \cdot \rho_{\text{Ж}} \pi r V_{\text{Ф}} t}{J}} \right]. \quad (7)$$

При вращении ротора центрифуги также действует момент сопротивления $M_{\text{СОПР}}$. Этот момент зависит от трения в подшипниках и от скорости вращения ротора. При расчетах принимается

$$M_{\text{СОПР}} = M_0 + b_c \cdot n, \quad (8)$$

где M_0 – момент сопротивления в начале вращения ротора;

b_c – скорость нарастания момента сопротивления.

В этом случае с учетом уравнения (6) уравнение движения ротора будет иметь вид [3,4]

$$J \cdot \frac{dn}{dt} = M_{\text{кр}} - M_{\text{СОПР}} = R \cdot \rho_{\text{Ж}} \cdot \pi \cdot \left(\frac{d_{\text{ФП}}}{2}\right)^2 \cdot V_{\text{Ф}} \cdot (V_{\text{Ф}} - n \cdot R) - (M_0 + b_c \cdot n). \quad (9)$$

Отсюда

$$\frac{dn}{\left(R \cdot \rho_{\text{Ж}} \cdot \pi \cdot \left(\frac{d_{\text{ФП}}}{2}\right)^2 \cdot V_{\text{Ф}}^2 - M_0\right) - \left(R^2 \cdot \rho_{\text{Ж}} \cdot \pi \cdot \left(\frac{d_{\text{ФП}}}{2}\right)^2 \cdot V_{\text{Ф}} + b_c\right) \cdot n} = \frac{dt}{J}.$$

Решение будет иметь вид

$$n = \frac{1}{\left(R^2 \cdot \rho_{\text{Ж}} \cdot \pi \cdot \left(\frac{d_{\text{ФП}}}{2}\right)^2 \cdot V_{\text{Ф}} + b_c\right)} \cdot K_1, \quad (10)$$

где обозначено

$$K_1 = \left(R \cdot \rho_{\text{Ж}} \cdot \pi \cdot \left(\frac{d_{\text{ФП}}}{2}\right)^2 - M_0\right) - C \cdot e^{\frac{R \cdot \rho_{\text{Ж}} \pi r V_{\text{Ф}} t}{J}}.$$

При условии, что $t = 0, n = n_0$ (при установившемся движении) и

$$C = \left(R \cdot \rho_{\text{Ж}} \cdot \pi \cdot \left(\frac{d_{\text{ФП}}}{2}\right)^2 - M_0\right) - \left(R^2 \cdot \rho_{\text{Ж}} \cdot \pi \cdot \left(\frac{d_{\text{ФП}}}{2}\right)^2 \cdot V_{\text{Ф}} + b_c\right) \cdot n_0$$

решение примет вид



$$n = \frac{\left(R \cdot \rho_{\text{ж}} \cdot \pi \cdot \left(\frac{d_{\text{ФП}}}{2} \right)^2 - M_0 \right)}{\left(R^2 \cdot \rho_{\text{ж}} \cdot \pi \cdot \left(\frac{d_{\text{ФП}}}{2} \right)^2 \cdot V_{\text{ф}} + b_{\text{с}} \right)} - \left[\frac{\left(R \cdot \rho_{\text{ж}} \cdot \pi \cdot \left(\frac{d_{\text{ФП}}}{2} \right)^2 - M_0 \right)}{\left(R^2 \cdot \rho_{\text{ж}} \cdot \pi \cdot \left(\frac{d_{\text{ФП}}}{2} \right)^2 \cdot V_{\text{ф}} + b_{\text{с}} \right)} - n_0 \right] \cdot e^{\frac{R \cdot \rho_{\text{ж}} \pi r V_{\text{ф}} t}{J}}. \quad (11)$$

В пределе получим угловую скорость вращения ротора центрифуги масляного фильтра дизеля при установившемся движении

$$n = \frac{\left(R \cdot \rho_{\text{ж}} \cdot \pi \cdot \left(\frac{d_{\text{ФП}}}{2} \right)^2 - M_0 \right)}{R^2 \cdot \rho_{\text{ж}} \cdot \pi \cdot \left(\frac{d_{\text{ФП}}}{2} \right)^2 \cdot V_{\text{ф}} + b_{\text{с}}}. \quad (12)$$

Это соотношение (12) может быть положено в основу расчета угловой скорости вращения ротора центрифуги n при стабильном режиме работы.

С течением времени центробежный масляный фильтр засоряется, что приводит к отложению продуктов засорения на стенках центрифуги. Причем толщина отложений весьма значительная. При этом должен меняться момент инерции ротора.

$$J_{\text{ротора}} = J_{\text{корпуса}} + J_{\text{масла}} + J_{\text{загрязнений}}, \quad (13)$$

где $J_{\text{ротора}}$ - момент инерции ротора центрифуги;

$J_{\text{корпуса}}$ - момент инерции корпуса ротора;

$J_{\text{масла}}$ - момент инерции масла в роторе;

$J_{\text{загрязнений}}$ - момент инерции слоя загрязнений.

$$J_{\text{масла}} = \frac{m_{\text{М}} \cdot R_{\text{М}}^2}{2} = \frac{\pi \cdot h \cdot (R - \delta)^4 \cdot \rho_{\text{ж}}}{2}, \quad (14)$$

где $m_{\text{М}}$ - масса масла в роторе;

$R_{\text{М}}$ - радиус масляного слоя;

h - высота ротора; δ - толщина слоя отложений.

$$J_{\text{загрязнений}} = \frac{\pi \cdot h \cdot \rho_{\text{з}} \cdot [R^4 - (R - \delta)^4]}{2}, \quad (15)$$

где $\rho_{\text{з}}$ - плотность загрязнений.

$$J_{\text{ротора}} = J_{\text{корпуса}} + \frac{\pi \cdot h \cdot (R - \delta)^4 \cdot \rho_{\text{ж}}}{2} + \frac{\pi \cdot h \cdot \rho_{\text{з}} \cdot [R^4 - (R - \delta)^4]}{2}, \quad (16)$$

Момент инерции корпуса ротора $J_{\text{ротора}}$ в процессе эксплуатации не меняется.

Для проведения численных исследований был разработан алгоритм и составлена программа расчета для программирования MATHCAD 15.

По результатам аналитико-численных исследований, проведенных авторами, можно сделать следующие обобщающие выводы:

1. В данной статье выполнено математическое моделирование работы центробежного масляного фильтра дизеля тепловоза, позволяющие оценить эффективность его работы и качество отсева частиц разных размеров в процессе эксплуатации.

2. По результатам проведенных численных исследований можно сделать следующие выводы:

- как видно из рисунка 1, при предельном загрязнении масляного фильтра ($\delta = 15 \text{ мм} = 15 \cdot 10^{-3}$) м, момент инерции ротора $J_{\text{роторазаг}}$ увеличивается всего лишь на 2,039 %;

$$J_{\text{роторазаг}}, \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

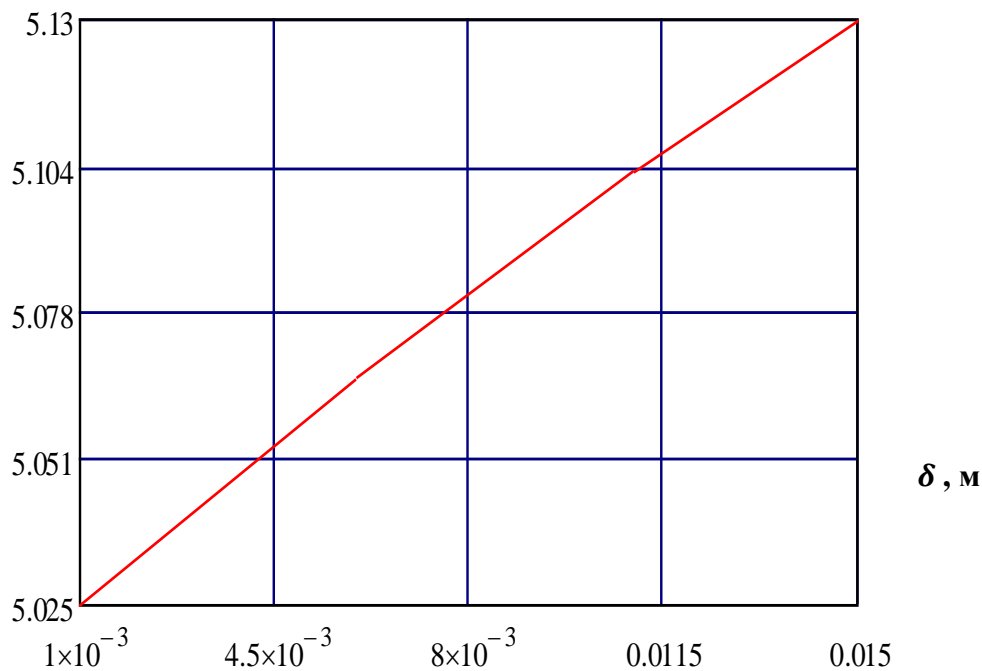


Рисунок 1. Влияние толщины слоя отложений δ на момент инерции ротора $J_{\text{ротора}}$.

- из графика (рисунок 2) видно, что скорость нормальной фильтрации $V_{\text{ф}}$ меняется от 5 м/с до 18,056 м/с в зависимости от плотности масла $\rho_{\text{м}}$ при варьировании от 950 до 1075 кг/м³, причем чем больше плотность неочищенного масла, тем меньше скорость фильтрации.

3. По результатам аналитико-численных исследований, проведенных в данной статье, предлагается «Методика расчета динамических параметров для математической модели функционирования центробежного масляного фильтра дизеля тепловоза», состоящая из 7 этапов:

1 этап. Расчет осаждения частиц в поле центробежных сил. Расчет центробежной силы, действующая на частицу в масляном фильтре.

2 этап. Расчет скорости фильтрации $V_{\text{ф}}$.

3 этап. Оценка параметров фильтрования в поле центробежных сил.

4 этап. Расчет угловой скорости вращения ротора центрифуги при установившемся движении n .

5 этап. Изменение момента инерции ротора центрифуги $J_{\text{ротора}}$ в зависимости от количества отложений (загрязнения) δ .

6 этап. Расчет пусковой мощности фильтрующей центрифуги.

$V_{\text{ф}}, \text{ м/с}$

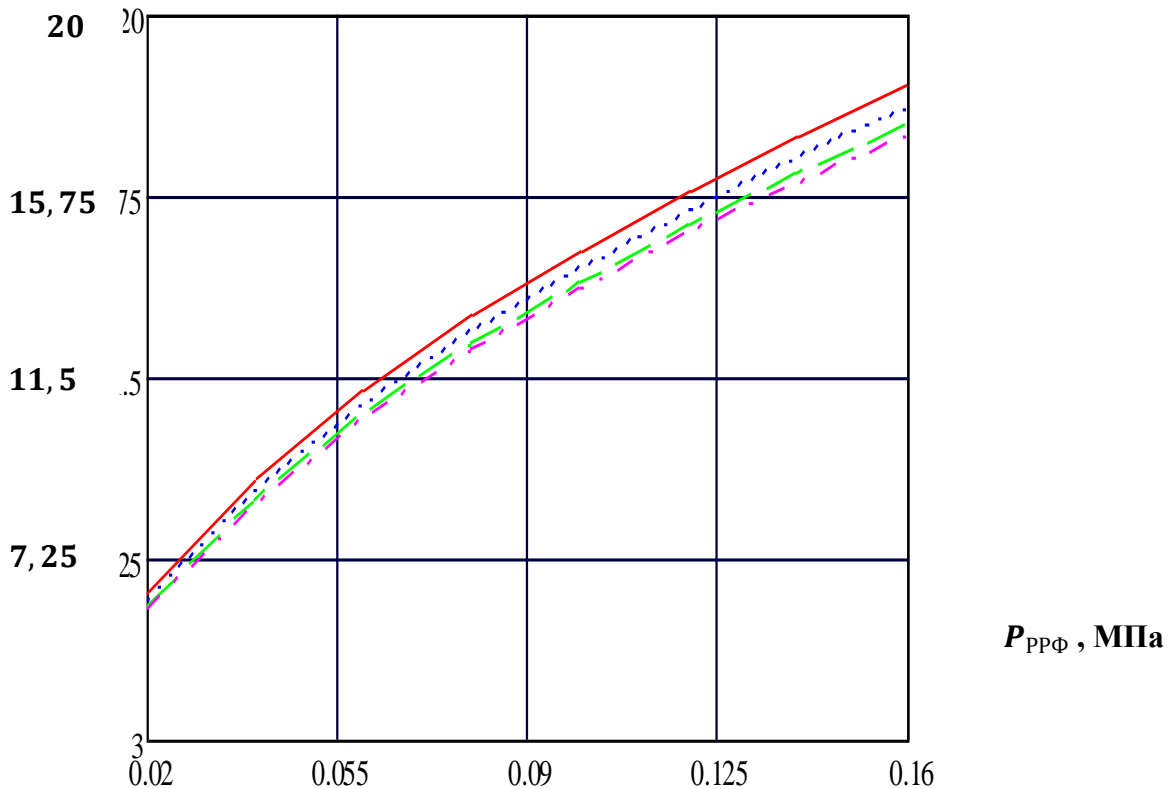


Рисунок 2. График нормальной фильтрации для скорости фильтрации V_{ϕ} в зависимости от давления в рабочей камере с неочищенным маслом на входе $P_{pp\phi}$ и плотности масла ρ_M ;

— плотность неочищенного масла $\rho_M = 950 \text{ кг/м}^3$; плотность масла $\rho_M = 1000 \text{ кг/м}^3$; — плотность масла $\rho_M = 1025 \text{ кг/м}^3$; - - - - - плотность масла $\rho_M = 1075 \text{ кг/м}^3$.

7 этап. Динамическая модель центробежного масляного фильтра дизеля тепловоза с дополнительным самоочищением путем вращения фильтрующей поверхности (предлагаемой нами конструкции [6]).

4. Нами предложена новая конструкция центробежного масляного фильтра дизеля тепловоза с дополнительным самоочищением путем вращения фильтрующей поверхности, на который подана заявка на изобретение на Патент Республики Узбекистан (№ IAP 20250384, от 27.06.2025) [6].

References:

1. Теория и конструкция локомотивов: Учебник для вузов ж.-д. транспорта / Г.С. Михальченко, В.Н. Кашников, В.С. Коссов, В.А. Симонов; под ред. Г.С. Михальченко. - М.: Маршрут, 2006. - 584 с.



2. Володин А.И. Локомотивные энергетические установки: Учебник для вузов / А. И. Володин [и др.]; ред. А. И. Володин. -М.: Желдориздат, 2002. -715 с.
3. Качанова Л. С. Совершенствование очистки отработанного моторного масла центробежными аппаратами. // Дисс. на соискание степени к.т.н.: 05.20.03. – зерноград, 2004. – 152 с.
4. Овчаренко С. М. Моделирование работы и оценка эффективности систем очистки моторного масла различных серий тепловозов. / С. М. Овчаренко // Вестник РГУПС / Ростовский гос. ун-т путей сообщения. - Ростов-на-Дону, 2006. - № 1. - С. 21 - 27.
5. Касимов О.Т., Келдибеков З.О. Методика расчета масляного фильтра дизеля тепловоза. // Eurasian Journal of mathematical theory and computer sciences. / Innovative Academy Research Support Center. Volume 5, Issue 6, June 2025. – P.17-21. <https://doi.org/10/5281/zenodo.15706545>
6. Масляный фильтр дизеля тепловоза. Заявка на изобретение на Патент Республики Узбекистан № IAP 20250384, от 27.06.2025.