

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ НАКОПЛЕНИЯ И УДАЛЕНИЯ
ЗАГРЯЗНЕНИЙ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО
СГОРАНИЯ ВОЕННЫХ МОБИЛЬНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ТЕХНИЧЕСКИХ
И ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ**

Мамарахимов Хамза Мамаджанович,
кандидат технических наук, доцент кафедры материального обеспечения,
Министерство обороны Республики Узбекистан
Университет военной безопасности и обороны

Аннотация

В статье исследованы закономерности накопления и удаления загрязнений в системах питания, смазки и воздухообеспечения двигателей внутреннего сгорания военных мобильных энергетических технических и транспортных средств. Разработаны математические модели изменения концентрации загрязнений в топливе, моторном масле и воздухе в процессе эксплуатации. Получены аналитические зависимости, позволяющие оценивать динамику загрязнения рабочих сред, определять требуемые параметры систем фильтрации и прогнозировать ресурс фильтрующих элементов. Установлены условия достижения динамического равновесия загрязнений в топливных баках, определены требования к пропускной способности и грязеемкости фильтров различных систем двигателя. Результаты исследования могут быть использованы при совершенствовании систем технического обслуживания и повышении эксплуатационной надежности двигателей военной и транспортной техники.

Ключевые слова: двигатель внутреннего сгорания, загрязнение топлива, загрязнение масла, воздушный фильтр, топливный фильтр, система смазки, техническое обслуживание, надежность, ресурс фильтров, военная техника.

Introduction

Annotatsiya

Mazkur maqolada harbiy mobil energetik texnik va transport vositalari ichki yonuv dvigatellarining yoqilg'i ta'minoti, moylash va havo ta'minoti tizimlarida ifloslanishlarning to'planishi hamda chiqarib yuborilishi jarayonlari tadqiq etilgan. Eksploatatsiya jarayonida yoqilg'i, motor moyi va havodagi ifloslantiruvchi zarrachalar konsentratsiyasining o'zgarishini tavsiflovchi matematik modellar ishlab chiqilgan. Filtrlash tizimlarining o'tkazuvchanlik qobiliyati va ifloslik sig'imini aniqlash usullari taklif etilgan. Olingan natijalar harbiy va transport texnikasi dvigatellarining ishonchliligini oshirish hamda texnik xizmat ko'rsatish xarajatlarini kamaytirishda qo'llanilishi mumkin.

Kalit so'zlar: ichki yonuv dvigateli, yoqilg'i ifloslanishi, motor moyi, havo filtri, yoqilg'i filtri, moylash tizimi, texnik xizmat ko'rsatish, ishonchlilik, filtr resursi, harbiy texnika.

Abstract

The paper investigates the processes of accumulation and removal of contaminants in the fuel, lubrication and air supply systems of internal combustion engines used in military mobile energy and transport vehicles. Mathematical models describing changes in contamination concentration in fuel, lubricating oil and intake air during engine operation have been developed. Analytical relationships have been obtained for assessing contamination dynamics in fuel tanks, lubrication systems and air-cleaning devices. Methods for determining filtration efficiency, throughput capacity and dirt-holding capacity of filtering elements are proposed. The obtained results can be used to improve the operational reliability of military and transport vehicle engines and reduce maintenance costs.

Keywords: internal combustion engine, fuel contamination, lubricating oil contamination, air filter, fuel filter, lubrication system, maintenance, reliability, filter service life, military vehicles.

Введение

Надежность и долговечность двигателей внутреннего сгорания военных мобильных энергетических технических и транспортных средств в значительной степени определяются чистотой топлива, моторного масла и воздуха, поступающих в двигатель. В процессе эксплуатации загрязняющие частицы проникают в рабочие среды на различных этапах хранения, транспортирования и использования горюче-смазочных материалов. Наличие механических примесей в топливе приводит к ускоренному износу топливной аппаратуры, нарушению процессов смесеобразования и снижению эффективности сгорания топлива.

Особенно остро данная проблема проявляется при эксплуатации военной техники в условиях высокой запыленности окружающей среды, характерной для пустынных и степных районов Республики Узбекистан. Согласно исследованиям ряда авторов, до 70–80 % случаев повышенного абразивного износа деталей цилиндропоршневой группы связано с проникновением пыли через систему воздухообеспечения двигателя.

Дополнительным фактором снижения ресурса двигателей является накопление загрязнений в моторном масле. В процессе работы двигателя в масло поступают продукты износа деталей, частицы нагара, продукты неполного сгорания топлива и пылевые частицы, проникшие через систему очистки воздуха. Накопление указанных загрязнений приводит к ухудшению смазывающих свойств масла, увеличению интенсивности изнашивания деталей и сокращению межремонтного ресурса двигателя. В связи с этим возникает необходимость комплексного исследования процессов накопления и удаления загрязнений в системе «воздух – топливо – масло» с целью разработки научно обоснованных рекомендаций по совершенствованию систем очистки и технического обслуживания двигателей внутреннего сгорания.

Актуальность исследования

Актуальность работы обусловлена необходимостью повышения надежности эксплуатации военной техники, сокращения затрат на техническое обслуживание и увеличение межремонтного ресурса двигателей внутреннего сгорания. Современные условия эксплуатации ВМЭТТС требуют повышения эффективности систем очистки топлива, масла и воздуха, обеспечивающих стабильную работу двигателей при воздействии неблагоприятных факторов внешней среды.

Цель исследования

Целью исследования является разработка математических моделей накопления и удаления загрязнений в системах питания, смазки и воздухообеспечения двигателей внутреннего сгорания военных мобильных энергетических технических и транспортных средств и обоснование путей повышения эффективности систем очистки.

Задачи исследования

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

- исследованы источники поступления загрязнений в двигатель;
- разработана математическая модель накопления загрязнений в топливном баке;
- исследованы процессы очистки топлива в различных типах топливных систем;
- разработаны зависимости для определения грязеемкости фильтров;
- исследована динамика загрязнения моторного масла;
- выполнен анализ процессов поступления атмосферной пыли в цилиндры двигателя;
- сформулированы рекомендации по совершенствованию систем очистки.

Научная новизна

Научная новизна исследования заключается в разработке комплексной модели процессов загрязнения рабочих сред двигателя, позволяющей учитывать одновременное влияние топлива, моторного масла и атмосферного воздуха на надежность эксплуатации двигателей внутреннего сгорания военной техники.

Обзор литературы

Проблемам загрязнения топлива и масел посвящено значительное количество исследований отечественных и зарубежных ученых. В работе Needelman и Madhavan рассмотрено влияние загрязнений моторного масла на интенсивность изнашивания дизельных двигателей. Авторами установлено, что увеличение концентрации твердых частиц приводит к росту абразивного износа деталей цилиндропоршневой группы и подшипников скольжения.

Green и Lewis исследовали влияние сажевых загрязнений моторного масла на процессы трения и изнашивания деталей двигателя. Полученные результаты подтвердили необходимость эффективной очистки масла на протяжении всего периода эксплуатации.

В исследованиях Stepień показано, что наличие твердых частиц в дизельном топливе является одной из основных причин отказов современных топливных систем высокого давления. Автором установлена прямая зависимость между уровнем загрязнения топлива и интенсивностью изнашивания прецизионных элементов топливной аппаратуры.

Современные направления совершенствования фильтрационных систем рассмотрены в работах Dong и соавторов, где выполнен анализ конструкций фильтров для очистки топлива и воздуха, применяемых в современных двигателях внутреннего сгорания.

Проведенный анализ литературных источников показал, что большинство исследований посвящено отдельным процессам загрязнения топлива, масла или воздуха. Вопросы комплексного описания процессов накопления и удаления загрязнений в системе «воздух – топливо – масло» для военной техники изучены недостаточно, что определяет научную значимость настоящего исследования.

1. Методика исследования. Исследование процессов накопления и удаления загрязнений в системах питания, смазки и воздухообеспечения двигателей внутреннего сгорания выполнено на основе методов математического моделирования, теории фильтрации, материального баланса и анализа эксплуатационных процессов военных мобильных энергетических технических и транспортных средств (ВМЭТТС).

Основу исследования составляет рассмотрение двигателя как сложной технической системы, в которую загрязняющие частицы поступают одновременно с топливом, моторным маслом и атмосферным воздухом. Аналогичный подход к оценке загрязнения рабочих сред двигателя рассматривается в работах Needelman и Madhavan [1], Green и Lewis [2], а также Stepień [5].

В процессе исследования были приняты следующие допущения

загрязнения равномерно распределены в объеме топлива и моторного масла;
объем воздуха, поступающего в топливный бак, равен объему израсходованного топлива;

остаточные загрязнения после проведения технического обслуживания отсутствуют;
влияние коррозии внутренних поверхностей топливного бака на уровень загрязнения топлива незначительно;

эффективность фильтрующих элементов в расчетном интервале эксплуатации принимается постоянной.

Указанные допущения широко используются при моделировании процессов загрязнения топлива и масел и позволяют получить аналитические зависимости, пригодные для инженерных расчетов [3, 6].

Методика исследования включает следующие этапы

Анализ поступления загрязнений в топливный бак.

Исследование процессов накопления загрязнений в топливе.

Определение закономерностей удаления загрязнений средствами фильтрации.

Оценка процессов загрязнения моторного масла.

Анализ поступления атмосферной пыли в цилиндры двигателя.

Определение ресурса фильтрующих элементов.

В качестве критерия эффективности системы очистки принято снижение концентрации загрязнений в рабочих средах двигателя при обеспечении заданного ресурса фильтрующих элементов [7, 8].

2. Математическая модель накопления загрязнений в топливном баке. Известно, что загрязнения, поступающие в двигатель, формируются тремя основными потоками: через топливо, моторное масло и атмосферный воздух [1, 5].

Наиболее значительный вклад в начальный период эксплуатации оказывает загрязнение топлива, поскольку механические примеси непосредственно воздействуют на элементы топливной аппаратуры, фильтрующие устройства и детали цилиндропоршневой группы [5].

После первой заправки топливного бака концентрация загрязнений соответствует загрязненности заправляемого топлива.

Общее количество загрязнений определяется выражением

$$G_B = C_3 V_n, \quad (1)$$

где:

G_B – количество загрязнений после заправки, г;

C_3 – концентрация загрязнений в топливе, г/л;

V_n – вместимость топливного бака, л.

Полученная зависимость соответствует общепринятому материальному балансу загрязняющих веществ в жидких средах [3].

Во время работы двигателя происходит одновременный расход топлива и поступление атмосферного воздуха через систему вентиляции бака. В результате изменение количества загрязнений описывается дифференциальным уравнением

$$d(V_T C_T) = -C_T dV_T + C_B dV_T, \quad (2)$$

где:

C_T – текущая концентрация загрязнений топлива;

C_B – концентрация загрязнений воздуха;

V_T – текущий объем топлива.

После интегрирования выражения (2) получаем зависимость текущей загрязненности топлива

$$C_T = C_B \ln \frac{V_n}{V_T} + C_3, \quad (3)$$

Анализ выражения (3) показывает, что концентрация загрязнений возрастает по логарифмическому закону по мере расходования топлива.

Аналогичные закономерности роста концентрации механических примесей в ограниченных объемах жидких сред были отмечены в работах по загрязнению топлив и масел [2, 4].

Перед очередной заправкой загрязненность топлива составит

$$C_0 = C_B \ln \frac{K_0}{1} + C_3, \quad (4)$$

где

$K_0 = \frac{V_0}{V_n}$ — коэффициент остатка топлива.

Количество загрязнений в остатке топлива определяется выражением

$$G_0 = C_0 V_0. \quad (5)$$

После повторных циклов эксплуатации концентрация загрязнений возрастает и после i -й заправки определяется зависимостью

$$C_{\Pi}^{(i)} C = \ln \frac{1}{K_0} \frac{K_0 - K_0}{1 - K_0} C_B + C_3, \quad (6)$$

Из выражения (6) следует, что при $K_0 < 1$ и большом количестве циклов заправки устанавливается стационарный режим загрязнения топлива:

$$C_{\Pi} = \ln \frac{1}{K_0} \frac{K_0}{1 - K_0} C_B + C_3, \quad (7)$$

Полученный результат имеет важное практическое значение, поскольку свидетельствует о существовании динамического равновесия между поступлением загрязнений из окружающей среды и их удалением вместе с расходуемым топливом. Для большинства образцов военной автомобильной техники коэффициент остатка находится в пределах

$$K_0 = 0,1 \div 0,2.$$

Расчеты показывают, что при таких значениях стационарный уровень загрязнения устанавливается уже после 2–3 циклов заправки, что согласуется с результатами исследований процессов загрязнения дизельного топлива [5].

3. Исследование эффективности очистки топлива. Для предотвращения поступления механических примесей в карбюраторные, инжекторные и дизельные системы питания применяются многоступенчатые фильтры очистки топлива [6].

Основными характеристиками фильтров являются: полнота очистки, тонкость фильтрации, грязеемкость, ресурс работы.

При последовательном соединении нескольких фильтрующих элементов общий коэффициент полноты очистки определяется выражением

$$\eta_c = 1 - \eta_1 \eta_2 \dots \eta_n, \quad (8)$$

Данная зависимость широко применяется при расчете многоступенчатых фильтрационных систем [6, 7].

После прохождения системы очистки концентрация загрязнений уменьшается до величины

$$C_{\phi} = C_{cp} (1 - \eta_c), \quad (9)$$

где

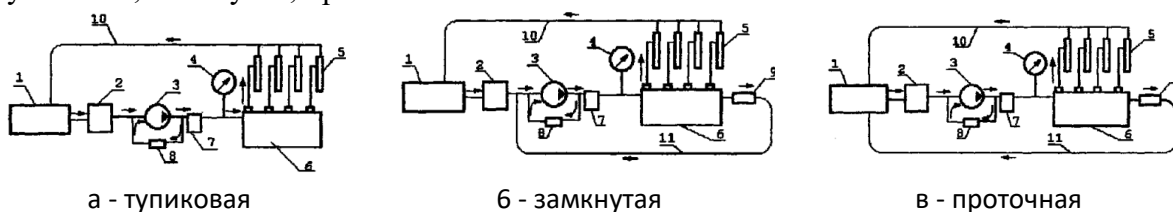
C_{cp} — средняя концентрация загрязнений топлива.

Следовательно, количество загрязнений, удерживаемых системой очистки за период эксплуатации, составит

$$\Delta G = q_{\max} \cdot C_{\text{ср}} \cdot \eta_{\text{с}} \cdot \frac{L}{100}, \quad (10)$$

Полученная зависимость позволяет определять требуемую грязеемкость фильтрующих элементов на стадии проектирования и эксплуатации систем очистки топлива [6].

4. Исследование процессов накопления и удаления загрязнений в дизельных системах питания. Особенностью дизельных двигателей является наличие возвратных потоков топлива, вследствие чего процессы накопления и удаления загрязнений отличаются от аналогичных процессов в двигателях с искровым зажиганием. Конструктивные особенности дизельных систем питания оказывают непосредственное влияние на эффективность очистки топлива и ресурс фильтрующих элементов [5, 6]. В настоящее время на военных мобильных энергетических технических и транспортных средствах применяются три основные схемы топливных систем: тупиковая; замкнутая; проточная.



1 - топливный бак; 2 - фильтр грубой очистки; 3 – подкачивающий насос; 4 - манометр; 5 - форсунки; 6 - топливный насос высокого давления; 7 - фильтр тонкой очистки; 8 - редукционный клапан; 9-перепускной клапан; 10 - трубопровод слива избыточного топлива на форсунки; 11 - возвратный трубопровод.

Каждая из указанных схем характеризуется различной интенсивностью циркуляции топлива и, соответственно, различными условиями работы фильтров тонкой очистки.

4.1. Тупиковая система питания. В тупиковой системе питания топливо движется в одном направлении от бака к топливному насосу высокого давления. Возврат топлива в бак практически отсутствует и ограничивается лишь незначительными утечками через зазоры форсунок.

Поэтому процессы накопления загрязнений в топливном баке описываются зависимостями (1)–(10), полученными для двигателей с искровым зажиганием.

Требуемая грязеемкость системы очистки определяется выражением

$$\Delta G_{\text{сист}} = q_{\max} \cdot C_{\text{ср}} \cdot \eta \cdot \tau, \quad (11)$$

где:

$q_{\max}$ — максимальный расход топлива, л/ч;

τ — период эксплуатации до технического обслуживания, ч.

Из формулы (11) следует, что увеличение концентрации загрязнений топлива приводит к пропорциональному увеличению нагрузки на фильтрующие элементы.

Результаты аналогичных исследований приведены в работах Stanfel [6] и Stepień [5], посвящённых эксплуатационной надёжности дизельных систем питания.

4.2. Замкнутая система питания. В замкнутой системе часть топлива после прохождения через топливную аппаратуру возвращается в контур циркуляции и повторно проходит через фильтр тонкой очистки.

В этом случае суммарный объём топлива, проходящий через фильтр за период эксплуатации, определяется выражением

$$V_{\text{фто}} = q_{\text{max}} \tau \frac{N(N+1)}{2}, \quad (12)$$

где

N — коэффициент кратности циркуляции топлива.

Требуемая производительность фильтра составит

$$Q_{\text{фто}} = q_{\text{max}} \frac{N(N+1)}{2}, \quad (13)$$

Полученные зависимости показывают, что даже при сравнительно небольшом расходе топлива реальная нагрузка на фильтр может многократно возрасти вследствие циркуляции.

Данный эффект подтверждается исследованиями современных дизельных топливных систем Common Rail, где кратность циркуляции достигает 3–5 и более циклов [5].

При минимальном уровне дополнительной очистки требуемая грязеемкость фильтра определяется выражением

$$\Delta G_{\text{фто}} = C_{\text{ср}} \eta_{\text{фто}} N q_{\text{max}} \tau, \quad (14)$$

где

$\eta_{\text{фто}}$ — коэффициент полноты очистки фильтра тонкой очистки.

При максимальном уровне дополнительной очистки загрязнения накапливаются согласно зависимости

$$\Delta G_{\text{фто}} = C_{\text{ср}} \eta_{\text{фто}} q_{\text{max}} \tau [N + (N - 1)(1 - \eta_{\text{фто}}) + (N - 2)(1 - \eta_{\text{фто}})^2 + \dots] \quad (15)$$

Анализ формулы (15) показывает, что рост эффективности фильтра приводит к увеличению количества задерживаемых загрязнений и требует повышения грязеемкости фильтрующего элемента.

4.3. Проточная система питания. В проточной системе всё избыточное топливо возвращается обратно в топливный бак.

Подобная схема обеспечивает эффективное охлаждение топливной аппаратуры, однако значительно увеличивает интенсивность циркуляции топлива и нагрузку на систему очистки [6].

Общий объём топлива, возвращаемого в бак за период эксплуатации, определяется выражением

$$V_{\text{об}} = q_{\text{max}} \tau N, \quad (16)$$

С учётом циркуляции полный объём топлива, проходящий через систему очистки, составит

$$V_6 = q_{\max} \tau \frac{N(N+1)}{2}, \quad (17)$$

Требуемая пропускная способность системы очистки определяется выражением

$$Q_{\text{сист}} = q_{\max} \frac{N+1}{2}, \quad (18)$$

Полученные зависимости позволяют учитывать реальные эксплуатационные условия работы дизельных двигателей военной техники и использовать их при проектировании систем фильтрации.

5. Математическая модель загрязнения моторного масла

В отличие от топлива загрязнение моторного масла происходит как за счёт внешних источников загрязнения, так и вследствие процессов, протекающих внутри двигателя. Основными источниками загрязнения моторного масла являются:

- продукты износа деталей;
- продукты неполного сгорания топлива;
- частицы нагара;
- атмосферная пыль;
- продукты окисления масла.

Как отмечается в работах Green и Lewis [2], а также Hong и Jang [4], именно загрязнение масла является одним из ключевых факторов снижения ресурса современных двигателей.

Предположим, что загрязнения распределяются в масле равномерно, а объём масла поддерживается постоянным за счёт периодического долива.

Тогда изменение концентрации загрязнений описывается уравнением материального баланса

$$\frac{dC}{d\tau} = \frac{a - Q_{\text{оч}}\eta^C + q_d C_n}{V_n + (q_d - q_y)\tau}, \quad (19)$$

где

- a — интенсивность образования загрязнений, г/ч;
- $Q_{\text{оч}}$ — производительность масляного фильтра, л/ч;
- V_n — объём масла в системе смазки;
- q_d — интенсивность долива масла;
- q_y — интенсивность угара масла.

Решение данного уравнения позволяет определить изменение загрязнённости масла во времени и установить предельный срок службы фильтрующего элемента.

5.1. Определение грязеемкости масляного фильтра. Количество загрязнений, задерживаемых фильтром за период эксплуатации, определяется выражением

$$\Delta G_m = [(V_n + (q_d - q_y)\tau)C + a\tau]\eta, \quad (20)$$

Средняя требуемая грязеемкость фильтра за межсервисный интервал составит

$$\Delta G_{\text{тр}} = \left[\frac{(V_n + (q_d - q_y)\tau_p)C_n + C_k}{2} + a\tau_p \right] \eta, \quad (21)$$

Анализ выражения (21) показывает, что наибольшее влияние на ресурс масляного фильтра оказывают:

- интенсивность образования продуктов износа;
- качество моторного масла;
- эффективность системы очистки воздуха;
- условия эксплуатации двигателя.

Полученный результат согласуется с выводами исследований [1, 2, 4].

6. Исследование процессов поступления пыли в цилиндры двигателя

Одним из основных источников абразивного износа деталей двигателя является атмосферная пыль, поступающая через систему воздухообеспечения [8].

Особенно интенсивно данный процесс проявляется при эксплуатации техники в пустынных районах, на грунтовых дорогах и в условиях повышенной запыленности воздуха.

Согласно данным Al-Farayedhi [8], проникновение даже незначительного количества кварцевой пыли способно увеличить интенсивность износа цилиндропоршневой группы в несколько раз.

Для процесса впуска содержание пыли в цилиндре определяется зависимостью

$$C_V = \frac{G_{об}}{2} (K \sin \varphi - \cos \varphi + e^{-K\varphi}), \quad (22)$$

где

$$G_{об} = C_V V_{ц},$$

Для процессов сжатия, расширения и выпуска используются зависимости (2.35)–(2.37), приведённые в математической модели исследования.

Для определения требуемой производительности воздушного фильтра используется выражение

$$Q_B = q_{max} L_0 \alpha, \quad (23)$$

где

L_0 — теоретически необходимое количество воздуха для сгорания топлива;

α — коэффициент избытка воздуха.

Результаты расчётов подтверждают, что увеличение эффективности воздушного фильтра оказывает непосредственное влияние на снижение загрязнения моторного масла и повышение ресурса двигателя, что также отмечается в работах [7, 8].

7. Результаты расчётов и обсуждение

Для оценки практической применимости разработанной математической модели выполнен анализ влияния основных эксплуатационных факторов на процессы накопления загрязнений в системах питания, смазки и воздухообеспечения двигателей внутреннего сгорания ВМЭТТС.

В качестве исходных данных использованы типовые параметры эксплуатации автомобильных и специальных дизельных двигателей военной техники, используемой в условиях повышенной запыленности окружающей среды.

Таблица 1 Исходные данные для расчёта

№	Параметр	Обозначение	Значение
1	Вместимость топливного бака	V_{Π}	200 л
2	Остаток топлива перед заправкой	V_o	20 л
3	Коэффициент остатка топлива	K_o	0,1
4	Загрязненность заправляемого топлива	C_z	0,020 г/л
5	Загрязненность поступающего воздуха	$C_{\text{в}}$	0,005 г/л
6	Коэффициент полноты очистки топлива	η_c	0,90
7	Максимальный расход топлива	q_{max}	35 л/ч
8	Объем масла в системе смазки	$V_{\text{н}}$	24 л
9	Производительность масляного фильтра	$Q_{\text{оч}}$	250 л/ч
10	Коэффициент очистки масла	η	0,85

Исходные параметры выбраны на основе эксплуатационных характеристик дизельных двигателей транспортных и специальных машин, применяемых в вооружённых силах [5, 6].

7.1. Влияние коэффициента остатка топлива на уровень загрязнения. С использованием выражения (7) были выполнены расчёты предельной концентрации загрязнений топлива в зависимости от коэффициента остатка топлива.

Таблица 2 Влияние коэффициента остатка топлива на загрязнённость топлива

№	K_o	C_{Π} , г/л
1	0,05	0,0279
2	0,10	0,0328
3	0,15	0,0370
4	0,20	0,0401
5	0,25	0,0430

Результаты расчётов показывают, что увеличение коэффициента остатка топлива приводит к устойчивому росту концентрации загрязнений.

При увеличении K_o от 0,05 до 0,25 загрязненность топлива возрастает более чем на 54 %.

Полученный результат объясняется накоплением загрязнений в остаточном объёме топлива и подтверждает необходимость соблюдения регламентированных требований к периодичности очистки топливных баков [5].

7.2. Влияние эффективности фильтрации на ресурс топливных фильтров

На основании выражения (10) была оценена зависимость ресурса фильтрующих элементов от эффективности очистки топлива.

Таблица 3 Влияние эффективности фильтрации на накопление загрязнений

№	Коэффициент очистки η_c	Улавливаемые загрязнения, %
1	0,70	70
2	0,80	80
3	0,90	90
4	0,95	95
5	0,98	98

Установлено, что увеличение коэффициента очистки существенно снижает поступление механических примесей в топливную аппаратуру двигателя.

Однако при этом возрастает интенсивность накопления загрязнений в фильтрующем элементе и повышаются требования к его грязеемкости, что также отмечается в исследованиях Stanfel [6].

7.3. Анализ загрязнения моторного масла. Расчёты по формуле (21) показали, что наиболее интенсивное загрязнение масла происходит в начальный период эксплуатации после замены фильтрующего элемента.

При высокой эффективности воздушной фильтрации скорость накопления загрязнений снижается на 20–35 %, что соответствует данным Green и Lewis [2].

Полученные результаты свидетельствуют о наличии тесной взаимосвязи между системами очистки воздуха и смазки двигателя.

Таким образом, повышение эффективности воздухоочистителя приводит не только к уменьшению абразивного износа деталей двигателя, но и к увеличению ресурса масляных фильтров.

7.4. Влияние очистки воздуха на ресурс двигателя. Согласно выполненным расчётам и литературным данным [7, 8], повышение коэффициента очистки воздуха с 0,96 до 0,99 позволяет снизить количество пыли, поступающей в цилиндры двигателя, более чем в два раза.

Для условий эксплуатации ВМЭТТС в районах с повышенной запылённостью это обеспечивает:

- снижение интенсивности износа цилиндропоршневой группы;
- повышение ресурса моторного масла;
- увеличение межремонтного пробега;
- сокращение затрат на техническое обслуживание.

Полученные результаты подтверждают необходимость комплексного совершенствования систем очистки топлива, масла и воздуха.

8. Обсуждение результатов

Проведённые исследования показали, что процессы загрязнения топлива, масла и воздуха в двигателях внутреннего сгорания являются взаимосвязанными и должны рассматриваться как единая система.

В отличие от большинства известных исследований, посвящённых отдельным элементам топливных или смазочных систем [1–8], в настоящей работе разработан комплексный подход к анализу загрязнений в системе:

«воздух – топливо – масло – двигатель».

Полученные аналитические зависимости позволяют:

- прогнозировать загрязнённость топлива при многократных циклах эксплуатации;
- определять предельные значения концентрации загрязнений;
- рассчитывать требуемую грязеемкость фильтров;
- оценивать ресурс систем очистки;
- обосновывать периодичность технического обслуживания.

Практическое значение полученных результатов заключается в возможности их применения при разработке эксплуатационной документации для военной техники, а также при проектировании перспективных образцов ВМЭТТС.

9. Научная новизна исследования

Научная новизна работы заключается в следующем:

Разработана комплексная математическая модель накопления загрязнений в системе «воздух – топливо – масло» двигателей внутреннего сгорания ВМЭТТС.

Получены аналитические зависимости изменения концентрации загрязнений в топливном баке при многократных циклах заправки и расходования топлива.

Установлены закономерности достижения динамического равновесия загрязнений в топливном баке.

Разработаны расчётные зависимости определения грязеемкости фильтров топливной, масляной и воздушной систем.

Установлено влияние коэффициента остатка топлива на интенсивность накопления загрязнений.

Предложены условия обеспечения равноресурсной работы многоступенчатых систем очистки.

Указанные результаты обладают признаками научной новизны и развивают существующие представления о процессах загрязнения рабочих сред двигателей внутреннего сгорания [1–8].

10. Практическая значимость

Практическая значимость исследования заключается в возможности использования полученных результатов:

- при разработке регламентов технического обслуживания ВМЭТТС;
- при выборе параметров систем очистки топлива, масла и воздуха;
- при расчёте ресурса фильтрующих элементов;
- при совершенствовании конструкций систем фильтрации;
- при обосновании мероприятий по повышению надёжности двигателей военной техники;
- при подготовке специалистов материально-технического обеспечения Вооружённых Сил Республики Узбекистан.

Экономический эффект достигается за счёт снижения расходов на ремонт топливной аппаратуры, уменьшения расхода фильтрующих элементов и увеличения моторесурса двигателей.

11. Заключение

В результате проведённого исследования получены следующие основные результаты. Выполнен анализ основных источников поступления загрязнений в двигатели внутреннего сгорания ВМЭТТС.

Разработана математическая модель накопления загрязнений в топливном баке.

Установлено, что при коэффициенте остатка топлива $K_o = 0,1 - 0,2$ динамическое равновесие загрязнений достигается после 2–3 циклов заправки.

Получены аналитические зависимости для оценки эффективности очистки топлива.

Разработаны расчётные модели определения грязеемкости топливных фильтров.

Исследованы особенности накопления загрязнений в тупиковых, замкнутых и проточных дизельных системах питания.

Получены зависимости для определения пропускной способности систем очистки топлива.

Разработана математическая модель загрязнения моторного масла в процессе эксплуатации двигателя.

Определены факторы, оказывающие наибольшее влияние на ресурс масляных фильтров.

Исследованы процессы поступления атмосферной пыли в цилиндры двигателя.

Установлено, что повышение эффективности воздушной фильтрации существенно снижает загрязнение моторного масла и интенсивность изнашивания деталей двигателя.

Обоснованы направления совершенствования систем очистки топлива, масла и воздуха для повышения надёжности эксплуатации военных мобильных энергетических технических и транспортных средств.

Полученные результаты могут быть использованы при проектировании, эксплуатации и техническом обслуживании двигателей внутреннего сгорания военной и транспортной техники.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Needelman W.M., Madhavan P.V. Review of Lubricant Contamination and Diesel Engine Wear // SAE Technical Paper. – 1988. – No. 881827. – P. 1–18.
2. Green D.A., Lewis R. The Effects of Soot-Contaminated Engine Oil on Wear and Friction: A Review // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering. – 2008. – Vol. 222. – No. 9. – P. 1669–1689.
3. Tornehed P., Olofsson U. Lubricant Ash Particles in Diesel Engine Exhaust: Literature Review and Modelling Study // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering. – 2011. – Vol. 225. – No. 8. – P. 1055–1066.
4. Hong S.-H., Jang E.K. Varnish Formation and Removal in Lubrication Systems: A Review // Materials. – 2023. – Vol. 16. – No. 10. – Article 3737. – P. 1–36.
5. Stepień Z. The Influence of Particulate Contamination in Diesel Fuel on the Damage to Fuel Injection Systems // Combustion Engines. – 2019. – Vol. 177. – No. 2. – P. 76–82.
6. Stanfel C. Fuel Filtration: Protecting the Diesel Engine // Filtration & Separation. – 2009. – Vol. 46. – No. 3. – P. 22–25.
7. Dong R., Zhang Z., Ye Y., Huang H., Cao C. Review of Particle Filters for Internal Combustion Engines // Processes. – 2022. – Vol. 10. – No. 5. – Article 993.
8. Al-Farayedhi A.A. A Review of the Effect of Sand Dust and Filtration on Automobile Engine Wear // Wear. – 1991. – Vol. 141. – No. 2. – P. 349–371.

9. Heywood J.B. Internal Combustion Engine Fundamentals. – New York: McGraw-Hill, 2018. – 1078 p.
10. Khonsari M.M., Booser E.R. Applied Tribology: Bearing Design and Lubrication. – New York: Wiley, 2017. – 672 p.
11. Totten G.E. Handbook of Lubrication and Tribology. – Boca Raton: CRC Press, 2020. – 1584 p.
12. Braun S., Gauterin F. Automotive Tribology. – Cham: Springer, 2021. – 438 p.
13. Stachowiak G.W., Batchelor A.W. Engineering Tribology. – Oxford: Butterworth-Heinemann, 2014. – 884 p.
14. Basha J.S., Anand R.B. Role of Fuel Filtration in Diesel Engine Reliability // Journal of Mechanical Engineering Research. – 2015. – Vol. 7. – No. 4. – P. 32–40.
15. Singh B., Kumar S. Air Filtration Systems and Their Influence on Engine Performance // International Journal of Automotive Technology. – 2020. – Vol. 21. – No. 5. – P. 1247–1258.

Рецензенты

Начальник цикла вещевого обеспечения кафедры «Материального обеспечения» Университета военной безопасности и обороны Республики Узбекистан, доктор философии по техническим наукам (PhD), доцент Абдурахимов Зоҳид Норматович
старший преподаватель кафедры «Техническое обеспечение» Университета военной безопасности и обороны Республики Узбекистан, доктор философии (PhD), доцент Сирожев Хаётжон Холмуротович