

В.Г. ДРОКОВ¹, *д-р техн. наук*

В.В. ДРОКОВ², *канд. техн. наук*

А.Д. КАЗМИРОВ¹, *канд. физ-мат. наук*

В.В. МУРЫЩЕНКО³, *канд. техн. наук*

¹Иркутский государственный университет (Иркутск, Россия)

²Байкало-Амурский институт железнодорожного транспорта (Тында, Россия)

³ООО «ЦСД-ТМХ» (Москва, Россия)

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАКОПЛЕНИЯ ЧАСТИЦ ИЗНАШИВАНИЯ В МАСЛОСИСТЕМЕ ТЕПЛОВОЗНЫХ ДИЗЕЛЕЙ МЕТОДОМ МОНТЕ-КАРЛО

Аннотация: в работе рассматривается имитационное моделирование процесса накопления частиц износа в маслосистеме тепловозного дизеля с учетом источников, стоков и параметров фильтрующей системы. Показано, что при типичных значениях параметров модели, характерных для реальных тепловозных дизелей отсутствуют стационарные решения для значений массовой доли металлической примеси. Основная масса частиц износа оседает на маслофилт্রে (ах) и для корректного диагностирования технического состояния необходимо анализировать частицы износа, накопленные на масляном филт্রে.

Ключевые слова: математическое моделирование, частицы изнашивания, накопление частиц изнашивания на маслофилт্রে, массовая доля, тепловозный дизель, распределение частиц по размерам, маслофилтър, метод Монте-Карло.

При диагностировании технического состояния тепловозных дизелей используют результаты спектрального анализа масла на наличие металлической примеси согласно ГОСТ № 20759-90. Данным стандартом определены предельные значения массовой доли основных элементов, когда считается, что дизель имеет повреждение или неисправен и необходимо проводить его техническое обслуживание. Например, предельными значениями являются содержания железа Fe 300 г/т и меди Cu 100 г/т. С учетом того, что объем маслосистемы дизеля может составлять порядка 1000 л, то масса частиц изнашивания накопленных во всем объеме масла будет около 300 г. Принимая во внимание, что основная масса крупных частиц будет улавливаться системами очистки масла, то накопленная на филт্রে масса частиц износа будет еще больше. При таких содержаниях это будет эквивалентно катастрофическому износу деталей дизеля. Для оценки достоверности диагностирования технического состояния по параметру массовой доли металлов в масле, проведено имитационное моделирование методом Монте-Карло процесса накопления частиц износа в маслосистеме тепловозных дизелей. Такое моделирование ранее было успешно применено для авиационных газотурбинных двигателей [1].

Краткая постановка задачи. Рассматривается упрощенная маслосистема дизеля, состоящая из картера, маслонасоса и филттра. Маслонасос прокачивает масло через трущиеся детали, которые генерируют частицы изнашивания

(источник), которые в свою очередь, попадают на фильтр и с некоторой вероятностью проходят сквозь него или оседают на нем. В процессе работы дизеля происходит уменьшение объема масла за счет выгорания и выдавливание через уплотнительные элементы, что приводит к удалению частиц износа из маслосистемы (сток). При достижении объема масла минимального значения, происходит долив чистого масла, не содержащего частиц износа, что приводит к уменьшению массовой доли.

Частицы изнашивания генерируются случайным образом по заданной функции распределения по размерам до достижения определенной суммарной массы определяемой из скорости износа деталей и скорости прокачки масла и описываются выражением (1)

$$P(D, \mu, \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma D}} e^{-\left(\frac{(\ln(D) - \mu)^2}{2\sigma^2}\right)} \quad (1)$$

где: D – размер частиц, $\mu = \ln(D_\mu)$ и $\sigma = \ln(D_\sigma)$.

Процесс генерации частиц износа описывался функцией распределения по размерам, имеющий логнормальный вид. Данный статистический закон распределения дискретной примеси подтверждается многочисленными исследователями и экспериментальными данными [2].

Фильтрация частиц описывается вероятностным процессом (Гауссовым фильтром), который задает вероятность прохождения фильтра частицами определенного размера:

$$F(D, D_\mu^\phi, D_\sigma^\phi) = 1 - \int_{-\infty}^D \frac{1}{\sqrt{2\pi} D_\sigma^\phi} e^{-\left(\frac{(x - D_\mu^\phi)^2}{2(D_\sigma^\phi)^2}\right)} dx, \quad (2)$$

где D_μ^ϕ - средний диаметр ячеек фильтра, а $(D_\sigma^\phi)^2$ - их дисперсия.

Для проведения имитационного моделирования были заданы входные параметры, разделенные на две группы – известные и неизвестные.

К известным параметрам модели относятся:

Объем масла в маслосистеме дизеля V , значение этого параметра задавали равным 1000 л. Скорость прокачки масла W , согласно [3] скорость прокачки составляет порядка 500 л/мин, т.е. за 2 минуты все масло в маслосистеме пройдет через систему фильтрации. Скорость выдавливания и выгорания масла W_O , его значение можно рассчитать по объему доливаемого масла и времени проведения ТО. Типично доливают 50-100 литров масла через 72 часа работы дизеля, соответственно W_O будет в диапазоне 10-25 мл/мин [3]. Время накопления частиц износа T задавали равным 4000 минут работы дизеля.

К неизвестным параметрам относятся:

Параметры логнормального распределения генерируемых износных частиц D_μ и D_σ . Из анализа распределения частиц изнашивания в пробах масла и на фильтре, проведенного на электронном микроскопе, приблизительно значения будут в диапазонах D_μ - 20-100 мкм, D_σ . 2-5 мкм. Параметры фильтрующей

системы D_μ^ϕ - средний диаметр ячеек фильтра, и $(D_\sigma^\phi)^2$ - их дисперсия. Из тех же данных, полученных на электронном микроскопе, их величины находятся в диапазонах D_μ^ϕ 40-100 мкм, D_σ^ϕ 2-5 мкм. Скорость генерации частиц износа VM. Значение скорости можно, оценить, очень грубо, по предельному содержанию железа 300 г/т, накопленному за время между ТО 72 часа в объеме маслосистемы 1000 л. Получается скорость поступления примеси VM~ 10-100 мг/мин.

Моделирование проведено в несколько этапов. На первом этапе была оценена скорость уменьшения массовой доли железа за счет оседания частиц на фильтре с исходной 300 г/т при отсутствии источника и стока частиц со следующими параметрами $D_\mu = 80$ мкм, $D_\sigma = 5$ мкм, $D_\mu^\phi = 80$ мкм, $D_\sigma^\phi = 5$ мкм (рис.1). Меньше чем за один час исходное содержание уменьшается на порядок, а за 100 мин уменьшается с 300 г/т до 12 г/т. Это говорит о том, что система фильтрации эффективно удаляет крупные частицы, оставляя в системе только мелкие частицы до 20 мкм. Для объяснения большей концентрации необходимо задавать источник частиц.

На втором этапе проведен учет источника за счет износа и стока частиц за счет выдавливания и выгорания масла (рис. 2). Заданы следующие значения источника и стока: WO 25 мл/мин, VM 100 мг/мин, T 4000м.

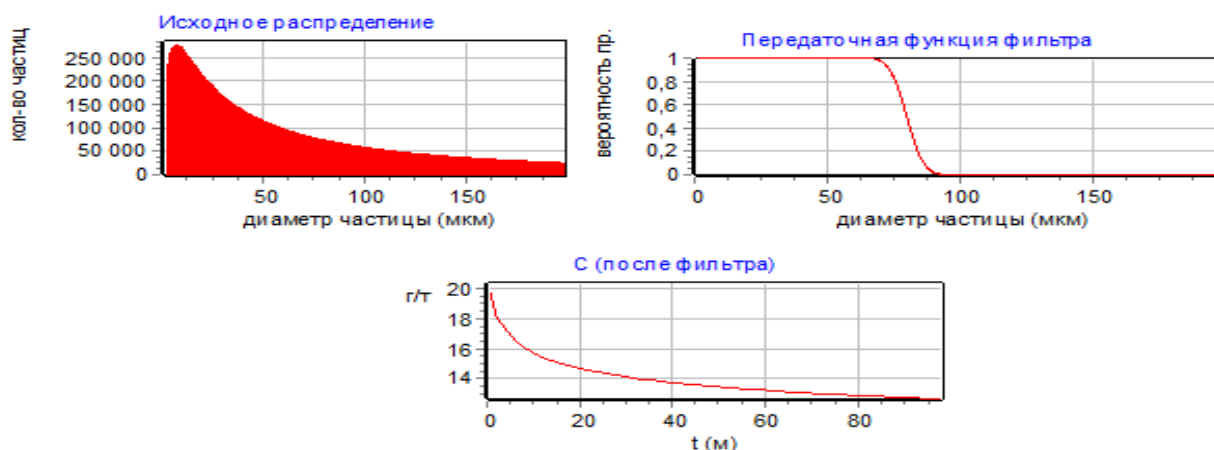


Рис.1. Скорость уменьшения массовой доли железа за счет оседания частиц на фильтре

За 72 часа, при максимальной скорости поступления примеси, итоговая массовая доля в масле составила всего 23 г/т. Все время происходило только увеличение массовой доли без достижения стационарного значения, кроме момента времени 2000 мин, когда в систему было долито 50 литров чистого масла, и массовая доля упала с 17,5 г/т до 16,6 г/т. За 4000 мин на фильтре накопилось 670 г частиц износа со средним размером около 100 мкм и выдавлено или выгорело 16 г. В результате основная масса частиц износа осела на фильтре, а в масле накопилось всего 23 г со средним размером 20 мкм.

Из этого результата следует вывод, что по массовой доле металлической примеси в пробе масла невозможно провести корректный учет износа деталей. Основная диагностическая информация находится в частицах износа на

фильтре. Похожие результаты получились и для других значения параметров модели. Предельное содержание 300 г/т не достижимо, что не раз показано в результатах ХТЛ, впрочем, как и в самом ГОСТе, при адекватных значениях источника и стока части износа.

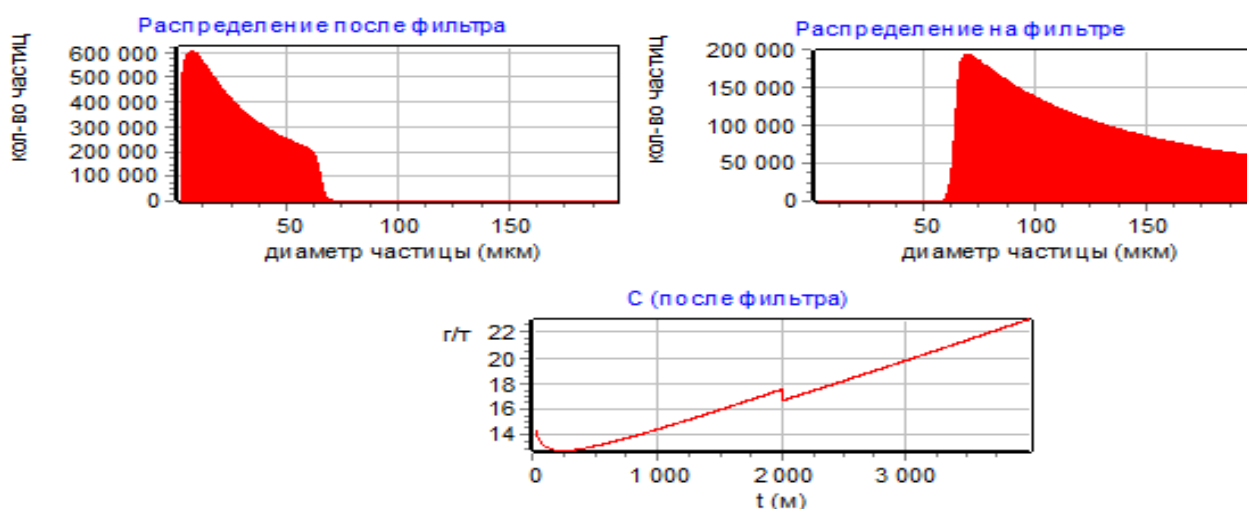


Рис.2. Распределение частиц по размерам после фильтрации, уловленных фильтром и изменение массовой доли в картере дизеля.

Таким образом, результаты моделирования показали, что величина массовой доли металлической примеси в маслосистеме тепловозных дизелей не может быть использована для корректной оценки технического состояния тепловозного дизеля. Равновесное содержание примеси, особенно ее предельное значение не достижимо в реальных условиях эксплуатации. Основная масса частиц износа оседает на фильтре и для оценки технического состояния дизеля необходимо анализировать пробу, отобранную с маслофильтра.

Список литературы

1. Моделирование процессов фильтрации металлической дискретной примеси в маслосистеме ГТД методом Монте-Карло / В.Г. Дроков, В.В. Дроков, А.Д. Казмиров, А.Ю. Ходунаев // Научный вестник ГосНИИ ГА. – 2019. – № 27. – С. 96-107.
2. Дроков, В.В. Метод диагностирования технического состояния узлов трения на всех этапах жизненного цикла авиационных ГТД по параметрам частиц изнашивания : автореф. дис. канд. техн. наук : 2.9.6 / Дроков Виктор Владиславович ; Моск. техн. ун-т гражданской авиации (МГТУГА). – М., 2026. – 18 с.
3. Минаков, В. А. Совершенствование технологии диагностирования тепловозного дизеля по результатам контроля содержания продуктов износа в моторном масле : автореф. дис. канд. техн. наук : 05.22.07 / Минаков Виталий Анатольевич ; Омский техн. ун-т путей сообщения (ОмГУПС (ОМИИТ)). – Омск, 2019. – 19 с.

Контакты:

spectrosib@gmail.com (Дроков Виктор Григорьевич)
drokovvictor@yandex.ru (Дроков Виктор Владиславович)
kadm0909@gmail.com (Казмиров Александр Дмитриевич)
dl-lr@yandex.ru (Мурыщенко Владимир Валерьевич)