

**МИНИСТЕРСТВО АГРАРНОЙ ПОЛИТИКИ УКРАИНЫ  
ТАВРИЧЕСКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ АГРОТЕХНИЧЕСКАЯ АКАДЕМИЯ**

На правах рукописи

**ДИДУР Владимир Владимирович**

**УДК 631.3 – 192**

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ СТАБИЛЬНОСТИ  
МОБИЛЬНОЙ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ТЕХНИКИ ПУТЁМ  
СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СРЕДСТВ ОЧИСТКИ ДИЗЕЛЬНОГО  
ТОПЛИВА**

**Специальность 05.05.11. – «Машины и средства механизации  
сельскохозяйственного производства»**

**ДИССЕРТАЦИЯ**

на соискание ученой степени кандидата технических наук

**Научный руководитель**  
Кандидат технических наук, доцент  
Кюрчев В.Н.

**МЕЛИТОПОЛЬ - 2004**

## АННОТАЦИЯ

Диссертация посвящена решению вопросов повышения эффективности использования мобильной сельскохозяйственной техники путём обеспечения нормируемой чистоты дизельного топлива при его заправке.

В основу данной работы заложен принцип обеспечения функциональной стабильности плунжерных пар топливного насоса высокого давления и фильтра тонкой очистки топливной системы дизельного двигателя, нарушение которой снижает производительность машино-тракторного агрегата, его коэффициенты готовности  $K_r$  и технического использования  $K_{ти}$ , а также увеличивает расход топлива.

В диссертации разработаны математическая модель процесса изнашивания плунжерных пар топливного насоса высокого давления, исследование которой, позволило обосновать технические требования к чистоте дизельного топлива и разработать методику прогнозирования их ресурса, а также математическую модель процесса очистки диэлектрических жидкостей силами электрического поля, исследование которой, позволило создать электроочиститель (новизна которого подтверждена Патентом Украины) обеспечивающий очистку дизельного топлива с обоснованными в диссертации характеристиками. Достоверность математических моделей подтверждена лабораторными и эксплуатационными исследованиями.

Эксплуатационными исследованиями установлены закономерности влияния чистоты дизельного топлива на функциональные характеристики (производительность, эффективная мощность, погектарный расход топлива и коэффициент готовности топливной системы) машино-тракторного агрегата на базе трактора Т-150К, позволившие разработать практические рекомендации по повышению эффективности использования мобильной сельскохозяйственной техники.

# СОДЕРЖАНИЕ

<b>Введение</b> .....	
<b>Раздел 1. Сущность вопроса. Цель и задачи исследования</b> .....	
1.1 Факторы, влияющие на эффективность использования мобильной техники в условиях сельскохозяйственного производства.....	
1.2 Оценка и обеспечение функциональной стабильности сельскохозяйственной техники и её элементов.....	
1.3 Уровень загрязнённости и обводнённости дизельного топлива, используемого в сельскохозяйственном производстве.....	
1.4 Влияние загрязнённости и обводнённости дизельного топлива на работоспособность топливной аппаратуры.....	
1.5 Классификация современных методов очистки углеводородных жидкостей.....	
1.6 Анализ существующих конструкций и методов расчёта электроочистителей с наполнителем.....	
1.7 Цель и задачи исследования.....	
<b>Раздел 2. Теоретические исследования влияния загрязнённости дизельного топлива на функциональные характеристики МТА</b> .....	
2.1 Исследование закономерностей изменения производительности и расхода топлива МТА при различных уровнях его загрязнённости.....	
2.2 Моделирование процесса изнашивания плунжерных пар ТНВД	
2.2.1 Обоснование технических требований к чистоте дизельного топлива.....	
2.2.2 Прогнозирование ресурса прецизионных соединений топливоподающей аппаратуры.....	
2.3 Структурный анализ надёжности топливной системы дизельного двигателя.....	
2.4 Выводы по второму разделу.....	
<b>Раздел 3. Программа и методика исследований</b> .....	
3.1 Программа экспериментальных исследований.....	
3.2 Разработка методики ускоренных износных испытаний прецизионных соединений топливоподающей аппаратуры.....	
3.3 Разработка эффективного электроочистителя дизельного топлива.....	
3.3.1 Моделирование процесса очистки дизельного топлива силами электрического поля с рабочей поверхностью в виде сферы из диэлектрика.....	
3.3.2 Установка для очистки дизельного топлива.....	
3.4 Методики контроля чистоты дизельного топлива.....	

3.5 Методика лабораторных исследований процесса осаждения частиц механических примесей в электрическом поле с кристаллами из диэлектрика.....

3.6 Методика оценки эффективности использования электрического фильтра для предварительной подготовки дизельного топлива.....

3.7 Выводы по третьему разделу.....

**Раздел 4. Экспериментальная оценка достоверности математических моделей.....**

4.1 Оценка достоверности математической модели процесса изнашивания плунжерных пар ТНВД.....

4.2 Оценка достоверности математической модели процесса очистки дизельного топлива силами электрического поля с рабочей поверхностью в виде кристаллов из диэлектрика.....

4.3 Результаты лабораторных испытаний макетного образца электрофильтра.....

4.4 Выводы и практические рекомендации по четвёртому разделу

**Раздел 5. Производственная проверка и оценка эффективности результатов исследований.....**

5.1 Результаты стендовых испытаний эффективности разработанного электрического фильтра с диэлектрическим наполнителем.....

5.2 Результаты эксплуатационной проверки эффективности применения предварительной очистки дизельного топлива на мобильной сельскохозяйственной техники.....

5.3 Оценка влияния чистоты дизельного топлива на надёжность мобильной сельскохозяйственной техники.....

5.4 Технико – экономическая оценка эффективности использования электрофильтра для очистки дизельного топлива перед его заправкой.....

5.5 Выводы по пятому разделу.....

**Общие выводы и практические рекомендации.....**

**Список использованной литературы.....**

**Приложение.....**

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность работы.** Эффективность сельскохозяйственного производства во многом определяется работоспособностью мобильной сельскохозяйственной техники в различных условиях эксплуатации. При этом особо актуальны вопросы обеспечения функциональной стабильности наиболее сложных агрегатов, в частности двигателей. Работоспособность дизельного двигателя определяется техническим состоянием его составных частей, в т.ч. топливной аппаратуры, более 50% отказов которой обусловлено загрязнением топлива [74]. Загрязнение топлива существенно увеличивает износ не только деталей топливной аппаратуры, но и деталей двигателя в целом. Так, например только по Запорожской области годовые затраты на ремонт тракторных двигателей и топливной аппаратуры, связанных с использованием некачественных нефтепродуктов, увеличились за последние годы на 22,25 млн. грн. Кроме того, износ топливной аппаратуры сопряжен с перерасходом топлива. Так, по данным ИМЭСХ УААН расход топлива из-за ухудшения технического состояния топливной аппаратуры увеличился на 15...20% [154, 159].

В расчете на 100 тыс. дизелей мощностью 90-140 л.с. годовой перерасход топлива составляет 108 тыс. тонн. Это половина годовой потребности АПК Запорожской области.

Анализ влияния чистоты дизельного топлива на работу топливной аппаратуры дизельного двигателя показывает, что современные двигатели, устанавливаемые на тракторах и комбайнах, имеют повышенные требования к данному показателю. Так, размеры механических примесей должны быть не более 4...6 мкм, а общая их концентрация должна соответствовать 8...10 классу чистоты жидкостей по ГОСТ 17216-71. Все это требует комплексного решения, включающего установку на двигатель прецизионных фильтров с достаточно большой грязеемкостью, предварительную подготовку, а также защиту от попадания технологической среды в топливо в процессе эксплуатации сельскохозяйственной техники.

Для установки на двигатель используют, как правило, механические филь-

фильтры, для предварительной подготовки – механические и электрические фильтры, а так же центробежные сепараторы, либо их различные сочетания. Каждый из фильтров имеет ряд преимуществ, а так же определённые известные недостатки.

Перспективными с экономической и технологической точек зрения являются методы очистки дизельного топлива, использующие неоднородное электрическое поле.

Исходя из изложенного выше, разработка новых высокоэффективных способов и устройств тонкой очистки дизельного топлива электрическими фильтрами, как средство повышения эксплуатационной надёжности мобильной техники, является актуальной задачей.

**Связь работы с научными программами, планами и темами.** Работа выполнялась в соответствии с Государственной научно – технической программой 3.12. «Энерго – и ресурсосберегающие технологии в сельскохозяйственном производстве», тематикой межвузовских научных и научно-технических программ по приоритетным направлениям развития науки и техники (Приказ Минобразования Украины № 37 от 13.02.96 г. п.1.1) и Научно – технической программой № 1 Таврической государственной агротехнической академии на 2001...2005 г.г. «Разработка научных основ систем технологий и технических средств для обеспечения продовольственной безопасности южного региона Украины» раздел 1.4.4. «Оптимизация технологического процесса контроля качества топливо - смазочных материалов, разработка новых методов и технических средств». № Гос. регистрации 0102V000678.

**Цель и задачи исследования** – повышение эффективности использования мобильной сельскохозяйственной техники за счет обеспечения ее функциональной стабильности путем усовершенствования средств очистки дизельного топлива.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- установить причины и изучить закономерности влияния загрязненности дизельного топлива на износ соединений топливной системы дизельного дви-

гателя и их влияние на функциональные характеристики машино-тракторного агрегата;

- теоретически обосновать и экспериментально проверить модель процесса изнашивания прецизионных соединений топливной системы дизельного двигателя и разработать методику прогнозирования их ресурса и технические требования к чистоте дизельного топлива;

- разработать установку для сепарации механических примесей и воды в дизельном топливе, которое используется мобильной сельскохозяйственной техникой;

- разработать практические рекомендации по повышению надежности и функциональной стабильности мобильной сельскохозяйственной техники путем усовершенствования ее технического обслуживания;

- теоретически и экспериментально определить закономерности влияния загрязненности дизельного топлива на надежность и функциональные характеристики машино-тракторных агрегатов и определить технико-экономическую целесообразность повышения чистоты дизельного топлива предложенными средствами.

*Объект исследования* – процессы износа прецизионных соединений топливной аппаратуры в среде дизельного топлива, загрязненного механическими примесями.

*Предмет исследования* – закономерности влияния загрязненности дизельного топлива на надежность и функциональные характеристики машино-тракторных агрегатов.

*Методы исследования* - исследования процесса изнашивания прецизионных соединений в среде дизельного топлива, загрязненного механическими примесями, и обоснование технических требований к его чистоте, осуществлялось путем моделирования, с применением ПЭВМ на основе законов механики, теории трения и теории вероятности.

Исследования закономерности влияния загрязненности дизельного топлива на функциональные характеристики машино-тракторного агрегата обеспечива-

лось с помощью созданного электрофилтра и использования положений теории двигателя внутреннего сгорания и теории динамики МТА. Разработка электрофилтра выполнялась на основании исследований процесса сепарации механических примесей из дизельного топлива силами электрического поля с использованием законов гидродинамики. Экспериментальные исследования проводили как за общепринятыми, так и специально разработанными методиками, в т.ч. методиками ускоренных износных испытаний и измерения параметров загрязненности. Обработка результатов исследований осуществлялась на ПЭВМ с применением теории вероятности.

**Научная новизна полученных результатов:**

- получила дальнейшую проверку научная гипотеза о возможности повышения надежности и функциональной стабильности мобильной сельскохозяйственной техники путем обеспечения чистоты дизельного топлива;
- впервые разработаны математические модели, которые дают возможность достоверно оценить степень влияния загрязненности дизельного топлива на функциональные характеристики МТА (производительность и экономичность) из-за износа прецизионных соединений топливной аппаратуры;
- использование математических моделей позволило разработать методику прогнозирования ресурса плунжерных паров топливного насоса высокого давления (ПНВД) и технические требования к чистоте дизельного топлива;
- впервые получены математические зависимости, которые позволяют определить конструктивные и технологические параметры электрофилтра, с характеристиками удовлетворяющими технические требования к чистоте дизельного топлива;
- впервые получены зависимости функциональных характеристик машино-тракторного агрегата от времени его работы и определен коэффициент готовности топливной системы для разных степеней загрязненности дизельного топлива, с помощью которых можно оценить эффективность использования разных средств очистки дизельного топлива.

### **Практическое значение полученных результатов:**

- разработаны программы расчетов и математическое обеспечение для прогнозирования ресурса прецизионных соединений топливной аппаратуры при разных нормах загрязненности дизельного топлива и эффективности очистки его в зависимости от конструктивных и технологических параметров электрофильтра;
- обоснованы технические требования к показателям загрязненности дизельного топлива, обеспечение которых позволит повысить надежность и функциональную стабильность мобильной сельскохозяйственной техники;
- разработана методика ускоренных износных испытаний прецизионных соединений топливной аппаратуры по результатам испытания модельных образцов, которая позволяет с помощью масштабных коэффициентов получать величины износов для натуральных соединений в реальном времени их использования;
- изготовленные макетные образцы электрофильтров прошли производственную проверку в хозяйствах Запорожской обл. и в Н-Каховском агротехническом колледже, Херсонской обл.;
- разработаны рекомендации по усовершенствованию технического обслуживания мобильной сельскохозяйственной техники с помощью использования вновь созданного электрофильтра (патент Украины № 37109 А).

### **Личный вклад соискателя.** Диссертантом лично:

- разработана математическая модель процесса изнашивания прецизионных соединений в среде дизельного топлива с механическими примесями;
- выполнено теоретическое обоснование технических требований к загрязненности дизельного топлива;
- исследован процесс изнашивания прецизионных соединений топливной системы в среде дизельного топлива с механическими примесями;
- разработана математическая модель сепарации механических примесей из дизельного топлива и предложен способ повышения эффективности функционирования электрического фильтра за счет использования наполнителя межэлектродного пространства кристаллами из диэлектрика;

- исследовано влияние загрязненности дизельного топлива на надежность топливной системы, а также на производительность и экономичность МТА (с трактором Т-150К) на пахоте;

- разработаны практические рекомендации по усовершенствованию системы технического обслуживания мобильной сельскохозяйственной техники;

**Апробация результатов диссертации.** Основные положения диссертации одобрены на научных конференциях профессорско-преподавательского состава, научных работников и аспирантов Таврической государственной агротехнической академии (1998-2004 г.), Харьковского государственного технического университета сельского хозяйства (г. Харьков - 2001 г.), Харьковского государственного политехнического университета вместе с АН ВШУ (г. Ялта - 2000 г.), четвертой Международной научно-практической конференции “Современные проблемы земледельческой механики” (г. Харьков – 2003 г.), на научно-практической конференции Луганского национального аграрного университета г. Луганск – 2003 г.

**Публикации.** Основные положения диссертационной работы опубликованные в восьми печатных работах, среди них 2 патенты Украины.

**Объем работы.** Диссертация состоит из введения, 5 разделов, выводов, списка использованных источников, приложений.

Работа изложена на 159 страницах машинописного текста, содержит 45 рисунков, 12 таблиц, список использованных источников из 160 наименований, 6 приложений.

Общий объём диссертации 226 страниц.

## РАЗДЕЛ 1

### СУЩНОСТЬ ВОПРОСА. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

#### **1.1. Факторы, влияющие на эффективность использования мобильной техники в условиях сельскохозяйственного производства**

В настоящее время из-за недостаточной мощности производственно-технического потенциала АПК наблюдаются значительные нарушения технологии, и в первую очередь, сроков начала работ, их продолжительности и качества. Например, сев зерновых, кормовых и других культур проводится в течение 10...15 дней вместо 4...5 по агротехническим условиям. Продолжительность уборки этих культур, как правило, в 2,0...2,5 раза больше допустимых сроков. Основная обработка почвы во многих случаях начинается позже на месяц и более, что отрицательно сказывается на урожайности сельскохозяйственных культур в следующем году. Значительная часть технологических операций вообще не проводится.

Такое состояние объясняется износившимся машинным парком, численность которого за последние 10 лет сократилась более чем в два раза, с изначально низкой надежностью не позволяет иметь уровень технической готовности выше 0,72 (при нормативе 0,95...0,97) [117].

Технический уровень сельскохозяйственной техники характеризуется, прежде всего, их производительностью, качеством и надежностью. Чем выше надежность машин, меньше трудоемкость этапов их технологической подготовки к работе, технического обслуживания и ремонта, тем меньше требуется техники, механизаторов и ремонтно-обслуживающего персонала для выполнения работ и тем выше производительность труда.

Технический уровень отечественной сельскохозяйственной техники (в отличие от зарубежной техники) мало способствует повышению производительности труд работников, занятых их эксплуатацией. Например, из-за низкой надежности наработка на отказ зерно- и кормоуборочных комбайнов не превышает 6...8 часов, большая продолжительность и высокая стоимость устранения последствий

отказов и технологической подготовки машин к работе. Так, трудоемкость технологической настройки зерноуборочных комбайнов “Дон-1500” выше, чем у зарубежных аналогов, в 1,5...2,0 раза. Нестабильность регулировок не только ухудшает качество работ и ведет к недополучению продукции и ухудшению ее качества, но и на 15...20% снижает производительность машинно-тракторных агрегатов (МТА) из-за увеличения тяговых сопротивлений машин, на 20...25% увеличивает расход топлива [74, 117, 137].

Для типовых вариантов комплектации машинно-тракторных агрегатов, параметры работы которых изучены и подтверждены опытом эксплуатации приведены данные о их производительности при различных условиях эксплуатации [6, 78, 94, 95, 164].

Анализ этих источников позволяет утверждать, что сменная норма выработки машинно-тракторного агрегата зависит от его технической надежности.

Расчет производительности МТА обычно производится по следующей формуле [47, 50, 118]:

$$W = 0,36 \cdot \frac{N_{ен}}{K_a} \cdot \eta_{ту} \cdot T_{см} \cdot \tau, \quad (1.1)$$

где  $N_{ен}$  – номинальная мощность на валу двигателя, кВт;

$T_{см}$  – время смены, час;

$\eta_{ту}$  – условный коэффициент полезного действия трактора (для случая тягового агрегата  $\eta_{ту} = N_{кр} / N_{ен}$ )

$K_a$  – удельное сопротивление агрегата, Н/м.

$\tau$  – коэффициент эффективности использования времени смены (при расчётах задаётся в пределах 0,50...0,95).

Формула (1.1) является самым общим выражением, позволяющим комплексно оценить один из важных показателей эффективности использования сельскохозяйственного агрегата. Однако более глубокий анализ указанной формулы позволяет считать, что производительность сельскохозяйственного агрегата является вероятностной характеристикой, поскольку величины, входящие в неё

( $N_e$ ,  $K_a$  и  $\tau$ ) являются случайными величинами со своими статистическими характеристиками и зависящими от множества конструктивных и эксплуатационных факторов. Функциональная схема типового сельскохозяйственного агрегата представлена на рис. 1.1.

Из приведенной схемы следует, что каждый из конструктивных и эксплуатационных факторов и их совокупность оказывают влияние на статистические характеристики выходных параметров агрегата, важнейшие из которых являются: функциональные, экологические и параметры безопасности.

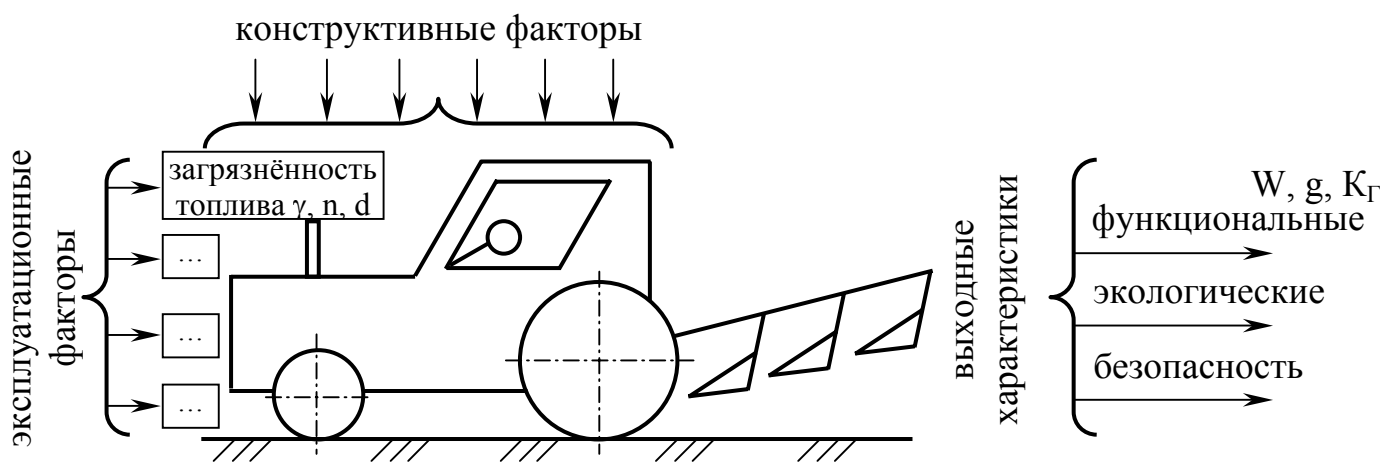


Рисунок 1.1. Функциональная схема сельскохозяйственного агрегата.

Наиболее рациональный путь увеличения производительности МТА, в условиях эксплуатации является увеличение коэффициента эффективности использования времени смены.

Скорость движения агрегата напрямую зависит от мощностных характеристик двигателя, его технического состояния и уровня надёжности. Опыт эксплуатации тракторов зерно- и кормоуборочной техники показал [52, 82, 98], что на двигатель приходится около 60 %, а по данным ГОСНИТИ [154] более 70% отказов, где более половины (до 70%) составляют отказы топливной системы. Большинство отказов топливной аппаратуры происходит по причине выхода из строя прецизионных соединений. При этом нарушается угол опережения впрыскивания топлива, равномерность подачи топлива по цилиндрам, качество распыливания.

В результате обработки опытных данных ГОСНИТИ [51] были получены

зависимости, характеризующие долю влияния зазора в плунжерной паре на показатели работы дизеля с учётом работы топливного насоса в динамике: неравномерность подачи топлива по цилиндрам; характеристика впрыскивания топлива и отклонения угла опережения впрыскивания топлива из-за искажения «закона топливоподачи»; величина некомпенсированных утечек топлива в картер насоса; снижение пусковых качеств; величина затрат на устранение последствий отказов плунжерных пар.

Суммарная роль неисправности подачи топлива и изменения «закона топливоподачи» составляет 90...95 % в общем балансе влияния рассмотренных неисправностей. Остальные неисправности составляют 5...10 %. Всё это приводит к снижению мощности двигателя, перерасходу топлива, а следовательно и к снижению часовой производительности МТА за счёт снижения скорости движения.

Так, например, по данным [154] из-за износов плунжерных пар ТНВД двигателя СМД-62 в рядовой эксплуатации МТА потери топлива через 100, 250, 500 моточасов соответственно составляют 0,13; 0,32; 0,65т, а из-за закоксованности распылителей форсунок за период эти потери составляют 0,04; 0,10; 0,19т.

Увеличение коэффициента эффективности использования времени смены напрямую связано с надёжностью МТА и его составных частей, т.е. с надёжностью трактора, двигателя, систем двигателя и т.д.

Вопрос о способах определения надёжности в системах с различным видом их включения рассматривается во многих источниках [1, 94, 95, 119]. При этом, как правило, приводятся широко известные формулы оценки надёжности для последовательного и параллельного соединения элементов. Для расчёта вероятности безотказной работы при последовательном соединении применяется зависимость:

$$P_{nc} = 1 - \prod_{i=1}^n P_i, \quad (1.2)$$

а при параллельном соединении

$$P_{nc} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_i), \quad (1.3)$$

где  $P_i$  – вероятность безотказной работы  $i$  - го элемента;

$n$  – количество элементов в системе.

Широко известны также методы расчёта надёжности систем с различными видами резервирования. Для этого предлагается использовать формулу расчёта надёжности параллельного соединения, которая при резервировании  $n$  одинаковых систем приобретает вид

$$P_k = 1 - (1 - P)^n, \quad (1.4)$$

где  $P$  – вероятность безотказной работы одной системы.

Из анализа формулы (1.4) следует, что вероятность безотказной работы МТА в целом можно повысить за счёт резервирования систем, входящих в комплекс. Например, вероятность безотказной работы топливной системы двигателя можно повысить за счёт резервирования, т.е. за счёт применения системы предварительной очистки дизельного топлива от механических примесей и воды, которая резервирует штатную систему очистки топлива, установленную на двигателе. Априори, такое решение позволит повысить надёжность МТА, а следовательно, увеличить коэффициент эффективности использования времени смены  $\tau$ , см. (1.1).

Основным показателем надёжности сельскохозяйственного МТА является коэффициент готовности, характеризующий среднюю долю времени нахождения МТА в рабочем состоянии. В общем случае сельскохозяйственный мобильный комплекс включает ряд машин, а машины включают ряд систем. Следовательно, рассматривая надёжность МТА, как фактор обеспечения его эффективности, следует учитывать время пребывания систем в работоспособном состоянии.

Таким образом из приведенного выше анализа следует, что резервирование систем двигателя, имеющих низкую надёжность, приведёт к увеличению коэффициента готовности машино-тракторного агрегата в целом, а наличие инженерных методов расчёта показателей надёжности сложных систем позволит оперативно управлять этими показателями.

## **1.2. Оценка и обеспечение функциональной стабильности сельскохозяйственной техники и их элементов**

Показатели функциональной стабильности сельскохозяйственной техники и их комплексов в значительной мере зависят от уровня надежности машин, входящих в состав комплекса, что отмечается в литературных источниках [49, 50, 51, 125]. Важную роль при этом играет точность оценки соответствующих показателей.

Значения показателей надёжности сельскохозяйственных машин, как правило, получают при обработке статистических данных, полученных из различных источников в соответствии с руководящими документами [94, 95]. Обычно это бывают результаты специально спланированных испытаний подконтрольной эксплуатации машины на машиноиспытательных станциях, а также данные об отказах, произошедших в условиях рядовой эксплуатации. Обработка собранной информации производится с использованием методов математической статистики. Например, для обработки цензурированных выборок могут использовать метод максимального правдоподобия, а также метод полноты «смеси». ГОСТ 27.504-84 рекомендует к использованию непараметрический метод, отличающийся от вышеперечисленных.

Сам факт использования множества методов для решения одной конкретной задачи наводит на мысль об их несовершенстве. Это подтверждается при выполнении практических расчетов, когда обработка одной и той же выборки различными методами приводит к получению различных результатов. Причем различия иногда оказываются существенными [1, 2, 3, 79].

При оценке надёжности элементов машин, имеющих постепенный характер отказов, обычно используют различного рода математические модели, учитывающие динамику процесса накопления повреждений. Существует нормативный документ [119], в котором определены основные положения методики оценки надёжности восстанавливаемых деталей машины по постепенным отказам. Здесь отмечается, что возможны варианты параметрической и непараметрической оценки динамики процесса по статистическим данным.

Сущность статистического метода построения динамики изнашивания состоит в том, что по информации об износах деталей и их наработках к моменту обследования определяют (в результате обработки цензурированных выборок) для ряда уровней износов  $U$  распределение наработок деталей, а также их среднее  $t$  и  $\gamma$  - процентное значение  $t_{\gamma}$ .

Полученные зависимости  $t(U)$  и  $t_{\gamma}(U)$  являются искомой динамикой изнашивания. Для определения параметров распределения ресурсов на уровнях  $U^*$  рекомендуется применение метода максимального правдоподобия, как наиболее точного и наиболее изученного из всех существующих [126].

Недостатком данной методики можно считать потребность в большом объеме статистической информации. В то же время известен другой подход к оценке распределения ресурса. В работе [99], рассматривая вопросы изнашивания, разрушения, коррозии и старения машин и агрегатов, автор характеризует эти процессы как случайные функции времени. Вводя определяющий параметр и задавая его предельным значением, определяется величина наработки до отказа, как случайная величина, характеризуемая некоторым законом распределения. Предполагается, что все статистические данные имеют нормальный закон распределения.

Анализируя данные работы [99], можно сделать вывод, что в основу метода прогнозирования ресурса агрегатов положен переход от зависимости динамики распределения параметра технического состояния элемента (агрегата) к распределению его ресурса по этому параметру. При этом использованы выявленные аналитические модели прогнозирования изнашивания типовых элементов машин. Именно за счет использования априорной информации о характере изнашивания удается значительно сократить объем необходимых исходных данных. Однако, явно ссылаясь на статистический характер анализируемых процессов, автор фактически использует регрессионные зависимости, полученные в результате анализа. Следовательно, здесь имеет место однозначно задаваемое посредством регрессионной модели распределение контролируемого параметра, а следовательно, и

распределение ресурса, например, топливных насосов высокого давления, зависит не только от параметров распределения начального значения зазора в плунжерной паре, но и от ряда других факторов. В первую очередь, условий эксплуатации, куда можно отнести чистоту дизельного топлива, которая значительно влияет на скорость изменения параметра состояния агрегата. Следовательно, метод, предложенный в данной работе, несмотря на ряд несомненных преимуществ, имеет ряд недостатков, снижающих его точность.

Обеспечению функциональной стабильности сельскохозяйственной техники служит планово-предупредительная система технического обслуживания и ремонта [52, 98]. Она широко применяется на практике для планирования эксплуатационных воздействий, направленных на поддержание машины в исправном состоянии, а также используется для выработки требований при разработке новых образцов техники.

Однако, имея ряд преимуществ, указанная система не лишена недостатков. Так, в [98] отмечается, что техническое обслуживание, выполняемое по календарной наработке, не является оптимальным для поддержания отличного состояния техники, т.к. обслуживанию подвергаются машины, которые в нем не нуждаются, в то время как другие, нуждающиеся в обслуживании, своевременно его не получают. Более конкретно этот недостаток сформулирован в работе [52], где указано, что такая система технического обслуживания не учитывает динамику изнашивания машин.

Перечисленные недостатки стали поводом для многочисленных исследований, направленных на поиск различных методов оптимизации периодичности проведения обслуживаний и ремонтов. Однако, как показывает анализ литературных источников, оптимизация сроков выполняется по экономическому критерию, без характеристик надёжности машин [99].

В работе [53] рассматривается вопрос оптимизации межремонтных ресурсов с точки зрения прямых затрат, связанных с трудоемкостью выполняемых работ. Очевидно, что использование такого подхода для планирования периодичности ремонтных работ не ставит своей целью обеспечивать надёжную работу ма-

шин.

В работе [98] также отмечается, что обслуживание машины можно проводить «по состоянию», на основании результатов диагностирования. Это позволяет обеспечить не только высокие показатели надёжности машины, но и минимальный расход запасных частей. Для того, чтобы снять агрегат с эксплуатации непосредственно перед моментом его отказа, необходимо иметь возможность определять текущее состояние агрегата по результатам диагностирования, а также требуется наличие соответствующей математической модели, позволяющей прогнозировать величину остаточного ресурса.

Выполнение этих условий существенно ограничивает возможность проведения ремонтов «по состоянию».

Более реальной представляется возможность выполнения предупредительных замен, подробно рассмотренная в работе [82]. Предупредительно заменяя сборочные единицы машины, имеющие небольшой остаточный ресурс, в отдельные периоды можно значительно сократить количество эксплуатационных отказов, повышая тем самым показатели надёжности, что особенно важно для напряженных периодов работы, когда велики потери урожая. Однако предупредительная замена сборочных единиц (агрегатов) приводит к недоиспользованию их технического ресурса, а следовательно, к увеличению затрат на поддержание и восстановление исправного состояния техники. В связи с этим представляет интерес оценка соотношения расхода запасных частей при различных значениях периодичности плановых ремонтов, ремонтов «по состоянию» и при выполнении упреждающих замен.

Таким образом, при рассмотрении различных методов оценки надёжности машин и их элементов, возникает ряд вопросов, ответ на которые требует проведения специальных исследований. Например, при оценке надёжности топливной аппаратуры дизельных двигателей сельхозмашин необходимо иметь математические модели прогнозирования ресурса элементов топливной аппаратуры, которые должны учитывать не только конструктивные особенности системы, а и эксплуатационные факторы и, в первую очередь, чистоту дизельного топлива. Анализ та-

ких моделей позволит спрогнозировать ресурс элементов топливной системы и произвести предупредительную замену, что обеспечит высокую степень готовности сельскохозяйственной техники к выполнению ими своих функций.

Разработка модели прогнозирования ресурса топливной аппаратуры дизелей сельскохозяйственной техники, учет в этой модели динамики изнашивания (достижение состояния по предельному параметру) с учетом загрязнения топлива и разработка комплекса мероприятий по увеличению надежности топливных систем является актуальной задачей, которая и решается в настоящей работе.

### **1.3. Уровень загрязненности и обводнённости дизельного топлива, используемого в сельскохозяйственном производстве.**

Дизельное топливо до использования в машине проходит ряд технологических операций: перекачку по трубопроводам, транспортировку, хранение, заправку и др. При этом, как показывает опыт и специально проведенные в работе исследования, в условиях рядовой эксплуатации, неизбежно его обводнение и засорение механическими примесями.

В дизельном топливе, выпускаемом изготовляющими предприятиями, механические примеси и вода, согласно стандартам и по результатам исследований, отсутствуют.

Динамика загрязнения дизельного топлива по пути от завода до потребителя характеризуется усредненными показателями, приведенными в Приложении В.

Основные причины загрязнения и обводнения дизельного топлива: попадание примесей и воды из атмосферы из-за негерметичности люков, поглощение воды из атмосферного воздуха из-за колебаний температуры на протяжении суток, особенно при хранении топлива в неполностью заполненных емкостях, перекачка топлива по загрязненным трубопроводам, накопление загрязнений и воды на дне резервуаров, а также неудовлетворительное состояние заправочных средств и рукавов, заправка открытым способом, нарушение уплотнения сборочных единиц. Особо следует отметить недостаточную степень очистки топлива от механи-

ческих примесей и воды в современных средствах хранения и заправки. Как следует из приведенных данных (Приложение В), в топливные баки машин нередко попадает топливо, содержащее 0,03...0,05% по массе механических примесей.

Аналогичные данные приводятся в работе [48] где отмечается, что загрязненность топлива на пути от завода-изготовителя до склада потребителя увеличивается более чем в 100 раз и достигает 0,063% по массе.

После заправки в топливные баки мобильной техники дизельное топливо на пути к цилиндрам двигателя продолжает интенсивно загрязняться, главным образом из-за запыленности воздуха не редко агрессивными мелкодисперсными частицами как почвенной пыли, так и компонентами технологической среды, например, минеральными удобрениями, гербицидами и др.

Основные свойства технологических сред, в которых эксплуатируется мобильная сельскохозяйственная техника приведены в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Химический состав загрязнений в дизельном топливе [Никитин Г.А.], [86].

Состав	Содержание, %	Микротвёрдость, Н/мм <sup>2</sup>
Кварц	68	10500...12250
Окись алюминия	14	20900...22900
Окись железа	4	23000...25000
Окись кальция	2	-
Окись магния	2	-
Полевой шпат и др.	-	10200

В почвенной пыли содержится до 70% кварца и корунда, которые имеют высокую твердость и вызывают абразивное изнашивание трущихся деталей [4, 86]. Концентрация пыли в воздухе непостоянна, она зависит от погоды, направления и силы ветра, времени года, от особенностей промышленного производства и многих других факторов.

Высокие температуры и очень малое количество осадков в течение продолжительного периода способствуют процессу пылеобразования, который усиливается движением транспорта там, где подстилающая поверхность состоит из разрушающего и поднимающего вверх лёсса.

В дизельном топливе средним содержанием загрязняющих примесей принято считать 100 г на 1 т топлива (0,01%). Однако в случае работы дизеля при запыленности воздуха 1,0...2,5 г/м<sup>3</sup> концентрация механических примесей в баке удваивается и даже утраивается по сравнению с начальной. Пыль, содержащаяся в воздухе, сравнительно легко проникает в топливные баки через дренаж.

По данным А.И. Селиванова [131], дизельное топливо, выдаваемое нефтебазами, содержит 100...120 г загрязняющих примесей на 1 т топлива. В неотстоявшемся дизельном топливе, перевозимом в бочках, имеется более 2,5 г/л загрязняющих примесей.

Количество воды, находящееся в топливе в растворенном состоянии, обычно невелико. В больших количествах вода может находиться в виде эмульсии, количество которой зависит от температуры и условий хранения. Вода, реагируя с сернистыми соединениями, которые на современном уровне нефтепереработки неизбежно присутствуют в дизельных топливах, образует химически активные соединения, вызывающие коррозию деталей топливной аппаратуры и топливопроводов. Присутствие воды сказывается на надежности работы фильтрующих элементов систем очистки топлива дизелей - при отрицательных температурах вода образует кристаллики льда, забивающие фильтрующие элементы систем питания. Кроме того, что особенно важно, нарушается работа фильтрующих устройств заправочных средств, и в бак машины попадает нефилтрованное топливо.

Таким образом, анализ литературных источников и собственных наблюдений свидетельствует о высоком уровне загрязненности и обводненности дизельного топлива, используемого в сельскохозяйственном производстве, который является объективно неизбежным фактом. При этом на пути от завода-изготовителя до топливного бака сельскохозяйственной техники концентрация механических примесей увеличивается почти в 100 раз, а на пути от топливного бака до цилиндров двигателя в 2...3 раза. Исходя из приведенных данных, можно сделать вывод о целесообразности очистки топлива перед его заправкой.

#### **1.4. Влияние загрязненности и обводненности дизельного топлива на работоспособность топливной аппаратуры.**

Для нормальной работы топливной аппаратуры дизелей необходимо ограничивать не только степень загрязненности топлива, но и размеры частиц, которые существенно влияют на износ плунжерных пар. Величина этих частиц не должна быть больше зазоров между прецизионными парами, т.е. не должна превышать 1,5...2,5 мкм [82].

Как показывает опыт эксплуатации автотракторной техники, в большей степени у топливоподающей аппаратуры изнашиваются такие прецизионные детали, как гильзы и плунжера насоса высокого давления, нагнетательные клапаны и распылители форсунок. От состояния поверхностей этих деталей зависят процессы смесеобразования и сгорания в цилиндрах двигателя, определяющие экономические, динамические и эксплуатационные показатели всей машины.

Как показано в работе [73], при недостаточной очистке топлива фильтрами твердые частицы проходят вместе с топливом через малые зазоры (0,4...3,0 мкм) прецизионных соединений под высоким давлением (13...80 МПа) и с большой скоростью (100...250 м/с). Абразивные частицы, попадая в зазоры прецизионных пар, изнашивают их, в результате увеличиваются первоначальные зазоры и изменяются параметры впрыска топлива (продолжительность, давление и др.). Это снижает качество работы топливоподающей аппаратуры и соответственно ухудшает надежность и экономичность двигателя (двигатель не развивает необходимой мощности из-за ухудшения процессов сгорания).

Обобщенная характеристика влияния износов соединений топливной аппаратуры на эффективность использования МГА приведена в таблице 1.2.

Ресурс дизельной топливоподающей аппаратуры практически ограничивается износостойкостью прецизионных пар. Несмотря на большую важность вопросов, связанных с надежностью работы этих дизелей, природа процесса их изнашивания в условиях запыленности воздуха практически не изучена.

Как показано в работе [73], при уменьшении гидравлической плотности плунжерных пар до 3,5 с значительных изменений параметров впрыска топлива

не происходит. При плотности ниже 3,5 с давление в нагнетательном топливопроводе и форсунке резко снижается, а продолжительность и угол опережения впрыска намного уменьшаются. При дальнейшем снижении плотности плунжерных пар возрастают неравномерность и нестабильность параметров впрыска и подачи топлива [74].

Диаметральный зазор плунжерной пары плотностью 3,5 с равен в среднем 0,006...0,008 мм в золотниковой части и 0,004 мм в компрессионной. По техническим условиям гидравлическая плотность должна быть не менее 20с, а зазор 0,0015...0,0030 мм. Низкая гидравлическая плотность изношенных при работе пар резко ухудшает параметры впрыска топлива, особенно при малых подачах и частотах вращения вала.

Анализ изношенных прецизионных пар в процессе эксплуатации дизелей свидетельствует, что они подвергаются главным образом абразивному изнашиванию проникающими частицами абразива через фильтрующие элементы.

Впервые была сделана попытка исследовать влияние показателей чистоты дизельного топлива на функциональную стабильность топливоподающей аппаратуры в работе [73].

Результаты исследований, приведенные в указанной работе (рис. 1.2. и рис. 1.3.), свидетельствуют о том, что при работе прецизионных соединений на чистом топливе, не содержащем механических примесей, топливо выступает в роли смазочной среды и обеспечивает минимальный коэффициент трения и защиту рабочих поверхностей от разрушения.

Наличие в топливе абразивных частиц, размер которых несколько больше, чем зазор в плунжерной паре, вызывает абразивное изнашивание этих пар. Абразивные частицы, размер которых меньше, чем зазор, не оказывают существенного влияния на процесс изнашивания и соответственно на параметры подачи топлива. Для плунжерной пары наиболее опасными являются абразивные частицы размером 6...8 мкм; оказавшись в зазоре, увеличенном за счет упругих деформаций втулки, они защемляются и начинают изнашивать прецизионные детали, особенно подвижные (плунжеры). Наибольший износ наблюдается против впускного от-

Таблица 1.2

Влияние износов соединений топливной аппаратуры на  
эффективность использования мобильной сельскохозяйственной техники

№	Соединение	Характер износа	Характер влияния на работоспособность топливной аппаратуры	Характер влияния на функциональные параметры машинно-тракторного агрегата
1	Плунжерные пары	Износ цилиндрической поверхности плунжерной пары	Утечка топлива через зазоры плунжерной пары	<ul style="list-style-type: none"> <li>- уменьшение цикловой подачи, увеличение неравномерности подачи по цилиндрам, снижение эффективной мощности, уменьшение производительности;</li> <li>- уменьшение угла начала подачи;</li> <li>- перерасход топлива.</li> </ul>
2	Нагнетательные клапаны	Износ цилиндрического пояска Износ конусной поверхности	Ухудшение отсасывающего действия в конце подачи Снижение давления в топливопроводе высокого давления перед началом подачи топлива	<ul style="list-style-type: none"> <li>- нечеткость отсечки впрыска – перерасход топлива;</li> <li>- уменьшение цикловой подачи – уменьшение производительности;</li> <li>- уменьшение угла начала подачи – перерасход топлива.</li> </ul>
3	Форсунки	Износ поверхности затвора	Подтекание топлива после окончания впрыска	<ul style="list-style-type: none"> <li>- загорание топлива на форсунках – перерасход топлива.</li> </ul>
4	Фильтр тонкой очистки	Забивание пористых перегородок Срыв фильтроэлементов	Снижение давления на входе в ТНВД Попадание загрязнений в ТНВД	<ul style="list-style-type: none"> <li>- уменьшение подачи, увеличение неравномерности – перерасход топлива, уменьшение производительности;</li> <li>- повышенный износ соединений – перерасход топлива, уменьшение производительности, снижение надежности.</li> </ul>

верстия втулки.

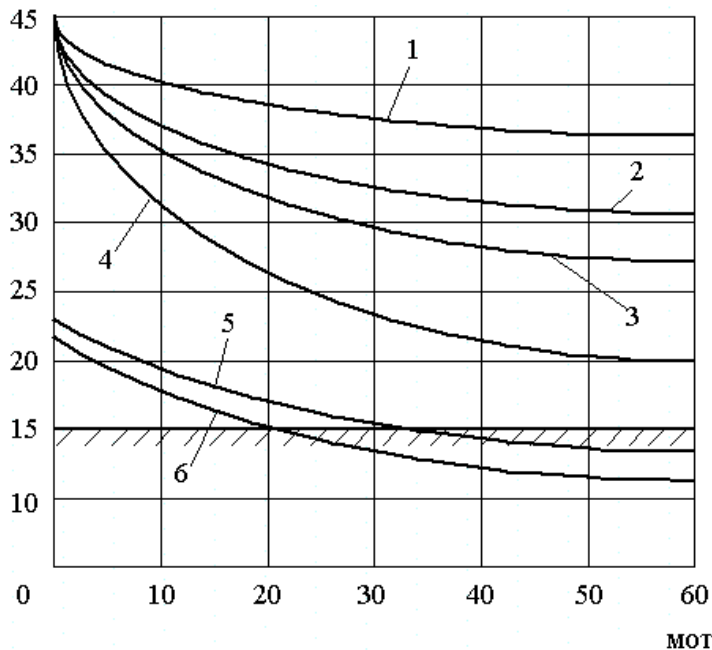


Рисунок 1.2. Зависимости гидравлической плотности плунжерной пары при искусственном введении в топливо абразивных частиц различных размеров при исходной концентрации мехпримесей 15 г/т и начальной гидравлической плотности 45с: 1) - 4...6 мкм; 2) - 6...8 мкм; 3) - 8...10 мкм; 4) - 10 мкм и более; 5)- 6...8 мкм; 6)- 8...10 мкм - при начальной гидравлической плотности 20...25с.

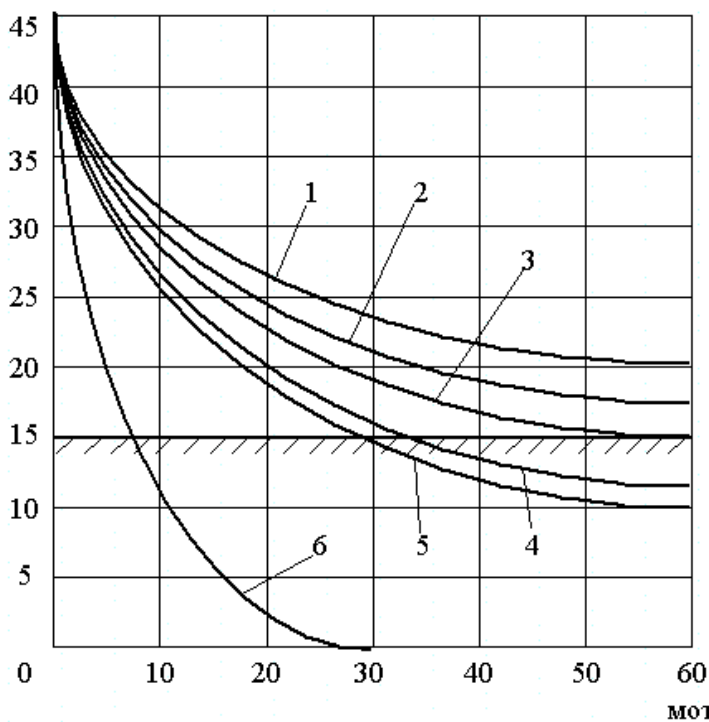


Рисунок 1.3 Зависимости гидравлической плотности плунжерной пары от концентрации абразивных частиц в топливе размером 6...8 мкм: 1) - 15 г/т; 2) - 25 г/т; 3) - 50 г/т; 4) - 75 г/т; 5) - 100 г/т; 6) – 150г/т [73].

По данным [73] нельзя допускать наличия в топливе абразивных частиц при концентрации более 50 г/т. Это приведет к усиленному абразивному износу, в первую очередь нагнетательного клапана и иглы, а затем плунжерной пары. При превышении концентрации абразива в топливе более 100 г/т. начинается усиленный абразивный износ плунжерной пары, причем плунжер изнашивается в 3...4 раза быстрее, чем втулка.

Таким образом одним из путей повышения ресурса топливоподающей аппаратуры является разработка эффективной системы фильтрации топлива, обеспечивающей отсеивание частиц размером 4...6 мкм, и обладающей большой грязеемкостью.

Наряду с очевидностью ряда предложений, вытекающих из работ [73], указанные требования к показателям частоты дизельного топлива требуют уточнения дополнительными исследованиями, так как конструкция современных топливоподающих агрегатов и фильтрующих устройств, а также условия эксплуатации существенно изменились.

### **1.5. Классификация современных методов очистки углеводородных жидкостей**

В настоящее время существует много методов удаления частиц загрязнения и воды из углеводородных жидкостей (керосин, дизельное топливо, масла). На основании анализа литературных источников [54, 83] все эти методы можно классифицировать согласно схемы приведенной на рис. 1.4.

Современные средства очистки углеводородных жидкостей должны отвечать следующим требованиям [83]: высокая тонкость очистки для всех видов загрязнений; большая грязеемкость и большой ресурс; постоянная пропускная способность независимо от времени работы; низкие гидравлические потери при работе с любым загрязнителем; высокая надежность и простота в обслуживании.

Широкое применение в настоящее время получили механические фильтры, работающие на методе пористой перегородки. К достоинствам таких фильтров можно отнести высокую удельную подачу жидкости, относительно малую массу

и габариты, постоянную готовность к работе, простоту эксплуатации, возможность работы в широком диапазоне температур и давлений [75, 120, 121, 150].

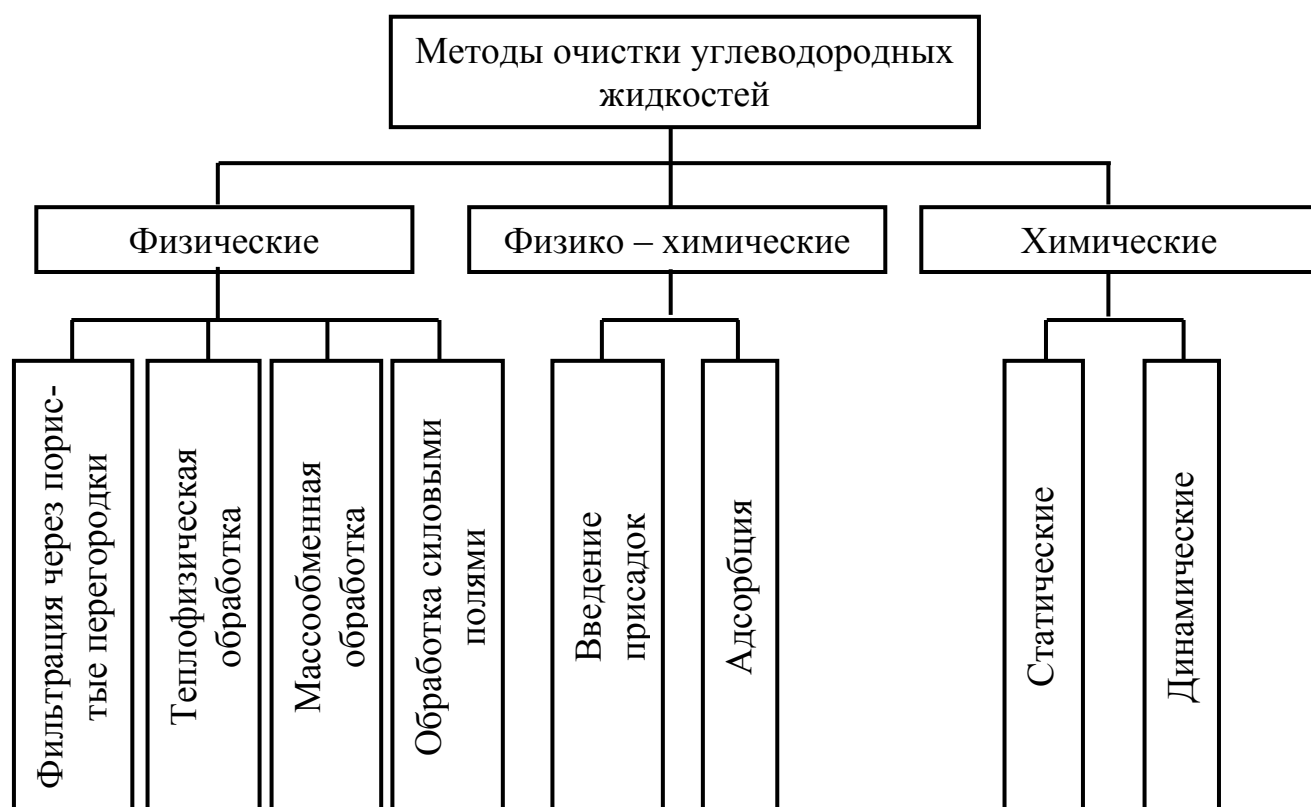


Рисунок 1.4. Классификация методов очистки углеводородных жидкостей

К недостаткам механических фильтров следует отнести высокую стоимость, малый ресурс из-за низкой грязеемкости, высокое гидравлическое сопротивление, плохое восстановление первоначальных характеристик (регенерация).

Повышение требований по тонкости фильтрации привело к резкому увеличению стоимости фильтроматериалов, увеличению гидравлического сопротивления и, следовательно, к увеличению габаритов.

Недостатки механических фильтров способствовали развитию принципиально новых направлений в создании средств очистки углеводородных жидкостей. Для этого, в последние годы, начали использоваться силовые поля.

Наиболее простыми силовыми очистителями можно считать гравитационные отстойники [54].

Более эффективным средством выделения частиц загрязнений из углеводородных жидкостей являются устройства, использующие центробежные силы.

Магнитные очистители и уловители позволяют удалять частицы загрязнений практически любых размеров, имея при этом неограниченный срок службы. Однако при этом они имеют существенный недостаток – производят очистку жидкости только от ферромагнитных частиц.

За последние 20 лет за рубежом и в отечественной практике для тонкой очистки углеводородных жидкостей от механических примесей и воды делались успешные попытки применения интенсивных электрических полей [19, 31, 32, 55, 80, 84, 85, 100, 101]. При этом разработано несколько десятков образцов электроочистителей, которые обладают высокой эффективностью по обеспечению тонкой очистки светлых нефтепродуктов от механических примесей и воды [143, 102-106, 156-159].

В работах [15, 20, 59] приводятся результаты исследований по обезвоживанию реактивных топлив в квазипостоянном электрическом поле и делается вывод о принципиальной возможности обезвоживания не только керосина, но и масел.

Анализ публикаций [21, 42, 57, 87, 88, 156, 157] по вопросам электроочистки диэлектрических жидкостей показал перспективность данного направления в вопросе практической реализации очистки от механических примесей и воды.

В перечисленных выше работах для выделения частиц загрязнений и воды из углеводородных жидкостей используются разные виды и конфигурации полей, а также различные способы удержания и перераспределения частиц загрязнений. По этому принципу можно провести следующее деление средств электроочистки:

- электроочистители с близким к однородному электростатическому полю. У таких электроочистителей загрязненная жидкость перемещается вдоль разноименно заряженных электродов. Такие электроды могут выполняться в виде сетки или иметь покрытие, например, в виде пористого материала [15, 20].

- более эффективными оказались электроочистители, у которых используется неоднородное электрическое поле [7, 22, 33, 60, 61, 76, 108, 109]. Вследствие большой неоднородности поля, вызванного оригинальной конфигурацией

электродов высокого напряжения, в межэлектродном пространстве возникает поле, способное ионизировать среду.

Однако такие очистители имеют общий недостаток. Он заключается в том, что по мере накопления частиц загрязнения во внутреннем объеме электроочистителей меняется конфигурация поля и имеет место падение напряженности электрического поля в межэлектродном пространстве и, как следствие, ухудшение эксплуатационных характеристик.

- электроочистители с наполнителем в межэлектродном пространстве [16, 23, 24, 59, 62-65, 77, 127, 147, 151]. Основным отличием таких электроочистителей является то, что накопление и осаждение загрязнений происходит на наполнителе, который находится в межэлектродном пространстве.

В настоящее время в отечественной и зарубежной практике в качестве наполнителя применяют пористые материалы, которые наряду с позитивными качествами придают электрическим фильтрам малый ресурс, высокое гидравлическое сопротивление, большие эксплуатационные затраты и низкий уровень грязеемкости. Поэтому в настоящее время начали появляться публикации [23, 24] по оптимизации и подбору материала наполнителя для электрических фильтров. При этом вопросы взаимодействия поляризационного наполнителя с частицами загрязнений и воды, механизмы осаждения загрязнений и воды на наполнитель являются недостаточно разработанными.

#### **1.6. Анализ существующих конструкций и методов расчёта электроочистителей с наполнителем.**

Как показывает анализ существующих конструкций электроочистителей, для эффективного отделения воды и механических примесей необходимо общий поток жидкости разделять на ряд отдельных потоков с помощью ячеек камер как определено в работах [15, 59, 143, 159]. Наряду с таким подходом при решении задач обезвоживания углеводородных жидкостей в квазипостоянном электрическом поле с целью повышения эффективности очистки и увеличения пропускной способности электроочистителя целесообразно межэлектродное пространство

(камеры - ячейки) заполнить поляризационным наполнителем [9, 17, 23, 24, 37, 39, 62, 69, 106, 147, 157].

Наиболее удачные решения конструктивных схем электродов для электроочистителей представлены в работе [148].

Выбор материала наполнителя базировался на анализе литературных источников [5, 15, 20, 22, 59, 62, 151], который показал, что в качестве поляризационного наполнителя эффективно применение гранул конденсатной керамики и капроновых волокон. Автором работы [148] исследовались четыре типа наполнителей: гранулы конденсатной керамики Т-130; капроновое волокно; щетина; нити шерстяной пряжи.

Испытания образцов электрофильтров предложенных в [148] показали наибольшую эффективность применения шерстяной нити по обезвоживанию авиационных топлив и масел. Причиной возрастания эффективности при использовании в качестве наполнителя нитей шерстяной пряжи является формирование более развитой поверхности осаждения из мелких волокон шерсти, из которых свиты пряжи нитей. При этом формируется не только большая площадь поверхности осаждения, но и возрастает поляризационный эффект наполнителя во внешнем электрическом поле межэлектродного пространства модульной ячейки электроочистителя [23, 24].

Подводя итог проведенному выше анализу различных конструкций электроочистителей и выбору материала наполнителя, можно сделать вывод о перспективности направления – электроочиститель с наполнителем. Однако выбор материала наполнителя является сложной задачей, требующей дальнейших исследований.

Расчет и оптимизацию конструкций электроочистителей эффективнее проводить посредством математического моделирования. Так, в работе [44, 90-93] проведена оптимизация профиля канала электроочистителя топлив на основе анализа уравнений движения заряженных частиц в электрическом поле под действием электростатических и пондемоторных сил. Однако сравнение экспериментальных и расчетных кривых показало, что существует несоответствие между моде-

лью и экспериментом. Такое несоответствие можно объяснить тем, что предложенная математическая модель не учитывает гидродинамику течения жидкости в канале, которая играет существенную роль в процессе очистки [60].

При разработке расчетных моделей эффективности очистки в отдельной ячейке электроочистителя авторами работы [22] была разработана математическая модель, учитывающая время пребывания очищаемой жидкости в электрическом поле и время осаждения частиц. Однако приведённые уравнения для расчета скорости движения заряженных частиц к электроду осаждения получены для ламинарного течения жидкости и не учитывают турбулентность в межэлектродном пространстве.

Авторами работы [84] сделан вывод, что недостаток сведений о механизме зарядки, движения частиц загрязнений в межэлектродном пространстве с неравномерной напряженностью поля не позволяют аналитически вычислить величину параметров электроочистителя.

Поэтому в указанной работе была предпринята попытка построения математической модели для оценки коэффициента отсева от семи факторов: напряжение, размер канала, расстояние между электродами, расстояние между каналами, количество электродов, количество каналов, расход топлива через очиститель. Математическая модель получена в виде полинома, которая позволяет определять коэффициент отсева в зависимости от перечисленных факторов.

При решении вопросов о выборе конфигурации рабочей части электросепаратора авиационных ГСМ, авторами работы [44] был использован метод моделирования на электропроводной бумаге с помощью интегратора. Такое моделирование позволило выбрать оптимальную конструкцию расположения электродов и их профилей. Недостатком таких моделей является то, что не учитывается движение частиц загрязнений в электрическом поле.

Математические модели, разработанные в работах [91, 92], позволяют уточнить расположение электродов по отношению к потоку очищаемой жидкости, напряженности поля, скорости течения жидкости, её вязкости и размера частиц загрязнений.

Авторами работ [7, 69, 93] в моделях по исследованию зависимостей эффективности очистки учитывались параметры изоляционного покрытия электродов, а также наличие наполнителей в межэлектродном пространстве. В работе [61] процесс моделирования очистки топлив и масел с применением поляризационного наполнителя проводится с помощью регрессионного анализа. В основу регрессионной модели положен шестифакторный эксперимент.

В более поздних работах [23, 24, 148] также применяются регрессионные модели. На основе факторного анализа авторами перечисленных работ выявлено 17 факторов, которые влияют на эффективность электроочистителя.

Общим недостатком регрессионных моделей, особенно многофакторных, является их низкая адекватность эксперименту и сложность анализа.

Поэтому некоторые исследователи отказываются от регрессионных моделей, как мало эффективных, и используют физический подход с применением уравнений гидродинамики [108, 109]. Эти модели учитывают движение частиц примеси в изучаемом электрическом поле с учетом вязкого трения и движения самой вязкой жидкости. Такие модели позволяют получить решение задачи нахождения пондеромоторных сил, действующих на частицы примеси со стороны электрического поля и силы тяжести.

Исходя из представленного выше анализа принципов построения математических моделей и факторов, входящих в эти модели, можно сделать вывод, что разработка модели высокоэффективного электрофильтра с наполнителем для очистки дизельного топлива от механических примесей и воды возможна только путем нахождения строгого решения задачи действия пондеромоторных сил на частицу примеси, находящуюся в топливе. Разработка и анализ такой модели с целью создания эффективной конструкции электрического фильтра с наполнителем является актуальной задачей.

Таким образом, современные тенденции повышения эффективности использования мобильной сельскохозяйственной техники требуют новых подходов в совершенствовании условий её эксплуатации, в частности обеспечивающих использование кондиционированного дизельного топлива с помощью разработки

новых и совершенствования существующих устройств его очистки, а также новых подходов в решении проблемы обеспечения надёжности, реализация которых призвана снизить затраты труда на техническое обслуживание и ремонт.

### **1.7 Цель и задачи исследования.**

Мобильная сельскохозяйственная техника работает в экстремальных условиях эксплуатации. Для неё характерны сжатые сроки интенсивной работы в любых климатических условиях в несколько смен, практически непрерывно. Любая остановка сельскохозяйственного комплекса сопряжена с большими потерями урожая. Указанные особенности эксплуатации сельскохозяйственной техники предъявляют особые требования к её надёжности.

Эффективность эксплуатации мобильной сельскохозяйственной техники, уровень надёжности которой в настоящее время недостаточен [6, 38, 74, 78, 125, 137] в определённой степени зависит от стабильности функциональных параметров топливной системы дизелей. Отсутствие стабильности функциональных параметров топливной аппаратуры обусловленное, главным образом, загрязнением дизельного топлива сопряжено с неравномерностью подачи топлива, отклонением угла опережения, снижением пусковых качеств, увеличением некомпенсированных утечек, а в результате снижением тяговых характеристик и перерасхода топлива.

Из-за указанных неисправностей возникает 90...95% отказов топливной системы, что безусловно снижает коэффициенты готовности  $K_T$  и технического использования  $K_{ТИ}$  мобильного сельскохозяйственного агрегата в целом.

Авторы работ [4, 27, 28, 82, 98, 152] приходят к выводу что обеспечение чистоты используемого топлива является важнейшим направлением в обеспечении функциональной стабильности топливной системы. Однако существующая система очистки дизельного топлива по мнению [14, 27, 70, 120] не удовлетворяет современным требованиям.

Использование современных методов и средств очистки нефтепродуктов без чёткого обоснования и технических требований к чистоте дизельного топлива

и места в технологической цепи операций не представляется возможным поскольку известные технические решения [8, 86, 102-106, 110, 112] предназначены для узкоцелевого использования.

Поэтому целью данной работы является:

- установить причины и изучить закономерности влияния загрязненности дизельного топлива на износ соединений топливной системы дизельного двигателя и их влияние на функциональные характеристики машино-тракторного агрегата;
- теоретически обосновать и экспериментально проверить модель процесса изнашивания прецизионных соединений топливной системы дизельного двигателя и разработать методику прогнозирования их ресурса и технические требования к чистоте дизельного топлива;
- разработать установку для сепарации механических примесей и воды в дизельном топливе, которое используется мобильной сельскохозяйственной техникой;
- разработать практические рекомендации по повышению надежности и функциональной стабильности мобильной сельскохозяйственной техники путем усовершенствования ее технического обслуживания;
- теоретически и экспериментально определить закономерности влияния загрязненности дизельного топлива на надежность и функциональные характеристики машино-тракторных агрегатов и определить технико-экономическую целесообразность повышения чистоты дизельного топлива предложенными средствами.

## РАЗДЕЛ 2

### ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ЗАГРЯЗНЕННОСТИ ДИЗЕЛЬНОГО ТОПЛИВА НА ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МТА

#### 2.1 Исследования закономерностей изменения производительности и расхода топлива МТА при различных уровнях его загрязненности

Целью данных исследований является разработка математического аппарата для построения зависимостей основных функциональных характеристик (производительность и расход топлива) от наработки МТА при различных уровнях загрязненности дизельного топлива.

Самым большим препятствием при решении поставленной задачи является отсутствие информации о динамике изменения в процессе эксплуатации функциональных характеристик энергетического средства сельскохозяйственного агрегата. В частности, располагая данными об изменении номинальной мощности двигателя и удельного расхода топлива, в зависимости от наработки трактора представляется возможным произвести энергетическую оценку тракторного агрегата, например на вспашке. Принимая, что агрофоном машино-тракторного агрегата является стерня и воспользовавшись данными [118] можно построить тяговую характеристику для трактора Т-150К, которая приведена на рис. 2.1.

Удельное тяговое сопротивление плуга  $K'_{пл.V}$  можно определить по формуле [118]

$$K'_{пл.V} = K_0 \left[ \frac{1 + (V'_p - V_0) \cdot \Delta C}{100} \right], \text{ кН/м} \quad (2.1)$$

где  $K_0$  – удельное тяговое сопротивление плуга, соответствующее скорости  $V_0 = 5$  км/ч;

$h$  – глубина пахоты, м;

$V'_p$  – рабочая скорость машино-тракторного агрегата, км/ч;

$\Delta C$  – темп нарастания удельного тягового сопротивления в зависимости от скорости агрегата,  $\Delta C = 3\%$  [118].

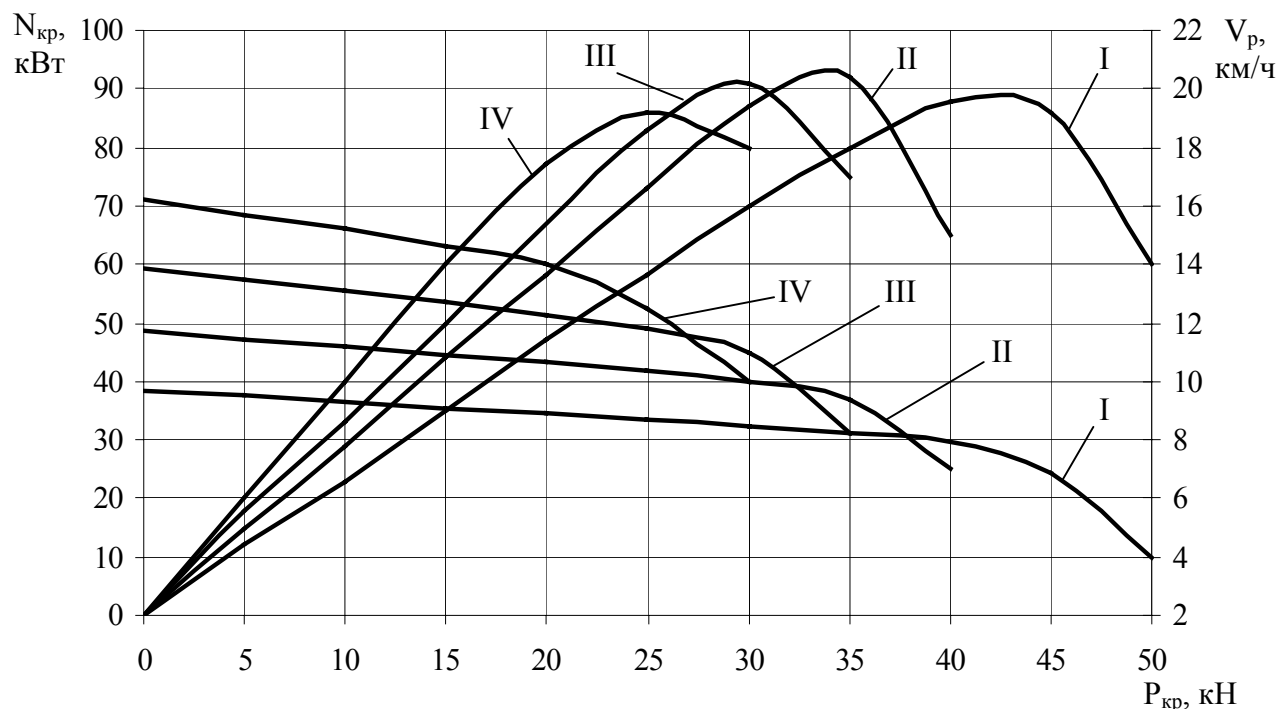


Рисунок 2.1. Тяговое сопротивление трактора Т-150К.

При установившемся движении пахотного агрегата на местности с уклоном  $i = 0$  тяговое сопротивление можно определить по формуле:

$$R_a = K'_{нл.V} \cdot b_k \cdot n_k \cdot \beta, \text{ кН} \quad (2.2)$$

где  $b_k$  – ширина лемеха, м;

$n_k$  – количество лемехов;

$\beta$  – коэффициент использования конструктивной ширины лемеха,  $\beta = 1,04 \dots 1,06$ , [118].

С учётом вероятностного распределения значения тягового сопротивления плуга можно утверждать, что средняя расчётная степень использования силы тяги будет всегда меньше единицы  $\xi_{P_{кр}} = 0,9$  [118], тогда

$$R_a = P'_{кр} \cdot \xi_{P_{кр}}, \text{ кН} \quad (2.3)$$

а рабочая скорость определится по формуле

$$V'_p = \frac{3,6 \cdot N'_{кр} \cdot \xi_{P_{кр}}}{R_a}, \text{ км/ч} \quad (2.4)$$

Подставляя (2.2) и (2.4) в уравнение (2.1) и сделав соответствующие преобразования, получим квадратное уравнение для удельного тягового сопротивления плуга

$$(K'_V)^2 = K_0 \cdot h \cdot K'_V \cdot \left(1 - V_0 \cdot \frac{\Delta C}{100}\right) + \frac{3,6 N'_{кр} \cdot \xi_{P_{кр}} \cdot \Delta C}{b_{\kappa} n_{\kappa} \beta} \cdot \frac{\Delta C}{100}. \quad (2.5)$$

Корень уравнения (2.5) будет равен:

$$K'_V = 0,5 K_0 h \left(1 - V_0 \cdot \frac{\Delta C}{100}\right) + \sqrt{0,25 K_0^2 h^2 \left(1 - V_0 \cdot \frac{\Delta C}{100}\right) + \frac{3,6 N'_{кр} \cdot \xi_{P_{кр}} \Delta C}{100 b_{\kappa} n_{\kappa} \beta}}. \quad (2.6)$$

При этом вторым значением корня, как не имеющего физического смысла пренебрегаем.

Беря во внимание изложенное, часовая производительность пахотного агрегата будет иметь следующее выражение:

$$W = \frac{0,36 N'_{кр} \beta}{0,5 K_0 h \left(1 - \frac{V_0 \Delta C}{100}\right) + \sqrt{0,25 K_0^2 h^2 \left(1 - V_0 \cdot \frac{\Delta C}{100}\right) + \frac{3,6 N'_{кр} \xi_{P_{кр}} \Delta C}{100 b_{\kappa} n_{\kappa} \beta}}}, \text{ га/ч.} \quad (2.7)$$

Погектарный расход топлива, без учёта работы на холостом ходу и поворотов, определяется по формуле:

$$g_{га} = \frac{g_e N'_{кр}}{W}, \text{ кг/га}, \quad (2.8)$$

где  $g_e$  – удельный расход топлива, кг/кВт·ч;

$N'_{кр}$  – крюковая мощность, кВт.

Текущее значение крюковой мощности трактора можно представить следующей зависимостью:

$$N'_{кр} = N'_{ен} \cdot \xi_{N_{кр}} = N_{кр \max} \cdot \frac{N'_{ен}}{N_{ен \max}}, \quad (2.9)$$

где  $\xi_{N_{кр}} = \frac{N_{кр \max}}{N_{ен \max}}$  - коэффициент использования мощности двигателя на

крюке;

$\xi_{N_{ен}} = \frac{N'_{ен}}{N_{ен}}$  - коэффициент мощности двигателя;

$N'_{ен}$  – текущее значение эффективной мощности двигателя, главным образом, зависящее от технического состояния шатунно-поршневой группы и топливной системы.

Если сделать допущение, что техническое состояние шатунно-поршневой группы неизменно, а в процессе наработки переменено только лишь техническое состояние топливной системы, характеризуемое гидравлической плотностью плунжерных пар ТНВД, то становится очевидным что

$$N'_{ен} = f(\Psi), \quad (2.10)$$

где  $\Psi$  – цикловая подача ТНВД, изменения которой в зависимости от наработки для различных вариантов использования дизельного топлива (различная загрязнённость) приведено в табл. Д.1. приложения Д.

Используя основные положения методики теплового расчёта двигателя и зная зависимость цикловой подачи ТНВД от наработки можно получить зависимости

$$N'_{ен} = f(T), \quad (2.11)$$

где  $T$  – наработка машино-тракторного агрегата в моточасах.

Используя данные тяговой характеристики трактора Т-150К (рис. 2.1) и расчётные значения коэффициента  $\xi_{N_{ен}}$  для различных наработок, получены текущие значения крюковой мощности  $N'_{кр}$  для различных передач (табл. 2.1).

Используя характерные значения  $N'_{кр}$  для различных передач (табл. 2.1) по тяговой характеристике трактора Т-150К определяются соответствующие значения  $P'_{кр}$ , а затем рассчитываются допустимые значения тягового сопротивления  $[R_a]$  по формуле:

$$[R_a] = P_{кр}^{\prime} \xi_{P_{кр}^{\prime}} \quad (2.12)$$

Таблица 2.1.

Значения  $N_{кр}^{\prime}$  для различных передач в зависимости от эффективной мощности двигателя.

№ п/п	$\xi_{N_{ен}}$	$N_{ен}^{\prime}$	$N_{кр}^{\prime}$			
			I	II	III	IV
1	1,00	121,30	89,6	92,5	92,0	88,1
2	1,05	127,30	94,1	97,1	96,6	92,5
3	1,02	123,68	91,4	94,1	93,8	89,9
4	0,98	118,90	87,8	90,7	90,2	86,3
5	0,96	116,80	84,2	88,8	88,3	84,6
6	0,90	109,23	80,64	83,3	82,8	79,2
7	0,89	108,10	79,7	82,3	81,9	78,9
8	0,87	105,92	77,9	80,5	80,0	76,6
9	0,78	95,21	69,9	72,2	71,8	68,7
10	0,77	94,64	69,0	71,2	70,8	67,8
11	0,76	92,33	68,1	70,3	69,9	67,0
12	0,67	80,52	60,0	62,0	61,6	59,0
13	0,64	77,50	57,3	59,2	58,4	56,4

Численные значения  $N_{кр}^{\prime}$ ,  $P_{кр}^{\prime}$  и  $[R_a]$  соответствующие экспериментальным данным цикловой подачи ТНВД (табл. Д.1. приложения Д) приведены в табл. 5.5 приложения Д.

Комплектуя пахотный агрегат исходя из условий максимального использования тягового усилия трактора таким образом, чтобы соблюдалось условие  $R_{анл} \leq [R_a]$  был произведён расчёт фактической производительности и погектарного расхода топлива МТА на пахоте при работе его на различных передачах и различных вариантах использования дизельного топлива (табл. 5.4).

При этом использовались марки плугов ПЛН-4-35, ПЛН-5-35 и ПЛН-6-35. расчёт тягового усилия плуга осуществлялся при  $\Delta C = 5\%$ ,  $h = 0,3$  м,  $K_0 = 50$  кПа, значение уклона  $i = 0$ .

Таким образом получені зависимости (2.7) и (2.8) позволяют достоверно оценить, при условии известной зависимости (2.10), степень влияния загрязнён-

ности дизельного топлива на производительность и экономичность работы МТА. Обсуждение полученных данных приведено в главе 5.

## **2.2. Моделирование процесса изнашивания плунжерных пар ТНВД.**

Целью данных исследований явилось создание математической модели процесса изнашивания плунжерных пар ТНВД дизелей с учётом загрязнённости дизельного топлива, используя которую возможно: во-первых, прогнозировать ресурс подвижных сопряжений топливо-подающей аппаратуры; во-вторых, управлять процессом изнашивания этих сопряжений путём обеспечения той или иной степени чистоты дизельного топлива, и наконец, обосновать технические требования к чистоте дизельного топлива, соблюдение которых гарантировало бы обеспечение заданного ресурса ТНВД.

Известно, что безотказность и ресурс топливной аппаратуры главным образом зависит от загрязненности топлива механическими примесями и водой.

Наиболее чувствительными элементами топливной аппаратуры к загрязнению топлива являются плунжерная пара топливного насоса высокого давления (ТНВД) и клапан распылителя форсунки.

Условия эксплуатации дизелей на мобильной сельскохозяйственной технике характеризуются большим спектром загрязненности дизельного топлива. Поэтому крайне важно еще на стадии проектирования иметь такой инструментарий, который бы позволял осуществлять прогнозирование ресурса наиболее чувствительной к загрязнению топливной аппаратуры.

Методология создания такого инструментария, включая и программное обеспечение, заключается в следующем: на основании теории износа с учетом особенностей конструкции топливной системы дизеля разрабатывается математическая модель процесса изнашивания; осуществляется экспериментальная проверка адекватности математической модели и разрабатывается программное обеспечение для расчета на ЭВМ величины износа в зависимости от времени эксплуатации топливной аппаратуры; используя сведения о предельном зазоре подвижных соединений элементов топливной аппаратуры, определяется их ресурс в

зависимости от наличия в топливе механических примесей.

Реализация указанной методологии осуществлена нами на примере плунжерной пары топливного насоса дизельного двигателя СМД-62 [30].

С этой целью была использована математическая модель изнашивания плунжерной пары ТНВД, в первые изложенная в работах [27, 28], и уточнена нами в работе [30]. Согласно этой модели можно констатировать, что величина износа трущихся поверхностей элементов топливной системы тем больше, чем большее количество частиц примеси проходит через их зазоры. Так, элементарный износ  $\Delta I_x$  при прохождении массы  $\Delta g_x$  частиц размером  $x$  вместе с топливом через зазор плунжерной пары равен:

$$\Delta I_x = J \cdot \Delta g_x, \text{ мкм} \quad (2.13)$$

$$J = k \left( \frac{x - a}{\bar{x}} \right)^\gamma P_x, \text{ мкм/ч} \quad (2.14)$$

где  $J$  – удельная скорость изнашивания, мкм/час обусловленная вероятностью  $P_x$ ;

$P_x$  – вероятность проникновения в зазор величиной  $a$ , мкм плунжерной пары частицы абразива размером  $x$  мкм;

$$P_x = \exp \left\{ - \frac{(x - a)^2}{2\sigma^2} \right\}, \quad (2.15)$$

где  $\bar{x}$  – среднее значение размера абразивной частицы, мкм;

$k$  – коэффициент, учитывающий свойства материалов деталей плунжерной пары и механических примесей. Величина  $k$  находится путем сравнения расчетных данных с экспериментальными.

$\gamma$  и  $\sigma$  - коэффициенты характеризующие конструктивные особенности плунжерной пары. Они подбираются сравнением расчётной и экспериментальной зависимостью и по существу являются подгоночными.

Известно [86], что в большинстве случаев дисперсный состав механических примесей топлив аппроксимируется логарифмически нормальным распреде-

лением, тогда интегральная функция будет иметь вид:

$$\Phi_L(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \lg \beta} \int_{-\infty}^{\lg x} \exp\left\{-\frac{(\lg x - \lg \bar{x})^2}{2 \lg^2 \beta}\right\} d(\lg x). \quad (2.16)$$

Для построения математической модели изнашивания плунжерной пары использовалась схема циркуляции абразива вместе с топливом в дизельном двигателе СМД-62 (рис 2.2).

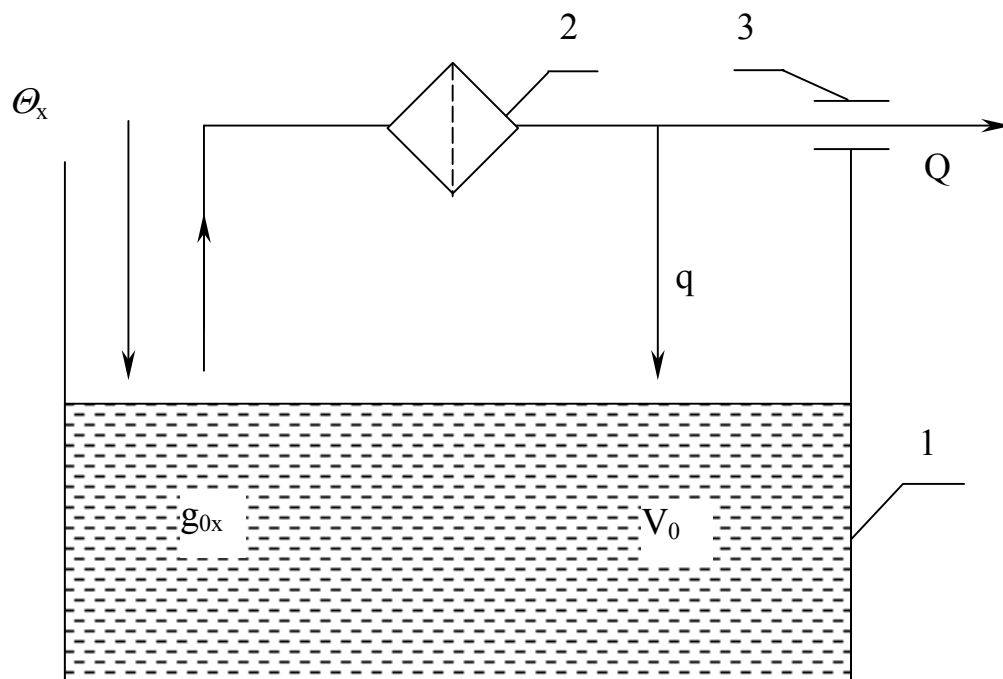


Рисунок 2.2. Принципиальная схема системы питания двигателя СМД-62:

1 – топливный бак; 2 – фильтр; 3 – плунжерная пара.

На схеме рис. 2.2 использованы следующие обозначения:

$Q$  – расход топлива, проходящий через ТНВД в камеры сгорания. Для топливной системы СМД-62  $Q = 25,7$  л/час;

$q$  – расход топлива, возвращаемый в бак после прохождения через фильтр и имеющий иной дисперсный состав мехпримесей,  $q = 25,7$  л/час;

$\Theta_x$  – скорость поступления новых порций мехпримесей с размером частиц  $x$  в топливный бак (г/л)/час;

$g_{0x}$  - начальная концентрация мехпримесей с размером частиц  $x$ , г/л;

$V_0$  – емкость топливного бака, л.

Кроме того, предполагается, что зазор в плунжерной паре равен  $a$  мкм и в процессе работы увеличивается до заданного предельного значения  $a_{max}$ . По данным [152]  $a_{max} \approx 12,19$  мкм.

В процессе эксплуатации дизеля вместе с топливом удаляются мехпримеси и, проходя через фильтр, изменяют свой дисперсный состав. Часть топлива  $q$  возвращается в бак, другая часть  $Q$  попадает в ТНВД и участвует в процессе изнашивания трущихся поверхностей.

Одновременно с этим в процессе работы по разным причинам в топливный бак из окружающего пространства поступает воздух, содержащий абразивные примеси. Скорость поступления их в массовой доле составляет  $\theta_x$  для размера частиц  $x$ , а дисперсный состав может быть любым. Таким образом, концентрация и дисперсный состав примеси в топливном баке в процессе работы непрерывно изменяется.

Для вычисления износа плунжера за время одного опорожнения топливного бака составим уравнение баланса и учтем, что:

- концентрация мехпримесей, поступающих в бак за время  $\Delta t$  составляет:

$$\Delta g_{1x} = \theta_x \cdot \Delta t \quad (2.17)$$

- концентрация мехпримесей, задерживаемых фильтром:

$$\Delta g_{2x} = \frac{g_x \cdot K_x}{V_0 - Q \cdot t} (q + Q) \Delta t, \quad (2.18)$$

где  $K_x$  – коэффициент фильтрации частиц размером  $x$ ;

$t$  – время работы двигателя с момента заправки топливного бака;

- концентрация частиц, удаленных из бака через плунжерные пары ТНВД:

$$\Delta g_{3x} = \frac{g_x (1 - K_x)}{V_0 - Q \cdot t} Q \cdot \Delta t \quad (2.19)$$

- изменение концентрации монодисперсных частиц размером  $x$  за время  $\Delta t$  составляет:

$$\Delta g_x = \Delta g_{1x} - (\Delta g_{2x} + \Delta g_{3x}). \quad (2.20)$$

Подставив в (2.20) соответствующие выражения из (2.17), (2.18) и (2.19) и переходя к пределу при  $\Delta t \rightarrow 0$ , получим дифференциальное уравнение:

$$\frac{dg_x}{dt} + \frac{qK_x + Q}{V_0 - Q \cdot t} \cdot g_x = \theta_x, \quad g_x(0) = g_{0x}. \quad (2.21)$$

Общее решение уравнения (2.21) имеет следующий вид:

$$g_x(t) = g_{0x} \left(1 - \frac{t}{\tau}\right)^{1+\alpha_x} + \theta_x \tau \frac{1 - \frac{t}{\tau}}{\alpha_x} \left[1 - \left(1 - \frac{t}{\tau}\right)^{\alpha_x}\right], \quad (2.22)$$

где  $\tau = V_0/Q$  - время опорожнения бака,

$$\alpha_x = K_x \frac{q}{Q}. \quad (2.23)$$

Подставив (2.22) в (2.23) и, проинтегрировав по  $t$  в пределах от  $t_1$  до  $t_2$ , найдем концентрацию абразива, прошедшего через плунжерную пару за промежуток времени  $\Delta t = t_2 - t_1$ :

$$\Delta g_x(t_1, t_2) = \frac{\theta_x(t_2 - t_1)}{Q\alpha_x} + \frac{g_{0x} - \theta_x \frac{\tau}{\alpha_x}}{Q(\alpha_x + 1)} \left[ \left(1 - \frac{t_1}{\tau}\right)^{\alpha_x+1} - \left(1 - \frac{t_2}{\tau}\right)^{\alpha_x+1} \right]. \quad (2.24)$$

Подставив (2.24) в (2.13) и, переходя к безразмерным величинам:

$\xi = x/\bar{x}$ ,  $\xi_1 = a/\bar{x}$ ,  $\xi_{\max} = x_{\max}/\bar{x}$  получим:

$$I(t_1, t_2) = k\bar{x} \int_{\xi_1}^{\xi_{\max}} (\xi - \xi_1)^\gamma \exp\left\{-\frac{(\xi - \xi_1)^2}{2\sigma_0^2}\right\} (1 - K_\xi) \times \\ \times \left\{ \frac{\theta_\xi(t_2 - t_1)}{\alpha_\xi} + \frac{1}{\alpha_\xi + 1} \left( g_{0\xi} - \frac{\theta_\xi \tau}{\alpha_\xi} \right) \left[ \left(1 - \frac{t_1}{\tau}\right)^{\alpha_\xi+1} - \left(1 - \frac{t_2}{\tau}\right)^{\alpha_\xi+1} \right] \right\} d\Phi(\xi). \quad (2.25)$$

$$\text{где: } \sigma_0 = \frac{\sigma}{\bar{x}}; \alpha_\xi = K_\xi \frac{q}{Q};$$

$x_{max}$ - максимальный размер частиц мехпримесей.

Интегрирование можно осуществить при условии, если известны зависимости начальной концентрации (дисперсный состав) мехпримесей  $g_0$ , скорости их поступления в бак  $\Theta_\xi$  и коэффициента фильтрации фильтра, установленного в топливной системе  $K_\xi=K(\xi)$  от  $\xi = \frac{x}{\bar{x}}$ . Разработанная нами программа для расчета на ЭВМ предусматривает задание всех этих величин для разных  $\xi$ .

Все неизвестные коэффициенты, входящие в (2.25), определены экспериментально по специальной методике с помощью модельных трущихся соединений на машине трения (см. Раздел 3)

Как следует из (2.25) в процессе работы зазор  $a$  плунжерной пары увеличивается на величину суммарного износа  $I_{(t)}$ , так что нижний предел интегрирования  $\xi = \frac{a + I_{(t)}}{\bar{x}}$  также возрастает.

С учетом этого промежуток времени  $t$ , равный времени опорожнения бака, разбивается на  $n$  промежутков  $\Delta t = t/n = t_2 - t_1$ , на каждом из которых величина зазора считалась постоянной. Это значит, что на каждом промежутке  $\Delta t = t_{k+1} - t_k$ , величина зазора была равна

$$a_k = a_0 + I_{k-1},$$

где  $I_{k-1}$ - суммарный износ за (k-1) предыдущий промежуток .

Моменты времени  $t_1$  и  $t_2$  (или  $t_k$  и  $t_{k+1}$ ) могут лежать в интервале от 0 до  $\tau$   
т.е.  $0 \leq t_1, t_2 \leq \tau$

Расчет износа за  $N$  циклов заправки бака производится по тому же принципу – рассчитывается износ  $I_1$  за первый цикл, а новое значение зазора  $a+I_1$  является исходным для расчета износа во втором цикле и т.д.

Реализация разработанной нами программы для ЭВМ (Приложение А), по-

зволила получить зависимости  $I=f(t)$  для различных начальных концентраций мехпримесей в используемом топливе (рис. 2.3), которые по сути являются графическим отображением математической модели изнашивания плунжерных пар ТНВД.

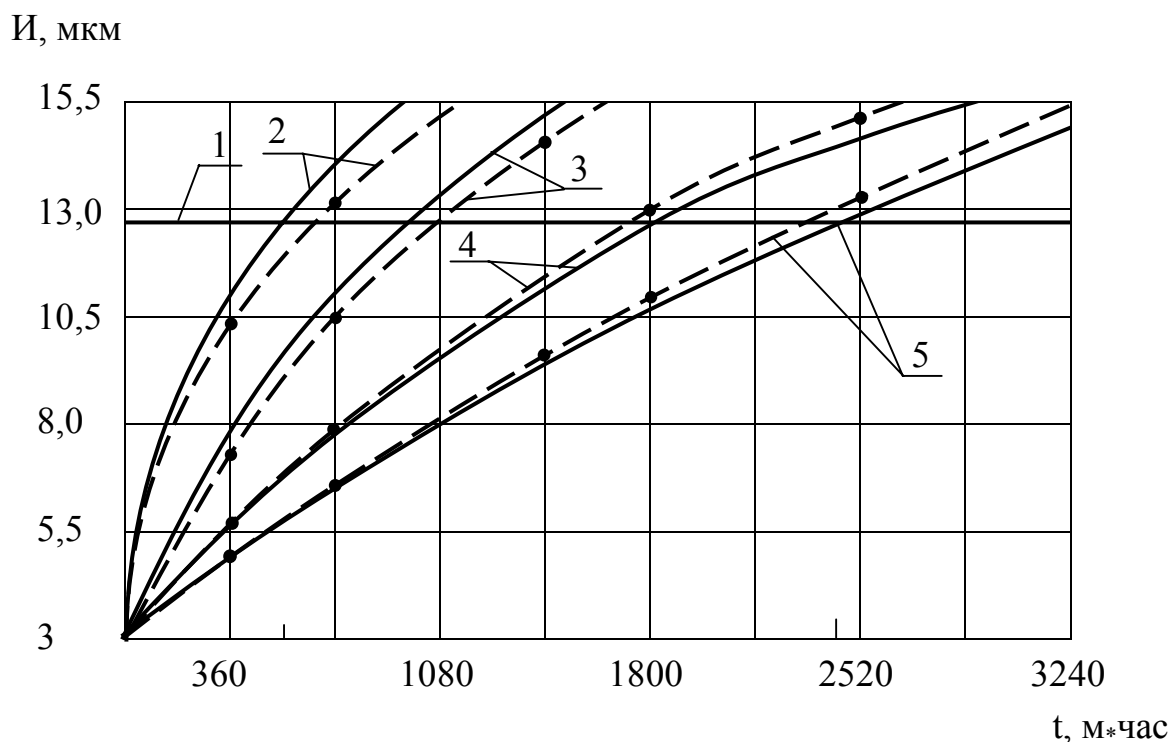


Рисунок 2.3. Динамика изнашивания плунжерной пары ТНВД двигателя СМД-62 в зависимости от загрязненности топлива: 1-предельное значение зазора в плунжерной паре; 2-топливо в условиях поставки; 3, 4 и 5-топливо, очищенное серийным фильтром с тонкостью фильтрации 20 мкм; электрофильтром с тонкостью фильтрации 10 мкм; электрофильтром с тонкостью фильтрации 10 мкм и серийным фильтром с тонкостью фильтрации 20 мкм;

- расчетные; ----- экспериментальные зависимости.

Предложенная математическая модель изнашивания плунжерных пар в зависимости от загрязнённости дизельного топлива явилась исходным материалом для решения ряда прикладных задач. В частности, располагая такой моделью, можно теоретически обосновать технические требования к чистоте дизельного топлива, а также разработать методику прогнозирования ресурса плунжерных соединений топливоподающей аппаратуры.

### **2.2.1. Обоснование технических требований к чистоте дизельного топлива.**

Наличие обоснованных технических требований к чистоте дизельного топлива является важной технико-экономической задачей. Во-первых, это позволит разработать технические условия на проектирование фильтрующих устройств, а во вторых, сопоставить затраты на обеспечение указанных требований.

На практике обеспечить эксплуатацию мобильной сельскохозяйственной техники на топливе, не содержащем механических загрязнений, не представляется возможным. А повышение его чистоты сопряжено с дополнительными затратами, подчас не соизмеримыми с эксплуатационными расходами, необходимыми для поддержания ее в работоспособном состоянии.

Обоснование показателей чистоты дизельного топлива должно базироваться на условии обеспечении нормируемого ресурса наиболее чувствительных к загрязнению сопряжений, которыми являются прецизионные сопряжения топливоподающей аппаратуры.

С этой целью, используя методику ускоренных испытаний (раздел 3), были получены зависимости скорости изнашивания модельных плунжерных пар для различного размера частиц (рис. 2.4); износные испытания проводились продолжительностью 6 часов.

Анализ полученных зависимостей свидетельствует о том, что для соединений с начальным зазором, равным 3 мкм, наиболее нежелательными являются механические частицы размером от 4 мкм до 10 мкм. Это можно объяснить следующим образом: начальный зазор в процессе работы за счет упругих и пластических деформаций шероховатостей поверхностных слоев увеличивается, и абразивные частицы с размером более 4 мкм, попадая в зазор, дробятся и размалываются. Дроблению способствует высокая твердость материала прецизионных соединений (ШХ15), которая равна HRC 62...64. Такие частицы, попадая в зазор, вызывают царапающее и режущее действие поверхностных слоев со снятием стружки.

С увеличением концентрации абразивных частиц до 150г/т скорость изнашивания увеличивается почти в 7 раз.

Абразивные частицы размером меньше 3 мкм особого влияния на износ не оказывают. Износ в этом случае, по-видимому, связан с формированием рабочей (оптимальной) шероховатости поверхностей трения.

Абразивные частицы в диаметре более 10 мкм не вызывают такого усиленного изнашивания, как частицы размером 4 мкм. Это можно объяснить тем, что размеры таких частиц превышают значение начального зазора, а следовательно, в контакт попадает значительное число частиц, которые на входе в зазор размалываются. При длительных испытаниях или эксплуатации зазор в сопряжении за счет изнашивания постоянно увеличивается, и крупные частицы будут включаться в работу, вызывая увеличение скорости изнашивания.

Результаты ускоренных износных испытаний модельных образцов с помощью масштабных коэффициентов (формулы (3.8) и (3.11)) были преобразованы в зависимости суммарного линейного износа от времени для натуральных соединений (рис. 2.5).

Анализ приведенных графиков позволяет установить, что достижение предельного зазора в плунжерной паре, работающей на топливе, в котором отсутствуют абразивные частицы, составляет 3000 часов. В то же время при концентрации 100 г/т частиц размером 4...6 мкм время достижения предельного зазора составляет всего 640 часов.

Приведенные данные подтверждают очевидность влияния показателей чистоты дизельного топлива на изнашивание прецизионных сопряжений топливоподающей аппаратуры.

Однако эти данные не дают точного ответа на вопрос, какие же должны быть технические требования к указанным показателям. Для ответа на этот вопрос правомочно воспользоваться следующими соображениями:

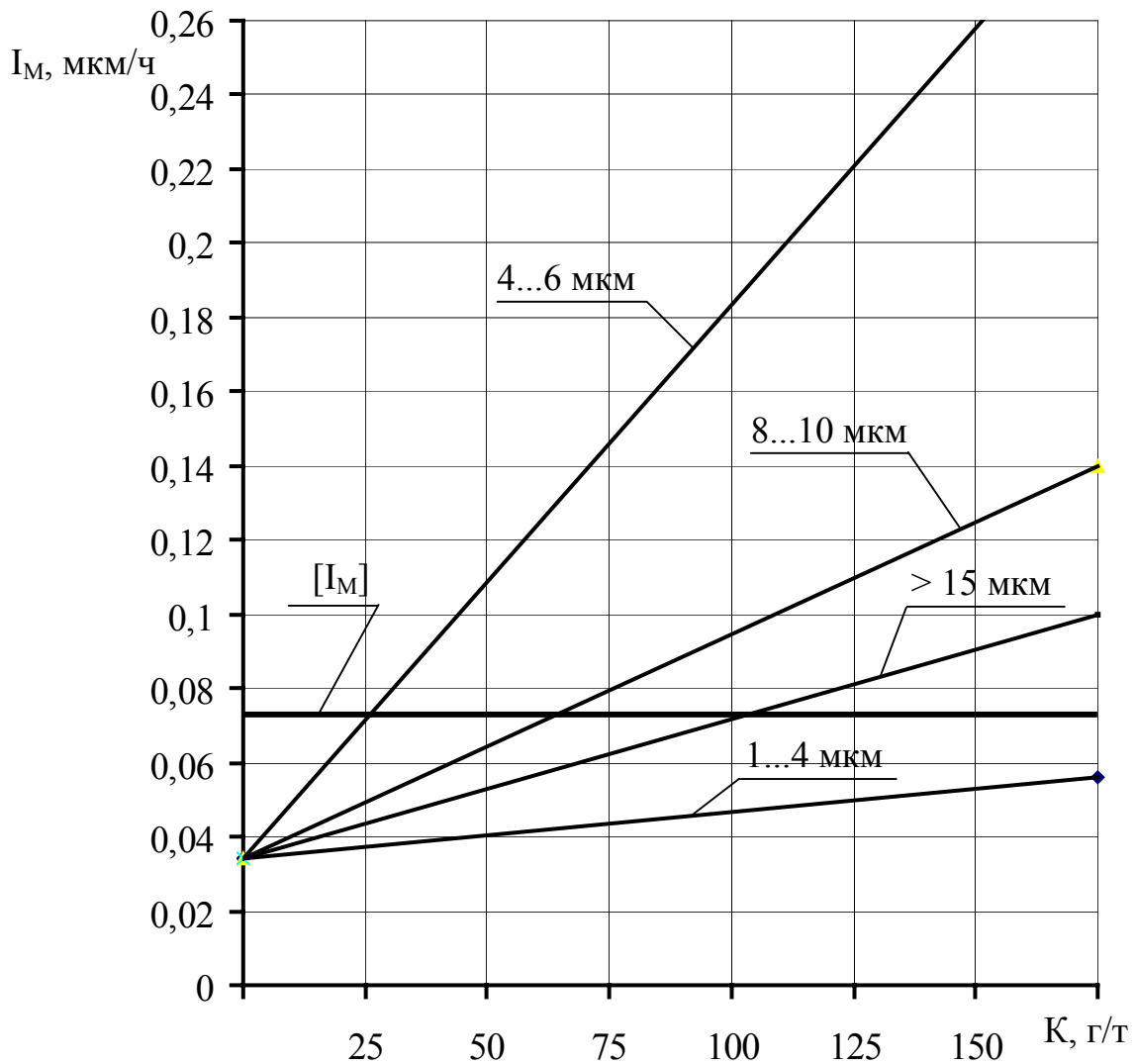


Рисунок 2.4. Аппроксимированные зависимости скорости изнашивания модельной пары трения  $I_M$ , от массовой доли механических примесей в дизельном топливе.

Значения массовой доли механических примесей в дизельном топливе функционально определяют скорость изнашивания плунжерной пары. Предельное значение скорости изнашивания деталей плунжерной пары с допущениями можно определить по формуле:

$$[I_H] = \frac{\Delta a}{T}, \quad (2.26)$$

где  $\Delta a$  - допуск посадки:  $\Delta a = a_{max} - a_0$ ;

$a_{max}$  - предельное значение зазора,  $a_{max} = 12,19$  [152];

$a_0$  - начальные значения зазора;

$T$  – нормируемый ресурс плунжерной пары,  $T = 1500$  час.

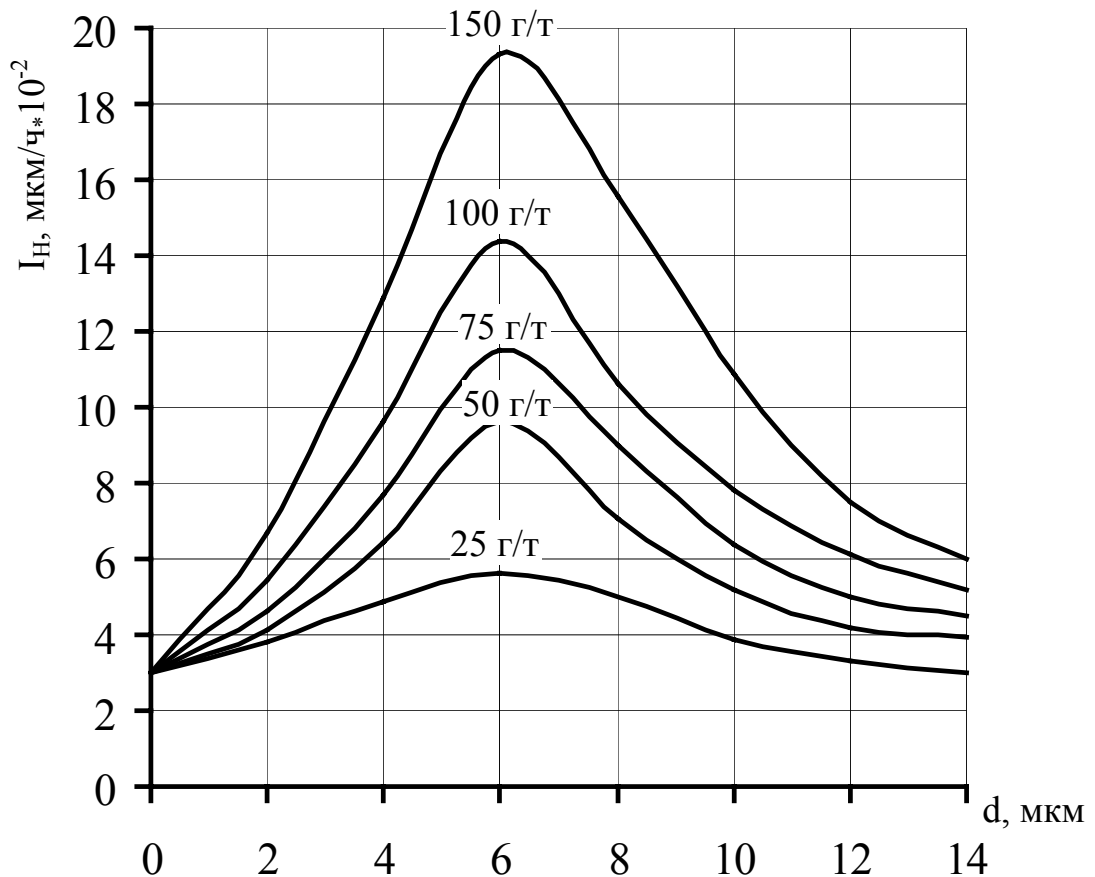


Рисунок 2.6. Зависимости скорости изнашивания натурной пары трения  $I_H$ , от размеров частиц механических примесей.

Воспользовавшись ранее изложенной методикой расчета скорости изнашивания натурной и модельной плунжерных пар, получим  $[I_M] = 0,069 \cdot 10^{-2}$  мкм/час.

Если наложить значение предельной скорости изнашивания на график зависимостей  $I_M=f(K)$ , то ординаты пересечения горизонтальной прямой, проведенной на расстоянии  $[I_M]$  от оси  $X$  с указанными зависимостями, определяют допустимые значения массовой доли механических примесей в дизельном топливе.

Так например, допустимая массовая доля частиц размерной группы 4...6 мкм не должна превышать 25 г/т, для размеров 8...10 мкм - 62 г/т и для размеров более 15 мкм – 100 г/т.

Учитывая то, что частицы больших размерных групп в результате перемазывания в процессе эксплуатации приобретают размеры, соизмеримые с величинами

ной зазора, то нормируемой величиной массовой доли механических примесей в дизельном топливе для мобильной техники, на которой используется дизель СМД – 62, следует считать 25 г/т. Что касается обоснования технических требований к дисперсному составу механических примесей, то полученные результаты позволяют ориентировочно определить наиболее опасную размерную группу, которая находится в пределах 4...10 мкм. Однако после обработки результатов исследований, представленных на рис. 2.5, была получена серия кривых (рис. 2.6), характеризующих зависимость скорости изнашивания плунжерных пар в зависимости от размеров частиц механических примесей, находящихся в дизельном топливе. Анализ приведенных на рис. 2.6 зависимостей позволяет однозначно утверждать, что для плунжерной пары ТНВД двигателя СМД – 62 наиболее опасными являются частицы размером 6 мкм независимо от их массовой доли в дизельном топливе.

Таким образом, в результате проведенных исследований установлено, что допустимая массовая доля механических примесей размером не более 6 мкм, составляет 25 г/т. Указанные технические требования являются исходными условиями для проектирования оборудования для подготовки топлива перед заправкой и систем очистки, устанавливаемых на сельскохозяйственной технике.

### **2.2.2. Прогнозирование ресурса прецизионных соединений топливоподающей аппаратуры.**

Целью данных исследований является разработка методики прогнозирования прецизионных соединений топливоподающей аппаратуры дизелей, устанавливаемых на мобильной сельскохозяйственной технике, и апробация её на примере плунжерных пар ТНВД двигателя СМД-62.

Исходной для разработки указанной методики может служить разработанная математическая модель изнашивания прецизионного соединения топливоподающей аппаратуры дизеля, которая представлена формулой (2.25).

Численное решение указанной зависимости с помощью ЭВМ возможно при известных параметрах, входящих в (2.25)  $k$ ,  $v$ ,  $\sigma$ . Выбор этих параметров мо-

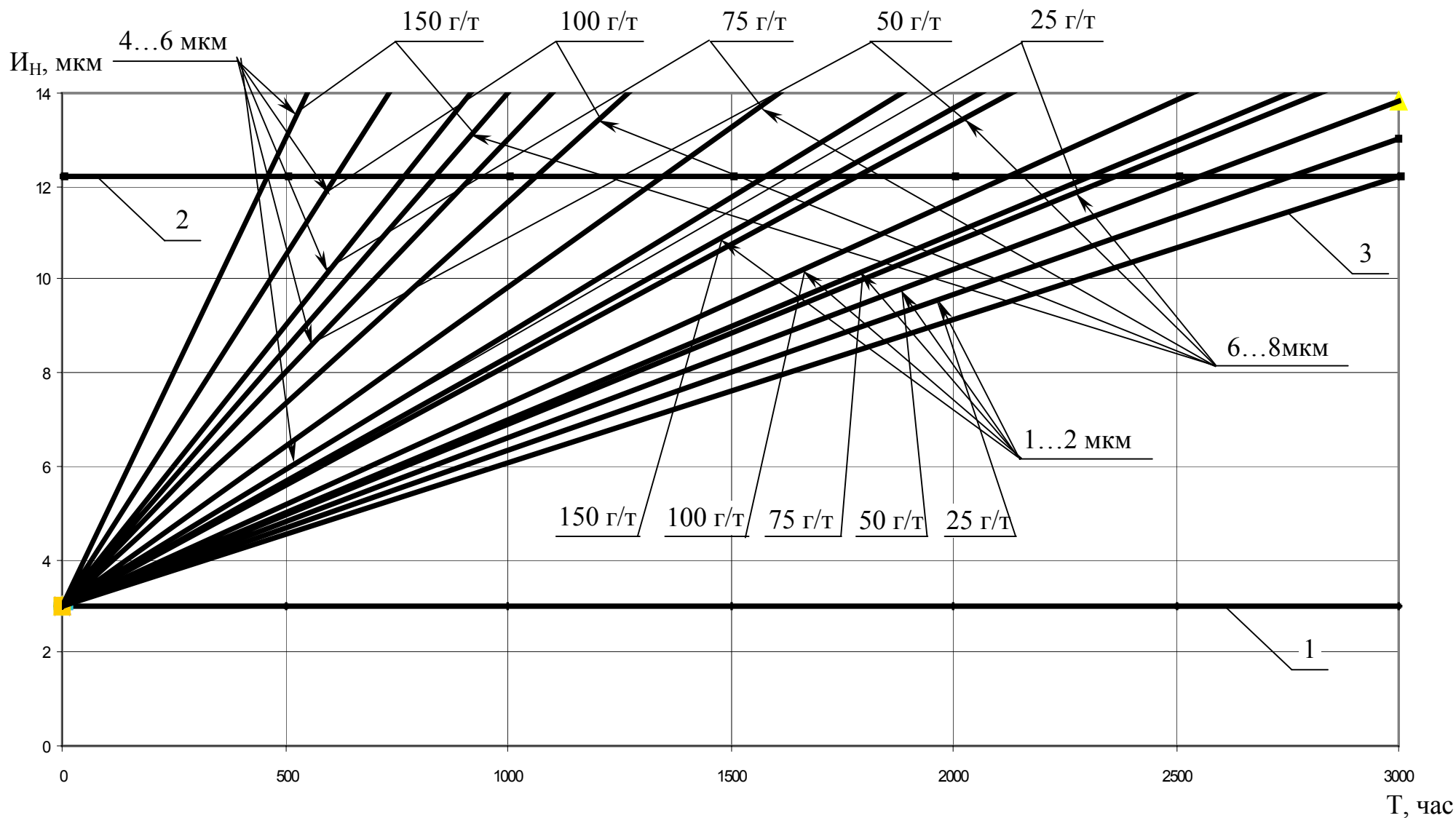


Рисунок 2.5 Динамика изменения зазора в плунжерной паре в результате изнашивания при различной массовой доле и различных размерах абразивных частиц в дизельном топливе:

1 и 2 – границы начального и предельного зазора; 3 –  $I_H = f(T)$  при отстоянном и очищенном мембранным фильтром дизельным топливом.

жет быть сделан путем сравнения расчетных зависимостей  $I = f(T)$  с экспериментальными. Методика ускоренных износных испытаний и результаты экспериментальных исследований представлены в разделах 3 и 4.

На рис. 2.3 приведены графики расчетных и экспериментальных зависимостей  $I = f(T)$  при различной чистоте дизельного топлива. Расхождение расчетных экспериментальных зависимостей минимально, если указанные параметры имеют следующие значения:

$$k = 0,1; \nu = 2,5; \sigma = 20.$$

Расчетные зависимости  $I = f(T)$  получены для дизельного топлива, содержащего механические примеси с дисперсным составом, приведенным на рис. 2.6 (кривая 1). Усредненные значения дисперсного состава механических примесей в топливе в состоянии поставки, заправленном в баки тракторов, находящихся в эксплуатации, приведены в табл. 2.2. Приведенные в табл. 2.2 данные получены путём анализа проб топлива, взятого из баков 26 тракторов, работающих в хозяйстве Каховского района Херсонской области.

Экспериментальные зависимости  $I = f(T)$  получены в результате ускоренных износных испытаний модельных трущихся пар на машине трения и перерасчета при помощи масштабных коэффициентов на результаты изнашивания натуральных образцов.

Таблица 2.2

Дисперсный состав механических примесей в дизельном топливе, заправленном в баки сельскохозяйственных тракторов

Количество частиц, тыс. шт. в 1 мл. различных размерных групп, мкм						
0...2	2...5	5...10	10...20	20...30	30...40	40...50
1500	1000	750	650	400	250	150
50...75	75...100	100...120	120...140	140...160	160...180	180...200
86	26	9,5	4,5	2,0	0,54	0,11

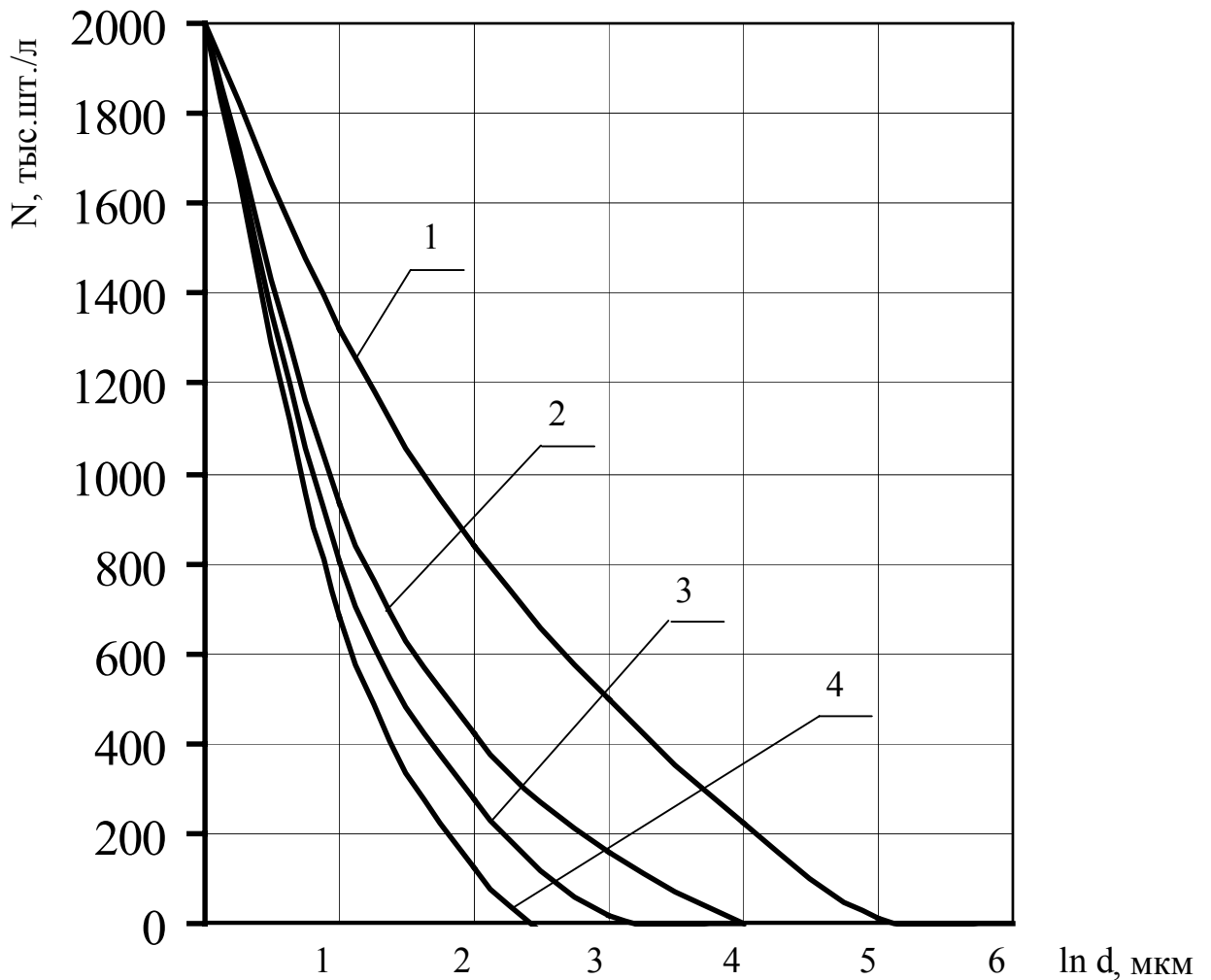


Рисунок 2.7 Дисперсный состав загрязнений исходного топлива в состоянии поставки (1) и топлива, прошедшего через электрофильтры: 2 – ЭФ – 30; 3 – ЭФ – 20; 4 – ЭФ – 10.

Методика прогнозирования ресурса натуральных прецизионных соединений топливоподающей аппаратуры с применением элементов физического моделирования и результатов ускоренных испытаний модельных трущихся пар состоит из следующих этапов:

- определяют предельный износ в натурной плунжерной паре, при достижении которого топливный насос снимается с эксплуатации. Предельный износ является статистической величиной и зависит от множества факторов. Однако такие обобщения проведены и представлены в технических условиях или публикациях. Например, в работе [152] представлена сводная таблица по предельным и

оптимальным  $S_{\text{опт}}$  зазорам для 23 типов двигателей. Из таблицы следует, что предельный зазор для ТНВД двигателя СМД-62 составляет 12,19 мкм;

- проводят лабораторные ускоренные испытания физической модели плунжерной пары и определяют скорость линейного изнашивания  $I_M$ , мкм/ч;

- определяют время работы (испытания)  $t_M$  физической модели, при котором будет достигнута величина предельного износа  $S_{\text{пр}}$ .

$$t_M = \frac{S_{\text{пр}}}{I_M};$$

- определяют время  $t_H$  по формуле (3.6), при котором суммарный износ у натурной плунжерной пары будет равен суммарному износу у модели, т.е.  $S_{\text{прн}} = S_{\text{прм}}$ .

Полученная величина  $t_H$  с некоторыми допущениями линейности  $[I_M] = f(t)$  является прогнозируемой величиной ресурса.

Анализ зависимостей, приведенных на рис. 2.3, и расчеты ресурса плунжерной пары на примере ТНВД двигателя СМД-62 свидетельствует о том, что при работе трактора Т-150К на дизельном топливе в состоянии поставки без какой либо очистки ресурс плунжерных пар составляет 540 моточасов, при работе трактора на предварительно очищенном топливе электрофильтром с тонкостью фильтрации 10 мкм и серийным фильтром в топливной системе с тонкостью фильтрации 20 мкм ресурс составляет 2370 моточасов. Сравнение кривых 2 и 3 позволяет утверждать, что наличие в топливной системе фильтра тонкой очистки позволяет увеличить ресурс плунжерных пар с 540 моточасов до 960 моточасов, а сравнение кривых 3 и 5 позволяет утверждать о целесообразности использования стационарных фильтрующих устройств для подготовки топлива перед заправкой его в баки мобильной техники. Так, увеличение ресурса с 960 моточасов до 2370 в данном случае происходит исключительно за счет очистки топлива электрофильтром с тонкостью фильтрации до 10 мкм перед его заправкой.

### 2.3 Структурный анализ надёжности топливной системы дизельного двигателя

МТА в целом и энергетическое средство в частности можно представить в виде некоторой системы состоящей из ряда подсистем. В качестве отдельно взятой подсистемы уместно рассмотреть топливную систему, надёжность которой наиболее чувствительна к загрязнению дизельного топлива.

Топливная система двигателя любого энергетического средства в том числе и сельскохозяйственного трактора состоит из следующих подсистем: фильтр грубой очистки; блок фильтров тонкой очистки; форсунки; топливный насос высокого давления.

Надёжность работы топливной системы зависит от работоспособности перечисленных подсистем, которые включены в работу последовательно. Следовательно, отказ одной из подсистем, приведет к отказу всей системы.

Таким образом, переход топливной системы из исправного состояния в неисправное можно рассматривать как случайный процесс и с точки зрения математического описания его можно представить, как марковский. Схематически такой процесс можно представить графом состояний, рис. 2.8.

Аналогичный подход в оценке надёжности подсистем зерноуборочной жатки использован в работе [58].

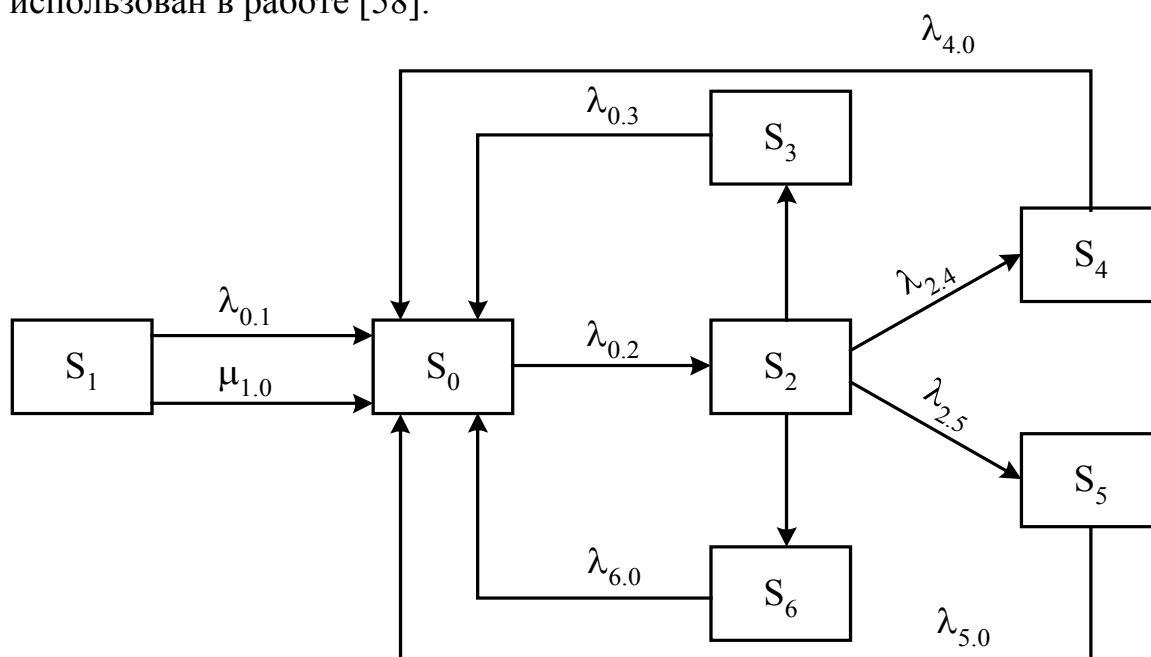


Рисунок 2.8. Граф состояний топливной системы двигателя

При таком подходе в оценке надежности предполагается, что потоки событий связанные с переходами элементов топливной системы в различные состояния являются простыми пуассоновскими, обладающие интенсивностями  $\lambda_{i,j}$  и  $\mu_{1,0}$  [7, 42] и описываются следующим образом:

$S_0, S_1$  - топливная система (ТС) исправная и работает и исправная но не работает (простой);

$S_2$  - ТС неисправная, идет диагностирование отказа;

$S_3$  - ТС неисправная из-за отказа фильтра грубой очистки и устранения отказа;

$S_4$  - ТС неисправная из-за отказа блока фильтров тонкой очистки и устранения отказа;

$S_5$  - ТС неисправная из-за отказа форсунок и устранения отказа;

$S_6$  - ТС неисправная из-за отказа ТНВД и устранения отказа.

Математическое описание этих состояний можно осуществить с помощью вероятностей состояния, которые в общем случае являются функциями времени и могут быть определены из системы дифференциальных уравнений Колмогорова [31].

Определив вероятности состояний,  $P_0(t), P(t), \dots P_6(t)$  топливной системы и ее элементов можно вычислить комплексный показатель ее надежности, который при прочих равных условиях характеризует коэффициент готовности  $K_r$  в целом машинно-тракторного агрегата.

Для аналогичного графа состояний который описан в работе [58] коэффициент готовности  $K_r$  топливной системы можно определить по формуле:

$$K_e = \frac{\lambda_{2.3} + \lambda_{2.4} + \lambda_{2.5} + \lambda_{2.6}}{\lambda_{2.3} + \lambda_{2.4} + \lambda_{2.5} + \lambda_{2.6} + \left( \frac{\lambda_{02}}{I + \frac{\lambda_{01}}{\mu_{1.0}}} \right) \cdot \left( I + \frac{\lambda_{2.3}}{\lambda_{3.0}} + \frac{\lambda_{2.4}}{\lambda_{4.0}} + \frac{\lambda_{2.5}}{\lambda_{5.0}} + \frac{\lambda_{2.6}}{\lambda_{6.0}} \right)}, (2.27)$$

где  $\lambda_{ij}$  и  $\mu_{1,0}$  – интенсивность событий перехода топливной системы и ее элементов в различные состояния.

Для расчета интенсивностей переходов можно воспользоваться соотношениями приведенными в [129]

$$\lambda_{ij} = (\bar{T}_{ij})^{-1}, \mu_{10} = (\bar{T}_{10})^{-1},$$

где  $\bar{T}_{ij}$  - среднее время проведения  $i$ -й операции для  $j$ -й подсистемы.

Из анализа формулы (2.27) следует, что уменьшение времени расходуемого на проведение различных операций связанных с восстановлением работоспособности топливной системы есть путь для повышения ее коэффициента готовности. Очевидным является то, что одним из путей повышения  $K_T$  может быть увеличение сроков замены фильтров и повышения ресурса прецизионных соединений ТНВД и форсунок, за счет обеспечения требуемой чистоты дизельного топлива используя резервные очистители дизельного топлива при заправке его в баки мобильной сельскохозяйственной техники.

Таким образом, используя полученную зависимость (2.27) можно достоверно оценить степень влияния загрязнённости дизельного топлива на надёжность топливной системы дизельного двигателя. Полученные результаты и их обсуждение приведены в разделе 5.

## 2.4 Выводы по второму разделу

С помощью математического моделирования процесса изнашивания прецизионных соединений топливоподающей аппаратуры, обоснованы технические требования к чистоте дизельного топлива, используемого в мобильной сельскохозяйственной технике, а так же разработана методика прогнозирования ресурса плунжерных пар ТНВД. Так, например, допустимая массовая доля механических частиц в дизельном топливе размерами 4...6 мкм не должна превышать 25 г/т, для размеров 8...10 мкм – 62 г/т, а для размеров более 15 мкм – 100 г/т. Расчёт ресурса плунжерных пар с помощью предложенной методики на примере ТНВД двигателя СМД – 62 позволил установить, что при использовании дизельного топлива в состоянии поставки плунжерные пары до капитального ремонта обеспечивают нормальную работоспособность в течении 960 моточасов. При условии предварительной очистки дизельного топлива фильтром с тонкостью очистки 10 мкм и ко-

эффицентом фильтрации близким к единице, ресурс плунжерных пар составляет 2370 моточасов. Это позволило рекомендовать предусматривать в регламенте технического обслуживания мобильной сельскохозяйственной техники операцию предварительной подготовки дизельного топлива перед заправкой в топливные баки, обеспечивающую технические требования, предъявляемые к параметрам его чистоты.

## РАЗДЕЛ 3

### ПРОГРАММА И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ.

#### 3.1 Программа экспериментальных исследований.

Программа экспериментальных исследований предусматривает выполнение следующих работ:

- Изучение влияния чистоты дизельного топлива на функциональную стабильность мобильных сельскохозяйственных агрегатов.
- Статистическая оценка уровня загрязнённости дизельного топлива, используемого для сельскохозяйственной мобильной техники.
- Экспериментальные исследования проверки достоверности математических моделей процессов изнашивания прецизионных соединений топливоподающей аппаратуры и очистки дизельного топлива силами электрического поля, в котором имеется наполнитель в виде сферы из диэлектрика с высокой диэлектрической проницаемостью.
- Разработка конструкции электроочистителя предварительной очистки дизельного топлива, выбор материала диэлектрика и способа его регенерации.
- Оптимизация технологических режимов очистки дизельного топлива и конструктивных параметров разработанного электроочистителя.
- Лабораторная и эксплуатационная оценка эффективности применения электроочистителя на этапе подготовки к использованию дизельного топлива.

Реализация изложенной программы потребовала использования наряду с известными методами экспериментальных исследований и разработку оригинальных методик и лабораторного оборудования, обеспечивших с достаточной степенью точности и достоверности получить новые знания в пределах, предусмотренных темой диссертационной работы.

### **3.2 Разработка методики ускоренных износных испытаний прецизионных соединений топливо подающей аппаратуры.**

Целью данных исследований является изучение влияния загрязнённости дизельного топлива на процесс изнашивания прецизионных соединений топливоподающей аппаратуры и оценка адекватности математической модели на примере плунжерных пар ТНВД двигателя СМД – 62.

Разработка данной методики базировалась на выполненных работах, связанных с классическими методами экспериментальных исследований трения [156].

Согласно работ [116, 153] при испытаниях на износостойкость использовался системный подход к решению поставленных задач. Как отмечалось в работе [153], для решения таких задач с использованием системного подхода нужно учесть четыре основные группы параметров системы и их взаимосвязи. Этими группами являются:

- Техническая функция системы (узла трения);
- Рабочие переменные;
- Структура узла трения;
- Рабочие характеристики (износ).

Под технической функцией плунжерной пары, как трибосистемы, понимается обеспечение движения с минимальным износом и механическими потерями, сохраняя геометрию сопряжения.

Рабочими переменными являются: нагрузка и скорость скольжения; рабочие площади трения подвижного и неподвижного элементов узла трения; объемы, лежащие под рабочими площадями; материалы подвижного и неподвижного элементов (плунжера и втулки); смазывающие свойства рабочей среды (дизельное топливо).

В данных исследованиях фактор смазочной среды (дизельное топливо) является основным и варьируется. Связано это с тем, что различные типы фильтров обеспечивают различное качество очистки дизельного топлива, а, следовательно, будут и различные степени влияния на износ плунжерных пар.

В качестве объектов исследования при рассмотрении задач работы были выбраны материалы, из которых изготавливают плунжерные пары топливных насосов высокого давления. Плунжерные пары таких насосов (как втулка, так и плунжер) изготавливают из закаленных сталей ШХ15 (HRC 62-64).

При выборе экспериментальной установки и средств регистрации параметров трения модельных образцов плунжерной пары исходили из важности использования при испытаниях серийных машин трения [13-132] и типовых образцов, что позволяет сопоставлять без перерасчетов результаты, полученные различными исследователями.

Результаты испытаний, полученные на разных испытательных установках, значительно различаются, что затрудняет их анализ и сравнение. Факторами, ответственными за разброс результатов, являются коэффициент взаимного перекрытия, уровень вибрации самой испытательной установки и ряд других причин [13].

Как уже отмечалось, при проведении исследований использовалась кинематическая схема «кольцо - кольцо». Установка для испытания была собрана на базе машины трения СМТ – 1 [81] (рис. 3.1). На машину трения СМТ – 1 устанавливается дополнительный модуль, общий вид которого представлен на рис. 3.2.

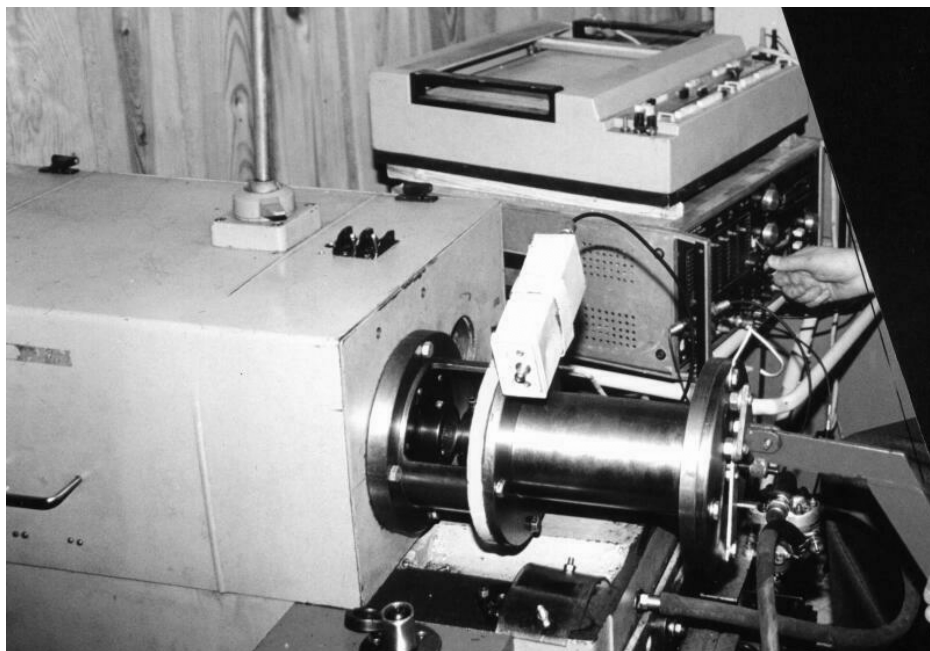


Рисунок 3.1 Внешний вид машины трения СМТ – 1 со специальным модулем для испытания пары трения «кольцо - кольцо».

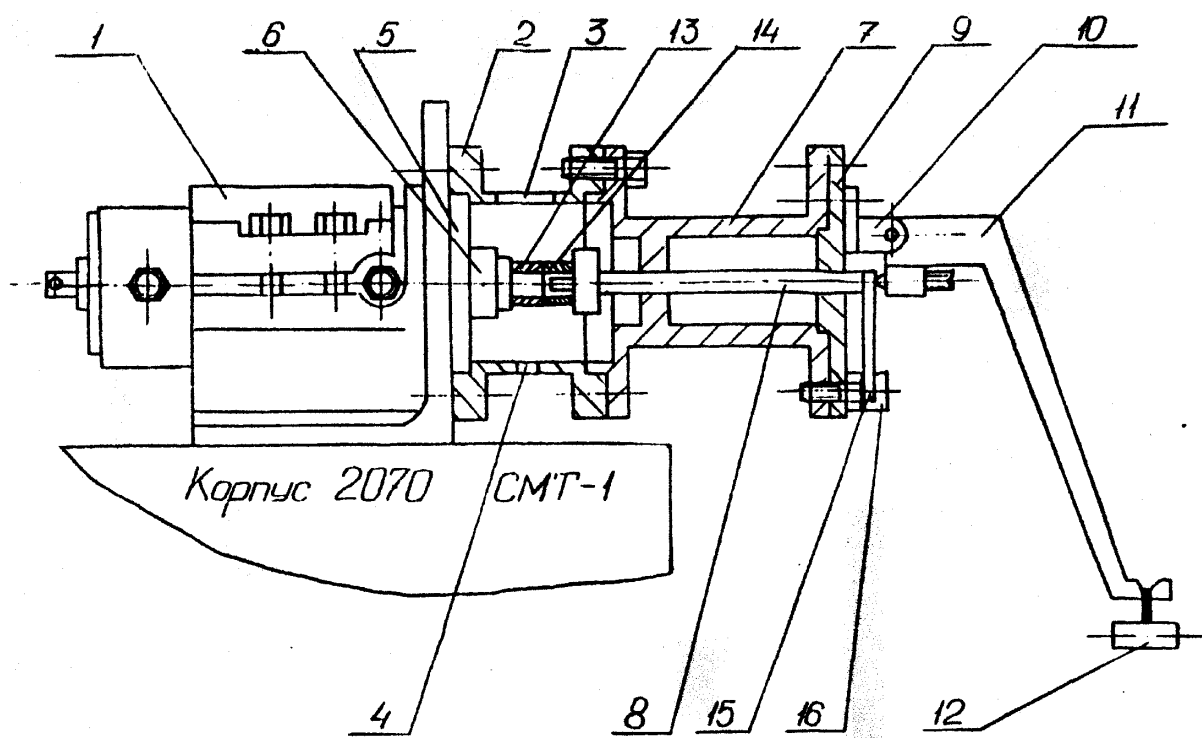


Рисунок 3.2 Общий вид модуля для испытания пары трения «кольцо - кольцо» 1 – бабка нижнего образца; 2 – испытательная камера; 3 – технологическое окно; 4 – отверстие для слива смазочной среды; 5 – центрирующий поясок шпинделя; 6 – переходник; 7 – центрирующий корпус; 8 – вал; 9 – крышка; 10 – кронштейн; 11 – рычаг; 12 – груз; 13 – подвижный образец – кольцо; 14 – неподвижный образец – кольцо; 15 – рычаг; 16 – упор.

Пара трения изготавливалась из стали ШХ15. Рабочая площадь трения неподвижного кольца составляла  $3 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$ , рабочая площадь подвижного кольца уменьшена за счёт вырезов на 80% от полной площади. Если из данных элементов составить пару трения, то коэффициент взаимного перекрытия пары составит 0,2. С помощью такой пары моделируется работа узла трения «плунжер - втулка». Методика испытаний для такой кинематической схемы стандартизирована.

Испытания проводились согласно ГОСТ 23.224 – 86 «Обеспечение износостойкости изделий» по группе А.

Группа А – сравнительные экспресс-испытания, суть которых состоит в определении соотношения интенсивностей износа определённых материалов пар трения (в данном случае сталь ШХ15) в различных смазочных средах (в дан-

ном случае очищенное и неочищенное дизельное топливо). Испытания проводятся при заранее установленных идентичных условиях (нагрузка и скорость скольжения постоянные).

Перед установкой на машину трения образцы шлифовались и притирались по общепринятой методике ГОСТ 23.210-80. Шероховатость рабочей поверхности доводилась до Ra 0,16. С целью исключения микрорезания острые кромки притуплялись до  $R = 0,5$  мм.

Для повышения воспроизводимости результатов применяли предварительную приработку образцов, которая имела цель обеспечить сопряжение поверхностей трения, характеризуемые следами трения, на площади не менее 90 % рабочей поверхности трения каждого образца.

Подача дизельного топлива в зону трения осуществлялась самотёком из расходной ёмкости с часовым расходом 2 кг/ч; после прохождения зоны трения дизельное топливо сливалось и больше в зону трения не возвращалось (чтобы исключить влияние накапливания частиц износа в испытуемом топливе).

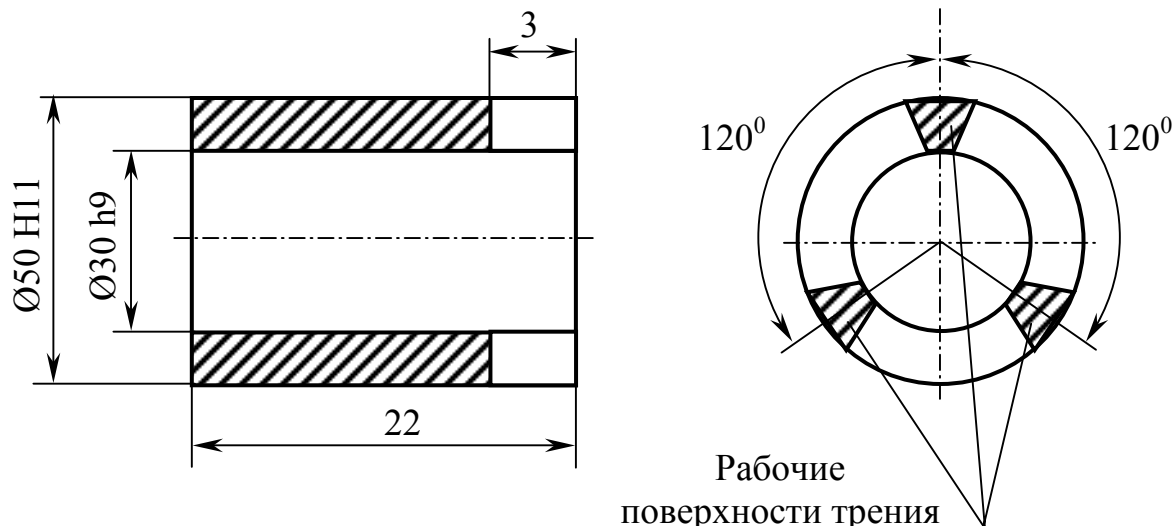


Рисунок 3.3 Эскиз подвижного кольца модельной пары трения.

В работе [153] приведён анализ существующих методов определения износа. Наиболее приемлемым для решения поставленной нами задачи является метод искусственных баз, позволяющий определять линейный износ каждого из образцов пары трения. Использование данного метода определено ГОСТ 23.301-78, а

сущность методики замера износа изложено в [132]. Отличием использованной нами методики от изложенной там является применение вместо квадратной алмазной пирамиды с углом при вершине между противоположными гранями  $136^{\circ}$  алмазного конуса с углом при вершине  $120^{\circ}$ . Если с помощью конуса выполнить отпечаток на плоской поверхности материала (рис. 3.4 а), то величина линейного износа  $\Delta b$  может быть определена по формуле

$$\Delta b = b_1 - b_2 = \frac{C_1 - C_2}{z}, \quad (3.1)$$

где  $b$  – глубина отпечатка,

$C$  – диаметр проекции отпечатка на испытуемой поверхности (индексы 1 и 2 соответствуют измерениям диаметра до и после испытания),

$z$  – коэффициент пропорциональности, зависящий от угла при вершине конуса.

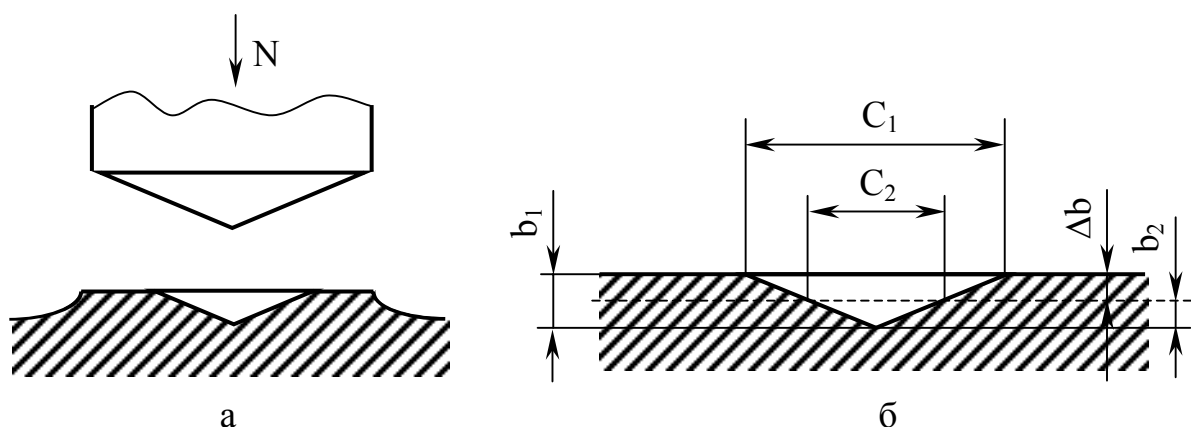


Рисунок 3.4 Схема измерения износа методом искусственных баз: а – отпечаток после вдавливания индентора; б – отпечаток перед началом испытаний и после испытаний.

Для угла  $120^{\circ}$   $z = 3,464$ . Тогда:

$$\Delta b = \frac{C_1 - C_2}{3,464}. \quad (3.2)$$

Поскольку при вдавливании конуса образуется вспучивание материала (рис. 3.4 а), что искажает замер диаметра, замер осуществлялся после удаления вспучивания наждачной бумагой с последующей приработкой.

Суммарный линейный износ обоих образцов в микрометрах определялся после испытания в течении 1, 2, 3, 4, 5 и 6 часов. Данная шкала времени составила точки по оси абсцисс на графиках износа. В каждой точке эксперимент повторялся три раза, а воспроизводимость результатов оценивалась по критерию Кохрена [71, 72] при доверительной вероятности 0,90. По оси ординат откладывалось среднее значение суммарного износа подвижного и неподвижного образцов каждой точки. По результатам экспериментов строилась кривая суммарного линейного износа обоих образцов по времени для исходного и очищенного топлива.

В соответствии с целью исследования в качестве варьируемого фактора при испытании пары трения на износ выбрана концентрация в смазочной среде абразивных частиц и распределения их по размерам. В качестве абразивной среды был выбран кварцевый песок полукруглой формы, который с помощью сит был разделён на группы по дисперсности. В результате просеивания песка через сито получены следующие размерные группы:

$$d_{cp} = 1...2 \text{ мкм}; d_{cp} = 4...6 \text{ мкм}; d_{cp} = 8...10 \text{ мкм}; d_{cp} \text{ более } 15 \text{ мкм}.$$

Измерение среднего диаметра частиц проводились на оптическом микроскопе МИМ – 8 с точностью отсчёта 1 мкм.

После классификации по дисперсности абразив добавлялся в дизельное топливо в следующих концентрациях (для каждой из размерных групп):

$$C_1 = 25 \text{ г/т}; C_2 = 50 \text{ г/т}; C_3 = 75 \text{ г/т}; C_4 = 100 \text{ г/т}; C_5 = 125 \text{ г/т}; C_6 = 150 \text{ г/т}.$$

Перед добавлением абразива в топливо оно проходило следующую подготовку. Топливо отстаивалось в течении 10 суток, затем фильтровалось через мембранный фильтр с толщиной фильтрации 0,9 мкм.

Испытания, проведенные на таком топливе (очищенное, но без добавления абразивных частиц), считаются эталонными, с которыми в дальнейшем сравниваются полученные экспериментальные данные по износу.

Для экспериментальной проверки адекватности математической модели процесса изнашивания прецизионных соединений были приведены исследования, методика которых предусматривала ряд специальных приёмов.

Один из методических приёмов заключался в том, что на основе результа-

тов ускоренных триботехнических испытаний, используя теорию подобия, был установлен временной масштаб, позволяющий сопоставлять результаты экспериментальных исследований с расчётными на любом временном отрезке, отвечающим реальным условиям эксплуатации.

Для определения ресурса плунжерных пар ТНВД по результатам лабораторных ускоренных испытаний их моделей были использованы положения теории подобия и моделирования [18]. Согласно [18] для расчёта времени натуральных испытаний в пределах ресурса  $t_H$ , когда износ плунжерной пары достигает величины износа, полученного на модели, используется следующая формула:

$$t_H = t_M \left( \frac{N_M}{N_H} \right)^{\frac{2}{3}} \left( \frac{V_M}{V_H} \right)^{\frac{2}{3}} \left( \frac{K_{\phi H}}{K_{\phi M}} \right)^{\frac{2}{3}} \left( \frac{\alpha_{ВТН}}{\alpha_{ВТМ}} \right)^{\frac{7}{3}} \left( \frac{A_{уср.н}}{A_{уср.м}} \right)^{\frac{1}{3}} \left( \frac{Q_H}{Q_M} \right)^{\frac{1}{3}}, \quad (3.3)$$

где  $t_H$  и  $t_M$  – соответственно ресурс натурной пары трения и модельной при их одинаковом износе, час;

$N_H$  и  $N_M$  – нагрузка на натурной и модельной парах трения, Н;

$V_H$  и  $V_M$  – скорость скольжения натурной и модельной пар трения, м/с;

$K_{\phi H}$  и  $K_{\phi M}$  – коэффициенты формы натурной и модельной пар трения.

$$K_{\phi} = \frac{S_H}{V_{\Pi} + \frac{V_H \cdot S_{\Pi}}{S_H}}, \quad (3.4)$$

где  $S_{\Pi}$  и  $S_H$  – площади подвижного и неподвижного колец, м<sup>2</sup>;

$V_{\Pi}$  и  $V_H$  – объёмы под площадями трения соответственно подвижного и неподвижного колец, м<sup>3</sup>;

$\alpha_{ВТН}$  и  $\alpha_{ВТМ}$  – коэффициенты затухания ультразвуковых колебаний в материалах натурной и модельной пар, которые характеризуют внутреннее трение материалов;

$A_{уср.н}$  и  $A_{уср.м}$  – критерии оценки смазывающих свойств дизельного топлива, применяемого при испытании натурной и модели, Дж/м<sup>3</sup>;

$$A_{\text{уср}} = \frac{\mu N L_{\text{тр}}}{V_{\text{изн}}}, \quad (3.5)$$

где  $N$  – нормальная нагрузка;

$L_{\text{тр}}$  – путь трения;

$\mu$  – коэффициент трения;

$V_{\text{изн}}$  – объём изношенного материала;

$Q_{\text{п}}$  и  $Q_{\text{н}}$  – расход дизельного топлива (смазочной среды) через узел трения натуры и модели соответственно.

С учётом того, что материалы, смазывающие свойства дизельного топлива (с учётом наличия в нём загрязнений) у натуры и модели одинаковые, то

$$\left( \frac{\alpha_{\text{ВТН}}}{\alpha_{\text{ВТМ}}} \right)^{\frac{7}{3}} \text{ и } \left( \frac{A_{\text{уср}_н}}{A_{\text{уср}_м}} \right)^{\frac{1}{3}} \text{ равны единице.}$$

Поэтому для определения ресурса плунжерной пары формулу (3.3) можно записать в виде:

$$t_{\text{н}} = t_{\text{м}} \cdot K, \quad (3.6)$$

$$K = t_{\text{м}} \left( \frac{N_{\text{м}}}{N_{\text{н}}} \right)^{\frac{2}{3}} \left( \frac{V_{\text{м}}}{V_{\text{н}}} \right)^{\frac{2}{3}} \left( \frac{K_{\text{фн}}}{K_{\text{фм}}} \right)^{\frac{2}{3}} \left( \frac{Q_{\text{н}}}{Q_{\text{м}}} \right)^{\frac{1}{3}}, \quad (3.7)$$

Численный расчёт коэффициента  $K$  даёт:

$$K = \left( \frac{400}{5} \right)^{\frac{2}{3}} \left( \frac{0,5}{0,24} \right)^{\frac{2}{3}} \left( \frac{70}{1,52} \right)^{\frac{2}{3}} \left( \frac{15}{2} \right)^{\frac{1}{3}} = 80,1, \quad (3.8)$$

При определении скорости объёмного изнашивания масштабный коэффициент определяется аналогично

$$I_{\text{ВН}} = \left( \frac{N_{\text{н}}}{N_{\text{м}}} \right)^{\frac{2}{3}} \left( \frac{V_{\text{н}}}{V_{\text{м}}} \right)^{\frac{2}{3}} \left( \frac{K_{\text{фм}}}{K_{\text{фн}}} \right)^{\frac{2}{3}} \left( \frac{Q_{\text{м}}}{Q_{\text{н}}} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot I_{\text{VM}} = 0,0774 \cdot I_{\text{VM}}, \quad (3.9)$$

Зависимость (3.9) можно выразить через скорость линейного изнашивания  $I$ , мкм/час. Такую величину удобно применять при ускоренных испытаниях. С

учётом того, что скорость объёмного и линейного изнашивания связаны между собой площадями контакта, можно записать

$$I_V = \frac{I \cdot S}{\tau} = I \cdot S, \quad (3.10)$$

где  $I$  – линейный износ в сопряжении, мм;

$S$  – площадь трения, мм<sup>2</sup>;

$\tau$  – время испытания, ч.

Подставив выражение (3.11) в (3.9) с учётом того, что  $S_H = 734,7$  мм<sup>2</sup>, а  $S_M = 847$  мм<sup>2</sup> получим

$$I_H = 0,0892 \cdot I_M, \quad (3.11)$$

Формулы (3.11) и (3.6) предназначены для физического моделирования при ускоренных испытаниях влияния загрязнённости дизельного топлива на изнашивание плунжерных пар. Выполнив лабораторные испытания физической модели трущейся пары с использованием в качестве смазывающей среды дизельное топливо различной степени загрязнённости, можно определить скорость изнашивания у модели  $I_M$  и пересчитать эти данные применительно к натурной плунжерной паре  $I_H$ .

### **3.3 Разработка эффективного электроочистителя дизельного топлива.**

Целью данной разработки является создание, на основе математического моделирования, устройство способное обеспечить заданную чистоту дизельного топлива предусмотренную программой и методикой исследований. Алгоритм создания электроочистителя приведен на рис. 3.5.

#### **3.3.1 Моделирование процесса очистки дизельного топлива силами электрического поля с рабочей поверхностью в виде сферы из диэлектрика**

Теория электростатических фильтров, предназначенных для очистки органических жидкостей от механических примесей и воды, призвана установить общие закономерности, которым подчиняются их количественные и качественные показатели. Большое разнообразие конструкций электрофильтров не позволяет

сделать это в общем случае, а требует конкретизации хотя бы некоторых, наиболее типичных элементов схемы фильтра или конкретизации принципа его действия. В работах [108, 109] исследована математическая модель фильтра с рабочей ячейкой из коаксиальных цилиндров, в которой частицы примеси, перемещаясь вместе с жидкостью вдоль её оси, оседают на поверхности внутреннего цилиндра.



Рисунок 3.5 Алгоритм создания электрофильтра.

Наряду с упомянутой конструкцией электрофильтра существуют и другие, теория которых не разработана. Среди них фильтры, рабочей поверхностью которых является поверхность диэлектрика, помещённого в поле коаксиальных электродов [65]. В следствии поляризации диэлектрика во внешнем поле на поверхности его появляется связанный поляризационный заряд, а сама эта поверхность начинает играть роль осаждающей. Теория электрических фильтров такого рода с наполнителем, должна учитывать искажения первоначально существовавшего аксиального электрического поля вблизи диэлектрика и динамику вязкой жидкости,

обтекающей его поверхность. В общем случае эта задача может быть решена только численными методами. Нами разработана и изложена подробно в работах [35, 37, 66] модель, позволяющая получить аналитическое решение данной задачи. А именно, рассматриваем сферу из диэлектрика, помещённую в электрическое поле заряженной бесконечно длинной нити и обтекаемую вязкой жидкостью, движущейся вдоль нити (рис. 3.6). такая модель позволяет учитывать влияние различных параметров фильтра, как-то: потенциала электрода, диэлектрической проницаемости наполнителя, скорости течения очищаемой жидкости и др. на количественные и качественные показатели фильтра – производительность и тонкость очистки. Причины этого следующие: поле внутри цилиндрической ячейки совпадает с полем, созданным внутренним цилиндром или нитью, заряженной с той же линейной плотностью заряда  $\lambda$ , что и цилиндр (внешний электрод играет роль концентратора заряда), поэтому с точки зрения электродинамики, замена цилиндрического конденсатора нитью не меняет соответствующих уравнений, т.е. выполнение закона. С точки зрения гидродинамики устранение влияния стенок цилиндров на распределение скоростей течения жидкости, обтекающей шар, упрощает уравнение. Не имея качественно картины линий тока вблизи поверхности шара, такое упрощение позволяет воспользоваться известными классическими результатами и решить задачу в аналитическом виде.

Пусть в электростатическое поле, созданное бесконечно заряженной нитью в однородной изотропной среде с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_2$ , помещена сфера радиусом  $a$  из диэлектрика с проницаемостью  $\epsilon_1$  (рис. 3.6).

Потенциал электрического поля  $U$  ищем в виде суммы

$$U = U_0 + W, \quad (3.12)$$

где  $U_0$  – потенциал поля, созданного заряженной нитью;

$W$  – возмущение, вносимое сферой.

Для нахождения силы, действующей на частицу загрязнения в неоднородном электрическом поле, учтём, что диэлектрик, помещённый в электрическое поле  $\vec{E} = -grad dU$  [133], поляризуется и приобретает дипольный момент. В

частности, дипольный момент частицы загрязнения радиусом  $r_0$  с диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon_3$  равен [43, 134].

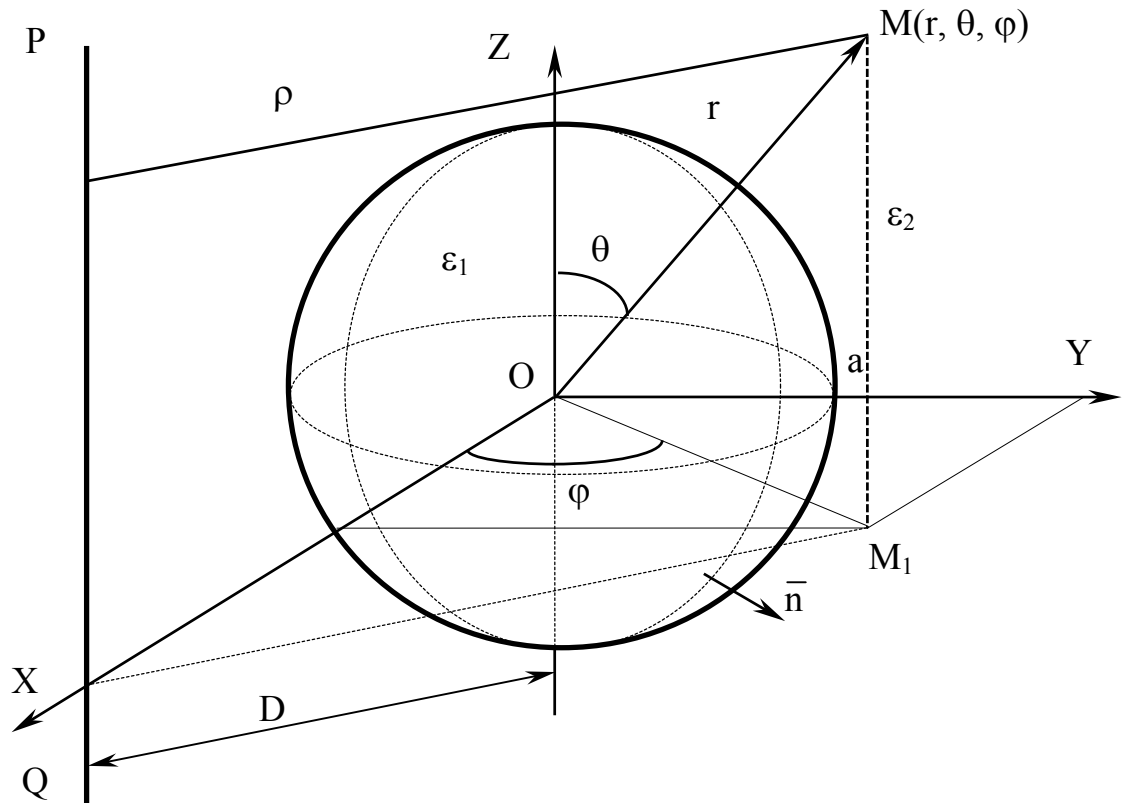


Рисунок 3.6 Схема расположения диэлектрического шара радиусом  $a$  в электрическом поле бесконечной нити PQ с линейной плотностью заряда  $\lambda$ :  $M$  – точка, в которой ищется потенциал  $u$ ;  $M_1$  – проекция  $M$  на плоскость XOY;  $\rho$  – расстояние от  $M$  до нити.

$$\vec{P} = 4\pi \cdot \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2 \cdot \gamma(\varepsilon_2, \varepsilon_3) \cdot r_0^3 \cdot \vec{E}, \quad (3.13)$$

где

$$\gamma(\varepsilon_2, \varepsilon_3) = \frac{\varepsilon_3 - \varepsilon_2}{\varepsilon_3 + 2\varepsilon_2}.$$

В неоднородном электрическом поле на частицу как целое действует сила

$$\vec{F}_{эл} = (\vec{P} \nabla) \cdot \vec{E} = 4\pi \cdot \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2 \cdot \gamma(\varepsilon_2, \varepsilon_3) \cdot r_0^3 \nabla \cdot \vec{E}^2. \quad (3.14)$$

Эта сила зависит от степени неоднородности поля, размера частицы и соотношения между диэлектрическими проницаемостями  $\varepsilon_2$  и  $\varepsilon_3$  среды и частицы загрязнения соответственно. В случае  $\varepsilon_3 > \varepsilon_2$  частица втягивается в область более

сильного поля, при  $\varepsilon_3 < \varepsilon_2$  – выталкивается.

Если частица проводящая (металлическая),  $\varepsilon_3$  следует устремить к бесконечности и положить  $\gamma(\varepsilon_2, \varepsilon_3) = 1$ .

Движение частицы загрязнения под действием электрического поля сопровождается силой вязкого трения, которая для сферической частицы загрязнения радиуса  $r_0$ , согласно Стоксу [136], равна

$$F_{mp} = 6\pi \cdot \eta_0 \cdot r_0 \cdot (V - \omega), \quad (3.15)$$

где  $\eta_0$  – коэффициент вязкости жидкости;

$V$  – скорость движения частицы относительно неподвижной жидкости.

Следует учесть силу тяжести и архимедову силу, действующие на частицу загрязнения, которые направлены вдоль вертикальной оси (оси  $Z$ ):

$$\vec{F}_{cp} = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot (\rho_3 - \rho_{жк}) \cdot g \cdot r_0^3, \quad (3.16)$$

где  $\rho_3$  и  $\rho_{жк}$  – плотность соответственно частицы загрязнения и жидкости,

$g$  – ускорение свободного падения.

Обозначив через  $\vec{\omega}$  скорость течения жидкости в неподвижной системе отсчёта, связанной со сферой, а через  $\vec{R}$  – начальное положение частицы загрязнения, запишем уравнение движения частицы загрязнения под действием указанных сил:

$$\begin{cases} m \frac{d\vec{V}}{dt} = \vec{F}_{el} - 6\pi \cdot \eta_0 \cdot r_0 (\vec{V} - \vec{\omega}) + \frac{4\pi}{3} \cdot (\rho_3 - \rho_{жк}) \cdot r_0^3 \cdot g, \\ \vec{V} = dr/dt, \quad \vec{r}(0) = \vec{R}, \quad \vec{V}(0) = \vec{\omega}; \end{cases} \quad (3.17)$$

компоненты скорости  $\vec{\omega}$  течения вязкой жидкости, обтекающей сферу, в сферической системе координат имеют вид [136]

$$\begin{cases} \omega^r = -\frac{A_0}{r^2} + \frac{2A_1 \cos \theta}{r^2} + v \cos \theta + e^{-kr(1-\cos \theta)} \left( -\frac{C_0}{2kr^2} - \frac{C_0}{2r} \cdot (1 + \cos \theta) + \frac{C_1 \cos \theta}{kr^2} \right), \\ \omega^\theta = \frac{A_1 \sin \theta}{r^3} - v \sin \theta + e^{-kr(1-\cos \theta)} \left( \frac{C_0 \sin \theta}{2r} + \frac{C_0 \sin \theta}{2r^3} \right), \\ \omega^\varphi = 0. \end{cases} \quad (3.18)$$

где  $\bar{V}$  – скорость движения частицы в неподвижной системе отсчёта;

$$k = \frac{\nu}{2\nu_0}; \nu_0 = \frac{\eta_0}{\rho_{ж}} - \text{кинематическая вязкость жидкости.}$$

Входящие в (3.18) коэффициенты равны:

$$A_0 = -\frac{3\nu a}{4k} \left(1 + \frac{3ka}{4}\right); A_1 = -\frac{1}{2}\nu a^3; C_0 = \frac{3\nu a}{2} \left(1 + \frac{3ka}{4}\right); C_1 = \frac{3}{2}\nu a^3 k;$$

Полученные компонентно записанные уравнения (3.17) совместно с (3.18) позволяют с помощью моделирования найти траектории частиц загрязнений в дизельном топливе и определить коэффициент фильтрации анализируемой модели электростатического фильтра. Это, в свою очередь, позволит анализировать конструктивные параметры и технологические режимы работы электростатического фильтра, а следовательно, получить конкретное конструктивное решение фильтра.

На рис. 3.7 проиллюстрированы принцип работы электростатического фильтра «с наполнителем». Сфера из диэлектрика, радиусом  $a$ , находящаяся во внешнем электрическом поле, является рабочим элементом фильтра. Частицы примеси движущиеся вместе с жидкостью, обтекающей сферу, проходя показанное в нижней части рисунка сечение, перпендикулярное направлению движения жидкости. Те из частиц, центры которых лежат в заштрихованном круге площадью  $S_0$  (радиусом  $x_0$ ), оседают на поверхности сферы, остальные – проходят мимо. Поскольку частицы примеси равномерно распределены по объёму жидкости, коэффициентом эффективности осаждения фильтра с одной сферой можно считать отношение площади  $S_0$  к площади большого сечения сферы, т.е.

$$K_{эф} = \frac{S_0}{\pi \cdot a^2} = \left(\frac{x_0}{a}\right)^2. \quad (3.19)$$

Конструкции фильтров «с наполнителем» должны быть рассчитаны на использование нескольких (или большого числа) таких рабочих элементов. Их совокупный коэффициент эффективности осаждения  $K_{эф}$  определяется суммарной площадью поперечного сечения потока очищаемой жидкости, с которой происхо-

дит захват частиц примеси, отнесённой к поперечному сечению  $S_{раб}$  проходного канала рабочей части фильтра:

$$K_{эф} = \frac{NS_{эф}}{S_{раб}}, \quad (3.20)$$

где  $N$  – число сфер в рабочей зоне фильтра;

$S_{эф}$  – площадь захвата частиц примеси отдельной сферой.

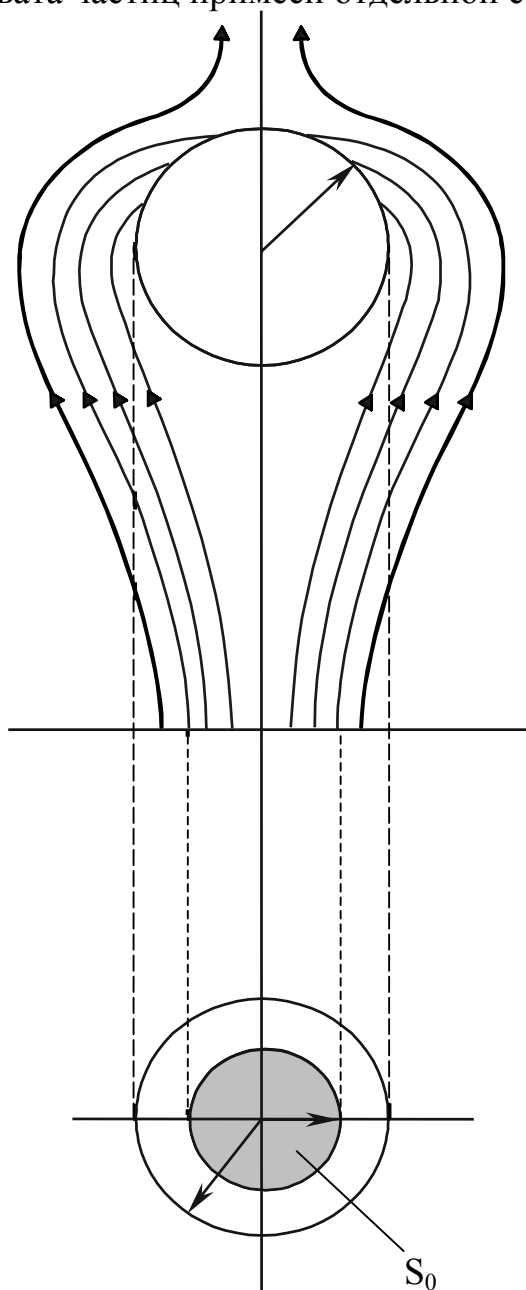


Рисунок 3.7 Принципиальная схема осаждения механических примесей электрическим фильтром с единичной сферой.

Если  $S_{эф}^{min}$  - площадь захвата отдельной сферой частиц примеси заданного размера  $d_{min}$ , то из (2.46) можно найти такое число сфер в рабочей зоне, которое обеспечит полную очистку жидкости от частиц примесей с размерами, превышающими заданный, т.е.  $d > d_{min}$ . Для этого в (2.46) следует положить  $K_{эф}$  равным единице, тогда

$$N = \frac{S_{раб}}{S_{эф}^{min}}. \quad (3.21)$$

Таким образом, для рассматриваемого фильтра с «наполнителем» важнейшей характеристикой является эффективная площадь захвата  $S_{эф}$  отдельной сферы, которая, как видно из рис. 2.8, определяется радиусом  $x_0$  заштрихованного круга:

$$S_{эф} = \pi \cdot x_0^2. \quad (3.22)$$

Методика расчёта эффективной площади захвата частиц загрязнений единичной сферой, а следовательно, и методика расчёта коэффициента осаждения сводится к нахождению  $x_0$ .

Чтобы найти  $x_0$ , нужно для каждого набора параметров провести расчёт нескольких траекторий частиц примеси определённого размера, задавая на большом расстоянии от сферы начальную дистанцию частицы от оси, вдоль которой она движется и которая проходит через центр сферы, а затем выбрать граничное значение  $x_0$ , отделяющее друг от друга два указанных выше вида траекторий.

### **3.3.2. Оптимизация конструктивных параметров и технологических режимов электрического фильтра с диэлектрическим наполнителем**

Оптимизация конструктивных параметров электростатического фильтра сводится к обеспечению максимизации критерия его функционирования т.е.  $K_{эф} \rightarrow \max$ , и  $S_{эф} \rightarrow \max$ . Расчёт указанных характеристик фильтра осуществлялся по разработанной программе для ПК (Приложение Б). Численные расчёты приведены для дизельного топлива с примесями кварца и воды. Физические характери-

стики этих веществ приведены в [145].

Для моделирования использована коаксиальная система электродов, между которыми на расстоянии  $D$  от оси располагалась сфера из диэлектрика (рис. 3.8). При этом радиус внутреннего электрода был выбран равным  $R_1 = 1$  мм, внешнего  $R_2 = 20$  мм, а  $D = (R_2 - R_1)/2$ . Эти параметры при всех расчётах оставались неизменными.

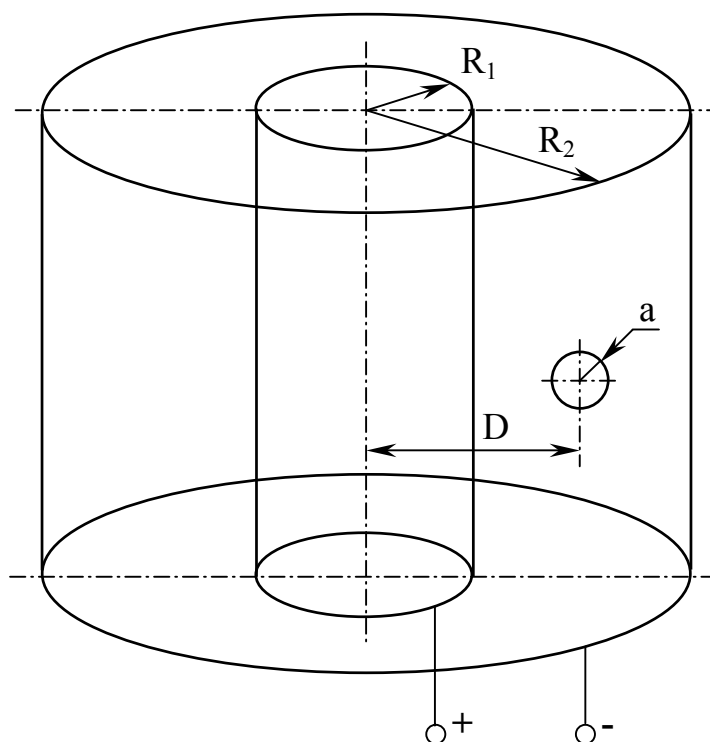


Рисунок 3.8 Схема устройства ячейки фильтра «с наполнителем».

Напряжение между электродами  $U$  принималось равным 5 и 10 кВ.

Радиус сферы  $a$  варьировался в пределах от 0,5 до 4 мм. Диэлектрическая проницаемость сферы  $\epsilon_1$  изменялась в пределах от 4 до 32 единиц. В этом диапазоне заключены диэлектрические проницаемости многих веществ [122], которые могут быть использованы в качестве рабочего элемента (сферы) рассматриваемого здесь фильтра. Расчёты производились при четырёх значениях  $\epsilon_1$ , равных 4, 8, 16 и 32, чтобы определить, во сколько раз изменяется  $S_{эф}$  при удвоении диэлектрической проницаемости. В качестве примеси выбраны частицы кварца размером до 200 мкм.

Скорость течения жидкости  $V$ , обтекающей сферу, принималась на боль-

шом расстоянии от сферы равной 3, 5 и 8 мм/с.

Проектирование электростатических фильтров, рабочими элементами которых служит поверхность диэлектрика, поляризованного в электрическом поле, возможно только в том случае, когда удаётся найти закономерности, которым подчиняются их количественные и качественные показатели – производительность и тонкость очистки. Характер этих зависимостей можно выяснить только с помощью моделирования. Результаты имитационного моделирования фильтра и их анализ приведены в приложениях.

Анализ полученных результатов позволил установить зависимости площади захвата  $S_{эф}$  от следующих параметров:  $a$  - размер сферы;  $\epsilon_1$  - диэлектрическая проницаемость сферы;  $U$  - напряжение на электродах;  $V$  - скорость течения жидкости; вида примеси (вода, кварц);  $d$  - размер частиц примеси.

Зависимость  $S_{эфф}$  от размера рабочей сферы  $a$  и её диэлектрической проницаемости  $\epsilon_1$  для капелек воды и частиц кварца в дизельном топливе при скорости течения жидкости  $V = 3$  мм/с приведена на рис. 3.9 и рис. 3.10 соответственно. Размер частиц примеси  $d$  выбран равным 10 мкм. Характер этих зависимостей для других размеров частиц примеси и других значений параметров аналогичен.

Как видно из рис. 3.9 и рис. 3.10, площадь захвата частиц примеси рабочей поверхностью сферы фильтра возрастает с увеличением её размера, причём тем быстрее, чем выше диэлектрическая проницаемость сферы.

Как следует из результатов расчёта, эффективность фильтра с увеличением размера рабочей сферы возрастает при достаточно больших значениях её диэлектрической проницаемости – для воды при  $\epsilon_1 > 4$ , для кварца – при  $\epsilon_1 > 8$ .

Темп этого роста с увеличением скорости течения жидкости уменьшается, а для  $\epsilon_1 > 16$  – для воды и  $\epsilon_1 > 32$  – для кварца – практически остаётся постоянным.

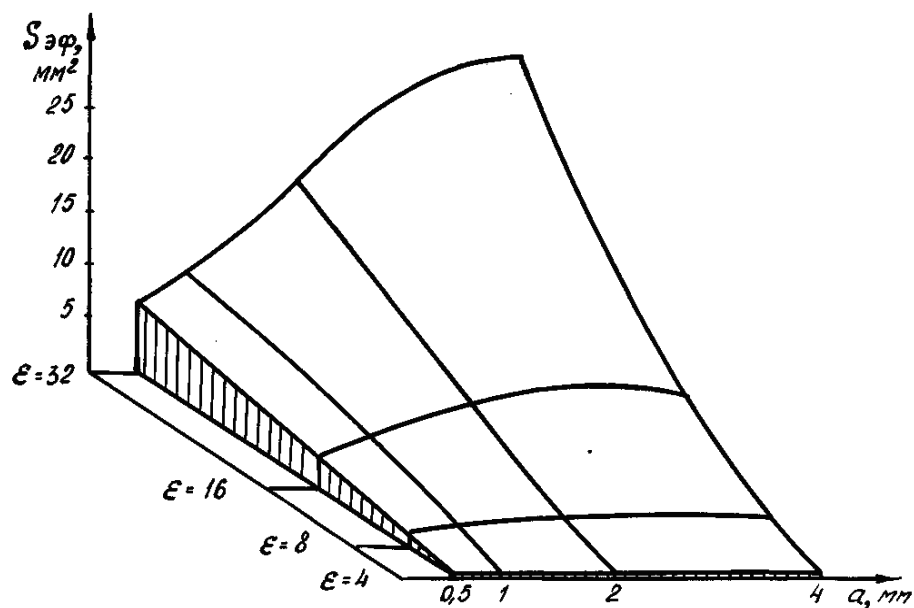


Рисунок 3.9 Зависимость  $S_{эф}$  от размера  $a$  и диэлектрической проницаемости сферы  $\epsilon_1$  для водяных капель размером  $d = 10$  мкм в рабочем напряжении  $U = 5$  кВ и скорости жидкости  $V = 3$  мм/с.

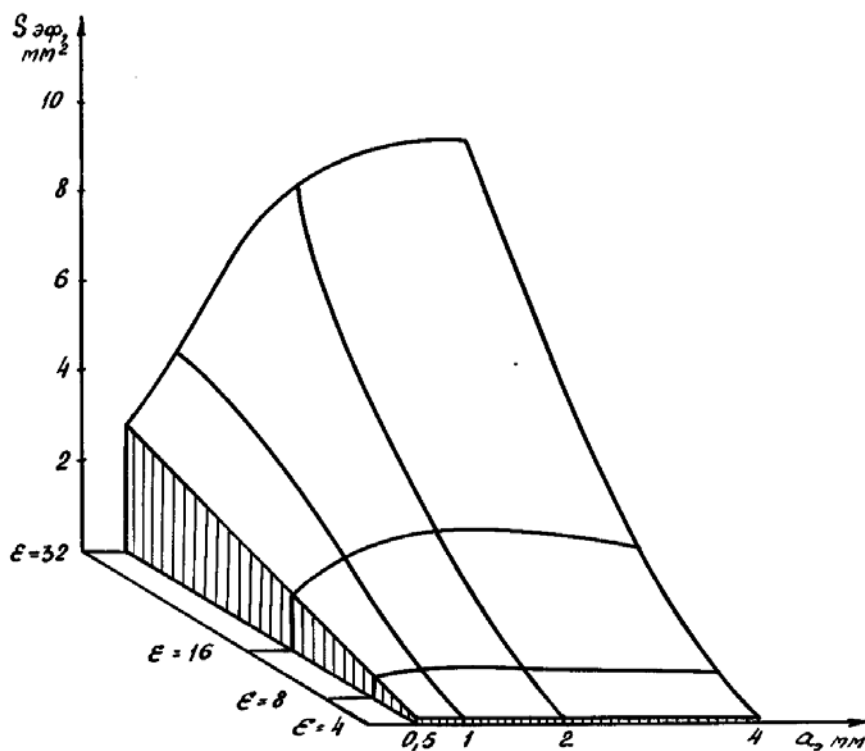


Рисунок 3.10 Зависимость  $S_{эф}$  от размера  $a$  и диэлектрической проницаемости сферы  $\epsilon_1$  для частиц кварца диаметром  $d = 10$  мкм, рабочего напряжения  $U = 5$  кВ и скорости жидкости  $V = 3$  мм/с.

Анализ зависимости  $S_{эф}$  от диэлектрической проницаемости рабочей сфе-

ры  $\varepsilon_1$  и скорости течения жидкости для воды и кварца в качестве примесей в дизельном топливе свидетельствует, что площадь захвата частиц примеси увеличивается с ростом  $\varepsilon_1$ .

Результаты расчётов свидетельствуют о том, что скорость возрастания  $S_{\text{эф}}$  с увеличением диэлектрической проницаемости сферы практически не зависит от скорости течения жидкости. Увеличение  $S_{\text{эф}}$ , при изменении  $\varepsilon_1$  от 4 до 32 единиц, т.е. в 8 раз, для воды составляет в среднем 65 раз, для кварца – 143 раза, т.е. почти в двое больше, чем для воды.

В рассматриваемой модели фильтра примесь кварца отличается от примеси воды в топливе главным образом своей диэлектрической проницаемостью ( $\varepsilon_{\text{кв}} = 3,75$ ,  $\varepsilon_{\text{в}} = 81$ ). Различие их плотностей слабо влияет на эффективность работы фильтра. Отсюда можно заключить, что увеличение диэлектрической проницаемости рабочей сферы с целью повышения её эффективности, т.е. подбор соответствующих материалов для изготовления рабочих элементов фильтра более существенно для примесей с низкими диэлектрическими проницаемостями. Сама же величина  $S_{\text{эф}}$  для воды при всех исследованных значениях параметров в два раза превышает таковую для кварца, поэтому фильтры «с наполнителем» эффективнее по отношению к примесям с большими значениями диэлектрической проницаемости. Это в полной мере относится к металлическим частицам примеси, поскольку металлы формально можно рассматривать как диэлектрики с очень большой диэлектрической проницаемостью.

Анализ зависимости  $S_{\text{эф}}$  от скорости течения очищаемой жидкости при двух значениях приложенного напряжения  $U = 5$  и  $10$  кВ свидетельствует, что с увеличением скорости течения жидкости площадь сечения захвата частиц примеси уменьшается, а с увеличением напряжённости электрического поля  $U$  увеличивается.

Количественная оценка влияния скорости течения жидкости свидетельствует о том, что при увеличении скорости течения жидкости в 1,67 раза (от  $V_1 = 3$  мм/с до  $V_2 = 5$  мм/с)  $S_{\text{эф}}$  уменьшается для воды в среднем в 1,3 раза, для кварца – в 1,4 раза при всех исследованных значениях  $\varepsilon_1$ . С увеличением  $V$  от 5 до 8 мм/с

(1,6 раза) это уменьшение составляет примерно 1,3 раза для воды и кварца.

Подобного рода отношения  $S_i / S_{i+1}$  для других размеров частиц примеси при обоих значениях напряжения  $U$  – 5 и 10 кВ и разных диэлектрических проницаемостях рабочей сферы колеблются в пределах от 1,2 до 1,4. Эту закономерность с учётом погрешности вычисления  $S_{эф}$  можно выразить приближённым соотношением вида:

$$\frac{S_{эф}^{(1)}}{S_{эф}^{(2)}} = \sqrt{\frac{V_2}{V_1}}. \quad (3.23)$$

Увеличение  $S_{эф}$  с уменьшением скорости течения очищаемой жидкости может скомпенсировать уменьшение производительности фильтра, связанное с её пониженным расходом. При этом суммарный коэффициент эффективности осаждения фильтра может оказаться даже выше, чем при больших скоростях течения.

Анализ зависимости  $S_{эф}$  от напряжения  $U$  на электродах фильтра для воды и кварца соответственно свидетельствует о том, что с увеличением  $U$  площадь захвата частиц примеси увеличивается, причём наблюдается линейная зависимость её величины от  $U$ :

$$S_{эф}^i = b_i \cdot U, \quad (3.24)$$

где  $b_i = \text{tg } \theta_i$ .

С увеличением размера  $a$  сферы угол между прямой, выражающей зависимость  $S_{эф}$  от  $U$ , и осью абсцисс возрастает. Тангенс этого угла равен скорости изменения  $S_{эф}$  с ростом  $U$ . Расчёты показали, что увеличение приложенного напряжения приводит к возрастанию площади захвата сферы  $S_{эф}$ , причём скорость её роста для капелек воды примерно вдвое больше, чем для частиц кварца. Кроме того, эта скорость линейно зависит от диэлектрической проницаемости сферы  $\epsilon_1$ :

$$\left( \frac{\Delta S_{эф}}{\Delta U} \right)_i = c_i \cdot \epsilon_1, \quad (3.25)$$

где  $c_i$  - коэффициент пропорциональности, характеризует данный вид примеси.

Анализ зависимостей площади захвата  $S_{эф}$  частиц примеси сферой из ди-

электрика от размера  $d$  этих частиц, позволяет сделать выводы о том, что  $S_{эф}$  возрастает с увеличением  $d$ , причём тем быстрее, чем больше размер рабочей сферы. Зависимость  $S_{эф}$  от  $d$  линейна для малых размеров частиц примеси: для воды – вплоть до 15 мкм, для кварца – примерно до 10 мкм. Частицы таких размеров, как показано, например, в [123], наиболее часто встречаются в дизельном топливе.

Линейность функции  $S_{эф} = \frac{\Delta S_{эф}}{\Delta d} \cdot d$  позволяет найти коэффициент фильтрации

электрофильтра для частиц любых малых размеров, которые оказываются значимы в каждом конкретном случае.

Для большей наглядности приведенные результаты математического моделирования целесообразно представить в виде двухфакторных зависимостей коэффициента эффективности осаждения  $K_{эф}$  от  $U$ ,  $a$ ,  $\epsilon_1$ ,  $\omega$ ,  $r$  и  $d$  (рис. 3.11 а, б, в, г, д и е). На рис 3.11 а представлена зависимость  $K_{эф}=f(U)$  для частиц примеси размером 25 мкм, 50 мкм, 100 мкм и 200 мкм при  $\epsilon_1=4$ ,  $\omega=1$  мм/с и  $a=2$  мм. Из этого рисунка следует, что с ростом напряжения  $U$  коэффициент эффективности осаждения увеличивается, причём очень резко для крупных размеров частиц примесей и линейно для частиц до 50 мкм.

Представленные на рис. 3.11 б зависимости  $K_{эф}$  от радиуса сферы  $a$  иллюстрируют быстрое уменьшение коэффициента эффективности осаждения с увеличением радиуса сферы диэлектрика. Это можно объяснить тем, что с увеличением размера сферы диэлектрика уменьшается живое сечение ячейки фильтра, что естественно способствует увеличению скорости потока чисткости.

Зависимости  $K_{эф}=f(\epsilon_1)$  (рис. 3.11 в) позволили установить весьма важную закономерность коэффициента эффективности осаждения от диэлектрических свойств материала «наполнителя», которая имеет прямолинейный характер. Причём угловой коэффициент этих зависимостей, отнесённый к размеру частиц примеси  $d$  для всех размерных групп примерно одинаков и составляет в среднем  $2,6 \cdot 10^{-3}$  1/мкм.

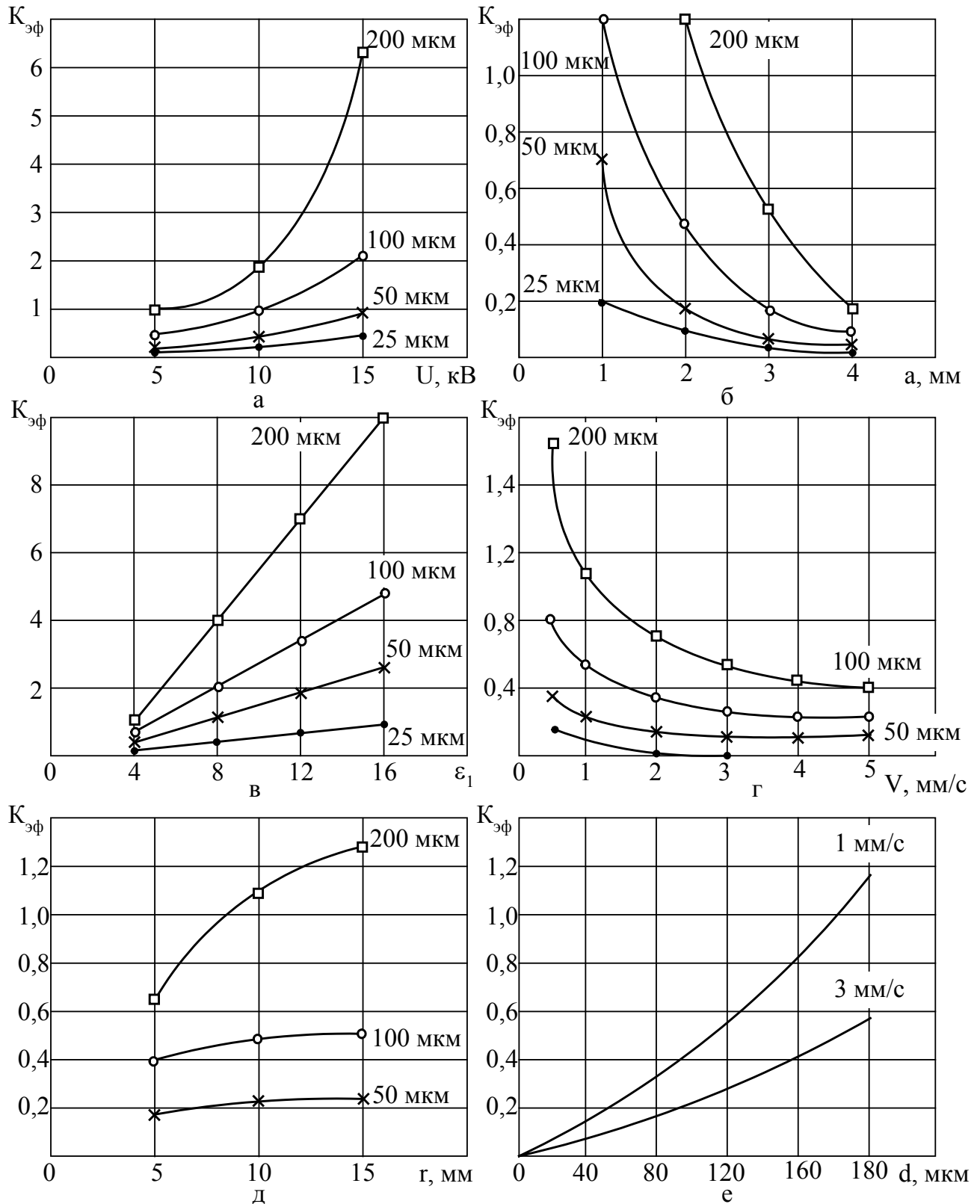


Рисунок 3.11 Зависимости коэффициента осаждения  $K_{эф}$  от конструктивных параметров и технологических режимов электрофильтра: а –  $K=f(u)$  при ( $a=2$ мм,  $\epsilon=4$ ,  $V=1$ мм/с); б –  $K=f(a)$  при ( $u=5$ кВ,  $\epsilon=4$ ,  $V=1$ мм/с); в –  $K=f(\epsilon_1)$  при ( $u=5$ кВ,  $a=2$ мм,  $V=1$ мм/с); г –  $K=f(v)$  при ( $a=2$ мм,  $\epsilon=4$ ,  $V=1$ мм/с); д –  $K=f(e)$  при ( $a=2$ мм,  $\epsilon=4$ ,  $U=5$ кВ,  $V=1$ мм/с); е –  $K=f(d)$  при ( $a=2$ мм,  $\epsilon=4$ ,  $U=5$ кВ).

Из зависимостей  $K_{эф}=f(V)$  (рис. 3.11 г) следует, что с увеличением скорости, как уже отмечалось ранее, коэффициент эффективности осаждения уменьшается примерно по следующей зависимости:

$$K_{эф} = \frac{G}{\omega}, \quad (3.26)$$

где  $G$  – коэффициент пропорциональности, зависящий от размера частиц примесей: ( $G$  увеличивается примерно в 1,5 раза с удвоением размера  $d$ ).

Таким образом, увеличение производительности фильтра сопровождается относительным увеличением числа неотфильтрованных крупных частиц.

Важным для проектирования электрофильтров с наполнителем является месторасположение зёрен наполнителя относительно коаксиальных электродов. Из графиков зависимостей  $K_{эф}=f(r)$  (рис. 3.11 д) следует что коэффициент эффективности осаждения практически не зависит от расстояния сферы диэлектрика до центральной нити для частиц размером менее 50 мкм, а для крупных частиц уменьшается с уменьшением этого расстояния. Причём размеры частиц примесей также существенно влияют на коэффициент  $K_{эф}$ . Начиная с  $d > 50$  мкм зависимости  $K_{эф}=f(d)$  являются линейными.

Таким образом, анализ результатов математического моделирования процесса осаждения частиц примесей в дизельном топливе позволил сделать вывод о том, что наиболее эффективным параметром не требующим усложнения конструкции электрофильтра, и оказывающим весьма существенное влияние на коэффициент  $K_{эф}$ , является диэлектрическая проницаемость материала зёрен «наполнителя».

Для повышения качественных характеристик электрофильтра необходимо использовать материалы с высокими значениями диэлектрической проницаемости при изготовлении рабочих элементов фильтра. Такие материалы существуют в природе. Это соединения на основе титана: титанат бария  $BaTiO_3$ ; титанат стронция  $SrTiO_3$  и другие подобные им. Особенности строения кристаллической решётки этих соединений обуславливают их очень высокую диэлектрическую проницаемость, достигающую сотен и тысяч единиц. Предлагая использование их в качестве материала рабочей сферы рассматриваемого электрофильтра, целесообразно определить значения площади захвата  $S_{эф}$  частиц примеси (вода и кварц)

рабочей сферой с диэлектрической проницаемостью, изменяющейся в пределах от 1200 до 2000 единиц.

Значения других параметров – размера сферы, частиц примеси, напряжения на электродах ячейки, как и скорости течения жидкости, остались теми же.

Зависимость  $S_{эф}$  от размера рабочей сферы  $a$  и её диэлектрической проницаемости  $\epsilon_1$  для капель воды и частиц кварца в дизельном топливе приведена на рис. 3.12 и рис. 3.13 соответственно.

Как и прежде, в случае малых  $\epsilon_1$  площадь  $S_{эф}$  быстро возрастает с ростом  $a$  и тем быстрее, чем выше диэлектрическая проницаемость сферы. Сама эффективная площадь при высоких диэлектрических проницаемостях гораздо выше и достигает сотен и тысяч квадратных миллиметров, что в десятки и сотни раз превышает площадь поперечного сечения рабочей сферы.

Сравнение графиков приведённых на рис. 3.12 и рис. 3.13, показывает, что абсолютные значения площадей захвата сферой частиц кварца, имеющего диэлектрическую проницаемость  $\epsilon_3 = 3,65$ , всюду примерно вдвое ниже, чем капелек воды ( $\epsilon_3 = 81$ ) тех же размеров.

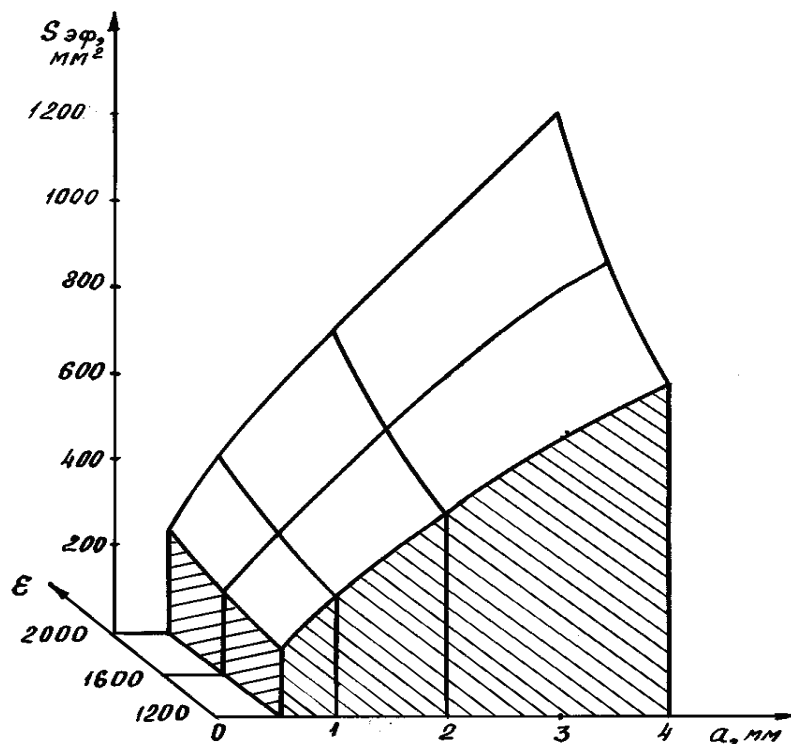


Рисунок 3.12 Зависимость  $S_{эф}$  от размера  $a$  и диэлектрической проницаемости сферы  $\epsilon_1$  для водяных капель (при  $d = 25$  мкм,  $U = 5$  кВ и  $V = 5$  мм/с)

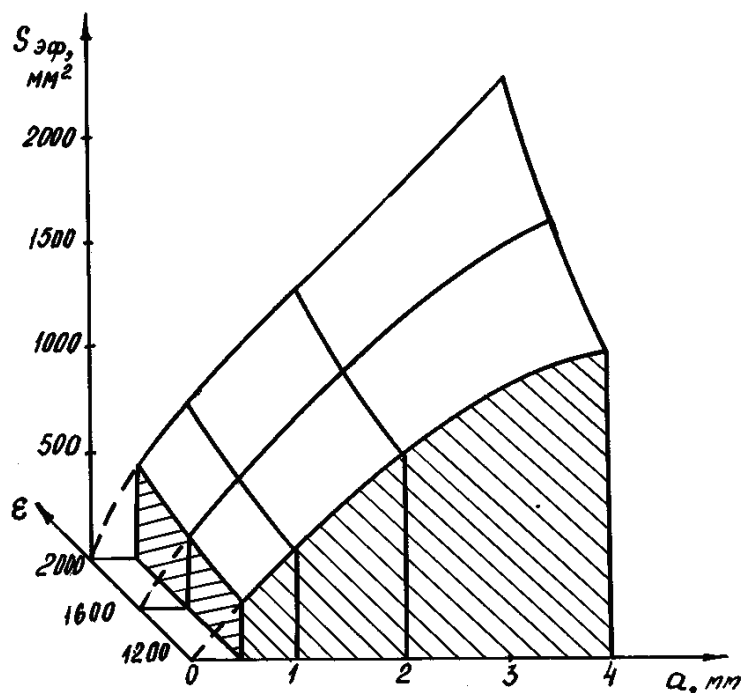


Рисунок. 3.13 Зависимость  $S_{эф}$  от размера  $a$  и диэлектрической проницаемости сферы  $\epsilon_1$  для частичек кварца (при  $d = 25$  мкм,  $U = 5$  кВ и  $V = 5$  мм/с)

Зависимости  $S_{эф}$  от диэлектрической проницаемости сферы и скорости движения топлива в фильтре подтверждают сделанный ранее вывод о возрастании этой величины с ростом  $\epsilon_1$  и показывает, что функция  $S_{эф} = f(\epsilon)$  отличается от линейной. Так, с увеличением  $\epsilon_1$  от 1200 до 2000, т.е. в 1,67 раза, площадь захвата увеличивается примерно в 1,50...1,55 раза. Если сравнивать это с результатами для малых диэлектрических проницаемостей ( $\epsilon_1 = 2000$  и  $\epsilon_1 = 32$ ), то увеличение  $\epsilon_1$  в 62 раза приводит к росту  $S_{эф}$ , примерно, в 30...35 раз в зависимости от размеров рабочей сферы.

Зависимость  $S_{эф}$  от скорости течения жидкости  $\omega$  аналогична, как и для случая малых значений  $\epsilon_1$ , наблюдается уменьшения значения площади захвата с ростом  $\omega$ , подчиняется, как и прежде, закону корня квадратного из обратных величин скорости.

Зависимости  $S_{эф}$  от напряжения  $U$  и размеров  $d$  частиц примесей в топливе при больших значениях  $\epsilon_1 = 1200...2000$  сохраняют тот же характер, что и для сравнительно малых значений  $\epsilon_1 = 4...32$ , что подтверждает работоспособность математической модели процесса очистки дизельного топлива электростатиче-

ским фильтром в достаточно большом диапазоне технологических режимов и его конструктивных параметров.

### 3.3.2 Установка для очистки дизельного топлива

Проведённые исследования позволили разработать и изготовить экспериментальную установку с расчётной производительностью 5...8 л/мин. Гидравлическая схема установки представлена на рис. 3.14.

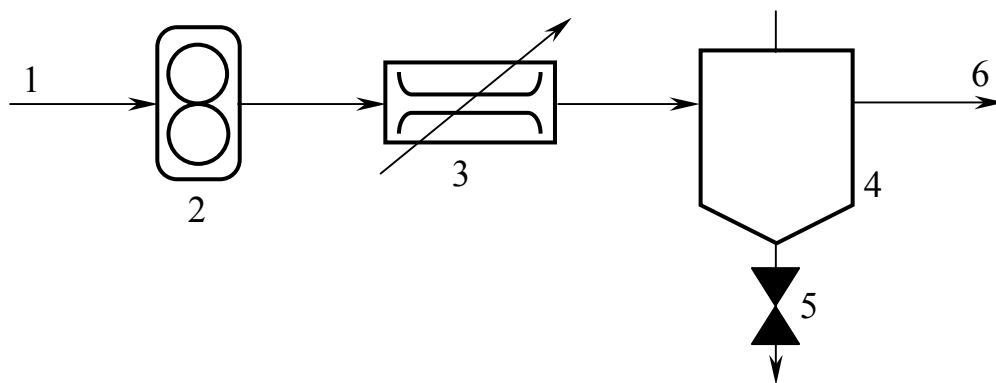


Рисунок 3.14 Гидравлическая схема установки с электрическим фильтром: 1 – вход; 2 – насос шестерёнчатый; 3 – регулируемый дроссель; 4 – электрический фильтр; 5 – вентиль для слива загрязнений; 6 – выход.

Конструктивно экспериментальная установка представляла собой вертикально расположенные на раме электрический фильтр и двигатель с насосом, соединенные между собой шлангами.

Предыдущие исследования позволили разработать конструкцию фильтра и получить патент на его устройство и способ регенерации (патент UA 37109A. Электрический фильтр и способ его регенерации. Авторы: Дидур В.В. и др.) [38].

Аналогом изобретения послужило А.С.СССР №1472097 на электрический фильтр из коаксиальных электродов сложной формы [142]. Прототипом - патент США №3820306 [104], согласно которого электрический фильтр имеет между электродами пористый фильтрующий элемент из диэлектрического материала.

В основу разработанного патента положены результаты математического моделирования спрогнозировавшие возможность повышения эффективности электрического фильтра за счёт применения зёрен (сфер) сегнетоэлектрика между электродами фильтра и их экспериментальное подтверждение.

Электрический фильтр, состоит из корпуса с входом и выходом, электродов с отверстиями, превышающими размеры задерживаемых частиц, установленных на расстоянии один от другого и фильтрующего элемента выполненного в виде перегородки, в узлах которой расположены зёрна (сферы) сегнетоэлектрика на расстоянии 2-х – 3-х их радиусов.

Фильтрующий элемент с зёрнами сегнетоэлектрика установлен между электродами и имеет поры, больше чем частицы загрязнений, которые находятся в жидкости.

Схема электрического фильтра по патенту UA № 37109A [38] представлена на рис. 3.15.

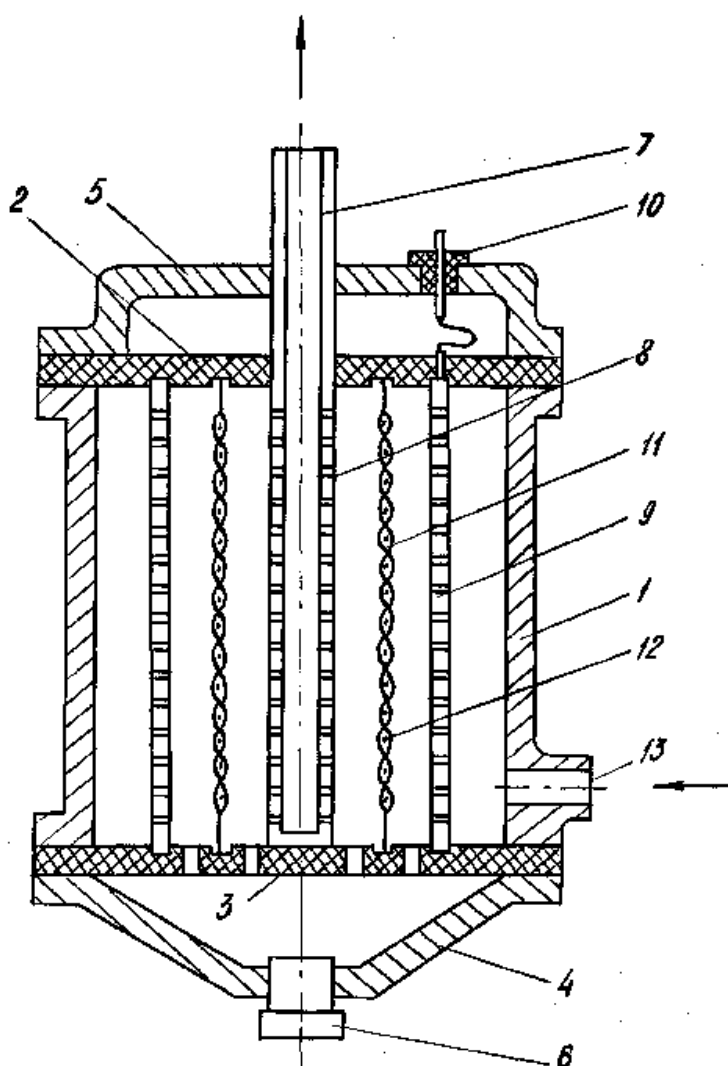


Рисунок 3.15 Схема электрического фильтра согласно патента UA №37109A: 1 – корпус; 2 и 3 – изолирующие вставки; 4 и 5 – нижняя и верхняя крышки; 6 – сливной штуцер; 7 – выходной патрубок; 8 и 9 – электроды; 10 – выход электрода; 11 – фильтроэлемент; 12 – кристаллы диэлектрика.

Электрический фильтр имеет корпус 1, к которому с помощью фланца через изолирующие проставки 2 и 3 крепится нижняя 4 и верхняя 5 крышки. В нижней крышке 4 размещается сливное отверстие 6. Через верхнюю крышку 5 выходит выходной патрубок 7, который является другим электродом 8. Первый электрод 9 размещается в пазах верхней 2 и нижней 3 изолирующих проставок и с помощью проводника подключён к высоковольтному источнику.

Между электродами 8 и 9 размещается фильтроэлемент 11, в узлах которого размещён сегнетоэлектрик 12 (титанат стронция).

Фильтрующий элемент выполняют из стёганой ткани, натянутой на жёсткий каркас.

Зёрна сегнетоэлектрика, размещённые между электродами, выступают зародышами коагуляции загрязнений в топливе. Недопустимо касание зёрен между собой, так как это снижает эффективность фильтра.

В перерывах работы, после снятия напряжения, часть загрязнений под действием силы тяжести перемещается вниз и сливается через отверстие 6.

Для быстрой очистки фильтра (регенерации фильтра) разработан метод с применением колебаний зёрен сегнетоэлектрика.

Для очистки кристалла сегнетоэлектрика от примесей к электродам вместо выхода высоковольтного источника подключался выход ультразвукового генератора с амплитудой выходного напряжения 120...180 В. Изменение частоты в пределах 40...60 кГц позволяет пройти резонансную точку для кристалла сегнетоэлектрика данного размера и формы и освободить его от частиц примеси за счёт явления пьезоэффекта. Это исключает применение разборки фильтра в процессе эксплуатации.

Общий вид опытного образца электрофильтра приведен на рис. 3.16.

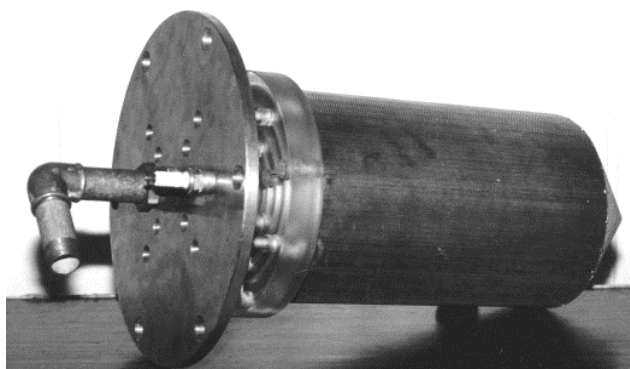


Рисунок 3.16 Опытный образец электрического фильтра.

На рис. 3.17 и рис. 3.18 представлены электроды и внешний вид установки по очистке дизельного топлива в сборе.

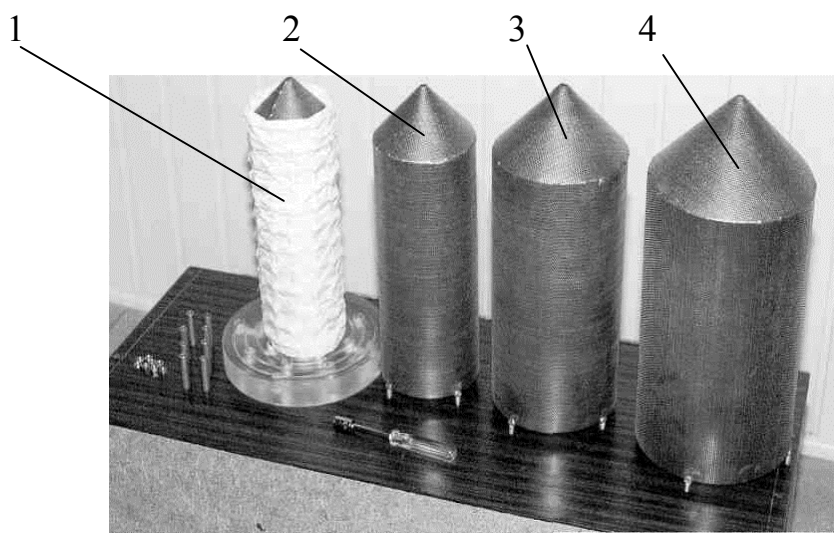


Рисунок 3.17 Внешний вид электродов фильтра: 1 - электрод с оболочкой заполненной наполнителем; 2, 3 и 4 – электроды без оболочки.

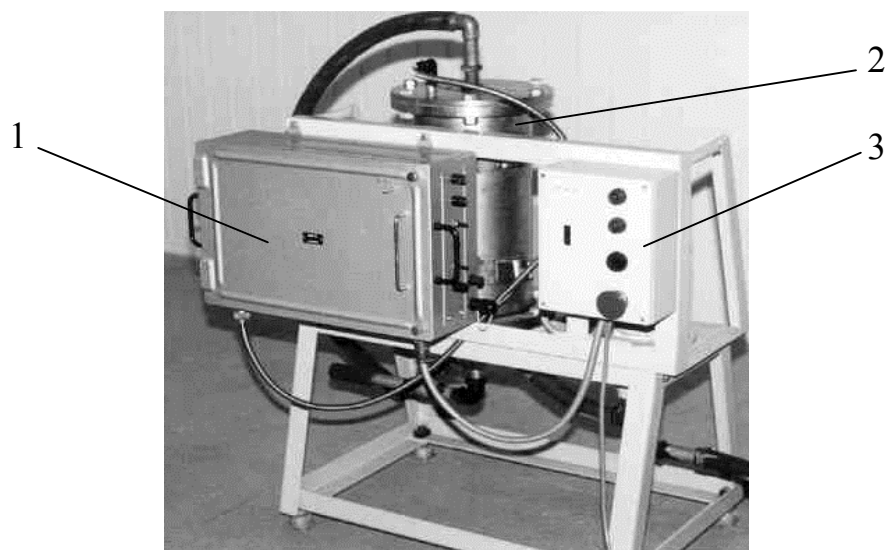


Рисунок 3.18 Внешний вид установки для очистки дизельного топлива: 1 - источник высокого напряжения; 2 – электрофильтр; 3 – пульт управления.

Внутренний диаметр электрического фильтра составляет 900 мм, что обеспечивает расход 3...5 л/мин при средней требуемой скорости движения жидкости 1...3 мм/сек. При этом скорость движения жидкости переменная, увеличивается по мере приближения к выходному патрубку.

Расход через электрофильтр устанавливался при помощи регулируемого дросселя, а определялся при помощи объёмного мерника и секундомера.

Коэффициент фильтрации определялся по формуле

$$K_{\phi} = \frac{(N_H - N_i)}{N_H},$$

где  $N_H$  – количество частиц мехпримесей в исходном топливе;

$N_i$  – количество частиц мехпримесей в топливе после прокачки его через электрофильтр.

Сепаратор с сегнетоэлектрическим наполнителем представлял собой двухсторонний рукав из натурального щёлка, с простёганными ячейками, в которых размещаются зёрна сегнетоэлектрика. Расчёт конструкции и количества стёганных оболочек с зёрнами диэлектрика базировался на результатах исследования математической модели процесса осаждения механических примесей в дизельном топливе (см. 2.2). используя формулы (2.47 и 2.48) и полагая, что коэффициент  $K_{\phi}=1$ , определяется количество кристаллов диэлектрика  $N$  исходя из рабочей площади электродов. В нашем случае при использовании кристаллов титаната стронция ( $\text{SrTiO}_3$ ) с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_1=1200\dots2000$  ед. для обеспечения расчётного значения  $N$  необходимо обеспечить расстояние между кристаллами диэлектрика равным 2...3 их радиуса. Это предполагает полное осаждение частиц загрязнений  $d > d_{\min}$ . При этом  $d_{\min}$  было установлено исходя из технических требований, которое равно для ТНВД двигателя СМД-62, как было установлено ранее (4.1) 4...6 мкм. К сепаратору с внутренней стороны нашивались шарообразные изоляторы, а сам рукав одевался на четвёртый (внутренний электрод). Таким образом, зёрна сегнетоэлектрика оказывались на равном удалении от третьего и четвёртого электродов, не находились в жёсткой связи с конструкцией и в то же время фиксировались геометрически в пространстве. Отсутст-

вие жёсткой связи с конструкцией особенно важно при применении вторичного пьезоэффекта для удаления загрязнений с поверхности.

### **3.4. Методика контроля чистоты дизельного топлива**

Прибор контроля загрязненности жидкости ПКЖ-904В (рис. 3.19) использовался для гранулометрического контроля загрязнений жидкости в стационарных условиях или в потоке. Согласно паспорта на прибор жидкость должна поступать в измерительную кювету сверху вниз. Но практические исследования показали, что при таком движении жидкости в измерительной кювете образуются пузырьки воздуха, что искажает показания прибора. Удаление этих пузырьков отнимает много времени у исследователей. В лаборатории КИИГА [88] была разработана методика подключения прибора с подачей жидкости в измерительную кювету снизу, и были рассчитаны расходные характеристики такого подключения. Как следует из разработанной методики, максимальная прокачка испытуемой жидкости через кювету не должна превышать  $200 \text{ см}^3/\text{мин}$ . При прокачке свыше  $200 \text{ см}^3/\text{мин}$  чувствительный элемент прибора не успевает регистрировать все проходящие частицы, следовательно, получаются заниженные результаты.

При прокачке меньше  $100 \text{ см}^3/\text{мин}$  часто получаются завышенные результаты, т.к. в этом случае гидравлического напора не всегда бывает достаточно для переноса всех частиц через кювету, и часть из них может совершать конвективное движение внутри кюветы и многократно регистрироваться чувствительным элементом.

Результаты исследований по сходимости результатов, проведенные в КИИГА [88], при анализе степени загрязнения жидкости АМГ-10 показали, что предложенная схема подключения прибора ПКЖ –902 имеет ряд преимуществ по сравнению с традиционной.

Изложенная выше методика с применением прибора ПКЖ –902 была выбрана для предварительного анализа эффективности очистки дизельного топлива при оценке различных вариантов конструкции электрофильтра и использовалась, как уже отмечалось, с применением более современной модели, каким является

прибор ПКЖ – 904В.

Микроскопические методы контроля загрязненности жидкостей более информативны, т.к. позволяют оценить не только количество и размер частиц, но и их форму. При этом возможно как прямое считывание частиц загрязнений, задержанных на поверхности мембранного фильтра, так и фотографирование частиц, осевших из пробы жидкости на фильтр.

Определение гранулометрической характеристики загрязнений и объемной концентрации осуществлялся следующим образом. Проба для анализа жидкости в объеме  $250 \text{ см}^3$  помещается в стеклянную емкость с притертой пробкой. Емкость предварительно обрабатывается хромовой смесью с последующей промывкой дистиллированной водой и затем просушивается в сушильном шкафу (не допускается применение моющих средств, содержащих ПАВ). Емкости для проб маркируются этикетками, на которых указываются условия отбора и очистки.

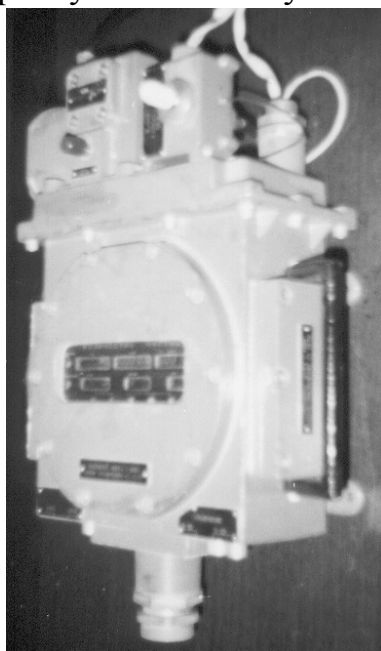


Рисунок 3.19 Внешний вид прибора ПКЖ – 904В.

Анализ проб производили с помощью портативного экспресс – анализатора классов чистоты рабочих и технологических жидкостей ПЭАЖ-1, разработанного НИИгидропривод (г. Харьков). Прибор позволяет определять классы чистоты по ГОСТ 17216-71.

Количество частиц загрязнений каждой размерной группы, содержащихся в  $100 \text{ см}^3$  анализируемой пробы, вычислялся по формуле:

$$N_i = \frac{100 \sum_{i=1}^k n_i}{k \cdot V_i}, \quad (3.27)$$

где  $n_i$  – количество частиц загрязнений определённой размерной группы на фотографиях (в объективе микроскопа) отдельных участков пробы, шт.;

$k$ -количество участков с загрязнениями;

$V_i$  - объем анализируемой пробы жидкости, из которой выпали в осадок подсчитанные частицы загрязнений, см<sup>3</sup>.

Класс чистоты по ГОСТ 17216-71 может быть определен по методике, разработанной НИИГидропривод. Для этого по формуле определяется индекс загрязненности  $Z$ :

$$Z = 1/100(n_{5-10} \cdot 10 + n_{10-15} \cdot 25 + n_{25-50} \cdot 50 + n_{50-100} \cdot 100 + n_{100-200} \cdot 200 + n_{вол} \cdot 400), \quad (3.28)$$

где:  $n_{5-10}$ ,  $n_{10-25}$  и т.д. – число подсчитанных частиц в пробе жидкости объемом 100см<sup>3</sup> в размерных группах 5-10, 10-25 мкм и т.д., указанных в ГОСТ 17216-71;

$n_{вол}$  – число подсчитанных волокон.

Полученные значения  $Z$  сравниваются со значениями  $Z^*$ , подсчитанными по данным, приведённым в размерных рядах ГОСТ 17216-71 для каждого из приведенных классов чистоты.

В странах Западной Европы и Америке для классификации жидкостей по наличию загрязнений применяются стандарты ISO 4406 и NAS 1638. Всемирно признанным является стандарт ISO 4406. По этому стандарту определяется количество частиц размером более 5 мкм и частиц размером более 15мкм в 100 см<sup>3</sup> жидкости. Подсчет производится как под микроскопом, так и при помощи автоматических счетчиков.

С помощью прибора ПЭАЖ –1 в настоящей работе проведен анализ полноты отсева электрическим фильтром и тонкости отсева загрязнителя, находящегося в дизельном топливе.

При определении полноты отсева и тонкости отсева загрязнителя пользовались следующей методикой.

Пробы топлива, отобранные перед испытуемым фильтром (проба 1) и после фильтра (проба 2) с помощью прибора ПЭАЖ-1 прокачивались через мембранный фильтр. В первом и втором случае прокачивалось по 100 см<sup>3</sup> дизельного топлива.

После прокачивания топлива мембранный фильтр с осадком промывали бензином Б-70 до тех пор, пока на фильтре не будет оставаться следов дизельного топлива, а капля растворителя, взятая после промывки, не будет оставлять следов на фильтрованной бумаге.

После промывки мембранный фильтр с осадком загрязнителя на нем доводили до постоянного веса высушиванием в сушильном шкафу при температуре 323-343К.

Просушенные фильтры с загрязнителем взвешивали на лабораторных аналитических весах для определения полноты отсева, и по формуле (3.29) определялся коэффициент полноты отсева механических примесей

$$\varphi = \left( 1 - \frac{x_2}{x_1} \right) \cdot 100\%, \quad (3.29)$$

где  $x_1$  - концентрация (масса) загрязнителя в пробе после фильтра;

$x_2$  - концентрация (масса) загрязнителя в пробе до фильтра.

Пробу 1 тщательно перемешивали встряхиванием колбы и, пока не остановилось движение жидкости в колбе, отбирали пипеткой 1 мл. топлива и выливали в чистую колбу, где находилось 25 мл. бензина.

Содержимое колбы перемешивали встряхиванием и фильтровали на приборе ПЭАЖ-1 через мембранный фильтр № 5.

После окончания фильтрования мембранный фильтр помещали на предметное стекло микроскопа для подсчета частиц.

Определение размера частиц и их подсчет производили последовательно в десяти полях зрения, передвигая мембранный фильтр таким образом, чтобы исключить повторный замер и подсчет частиц загрязнителя.

За размер частиц принимали наибольшую их ширину.

Во всех десяти полях зрения подсчитывали частицы загрязнителя размером от 2 мкм и более, т.е. 2...4; 4...6; 6...8; 8...10; 10...15 и свыше 15 мкм.

Анализ пробы 2 проводили аналогично, как и у пробы 1, но через мембранный фильтр пропускали не 1, а 10 мл топлива пробы 2. Для сравнения результатов число частиц каждой размерной группы, полученное при подсчете пробы 1, умножали на 10.

### **3.5 Методика лабораторных исследований процесса осаждения частиц механических примесей в электрическом поле с кристаллами из диэлектрика**

Целью данных исследований является экспериментальная оценка адекватности математической модели процесса очистки дизельного топлива силами электрического поля, в котором расположены кристаллы наполнителя из диэлектрика.

Методически эта цель достигалась следующим образом:

- Осуществлялась экспериментальная проверка правильности принятой гипотезы о возможности усиления эффективности осаждения частиц механических примесей в дизельном топливе силами электрического поля с помощью размещения в межэлектродном пространстве наполнителя из диэлектрического материала с высокой диэлектрической проницаемостью.

- Выполнена экспериментальная оценка эффективности очистки дизельного топлива электрофильтром, изготовленным в соответствии с разработанной математической моделью процесса осаждения частиц.

Конструкция экспериментального фильтра выполнена с параллельными плоскими электродами прямоугольной формы с корпусом из кварцевого стекла. Подсветка осуществлялась снизу. Очищаемая жидкость – дизельное топливо, загрязнитель – древесный уголь, размеры частиц – 1...20 мкм. Для наблюдения использовался лабораторный микроскоп, а для регистрации – фотоаппарат «Зенит» с фотографической насадкой к микроскопу. Для питания фильтра применялся лабораторный источник питания с выходным напряжением до 5000 В и максимальным током 10 мА.

Внешний вид электрического фильтра с нержавеющей электродами пре-

представлен на рис. 3.20.

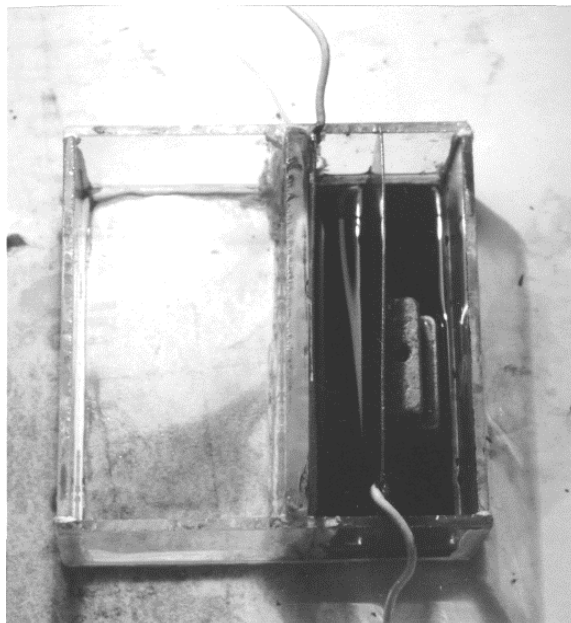


Рисунок 3.20 Внешний вид электрического фильтра для лабораторных исследований.

Внешний вид установки для наблюдения за поведением примеси в дизельном топливе представлен на рис. 3.21.

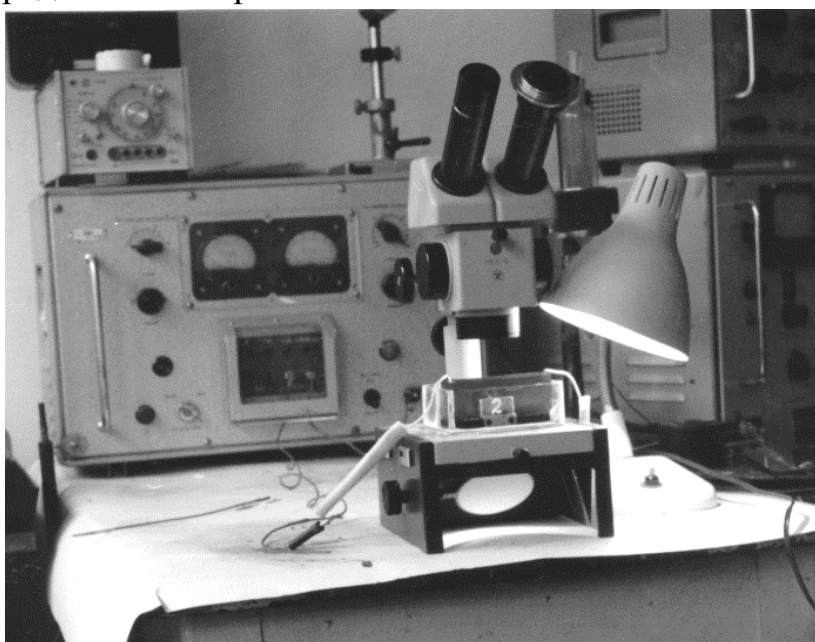


Рисунок 3.21. Внешний вид установки для наблюдения за поведением примеси в дизельном топливе.

Для наблюдения за осаждением примесей на наполнитель и сравнения эффективности наполнителей разной природы на дно кюветы на равном расстоянии от электродов размещались кристаллы титаната стронция (рис. 3.22 - слева) и

кварцевого стекла (рис. 3.22 – справа), размер кристаллов – 1,5...2,5 мм. Кювета заполняется дизельным топливом.

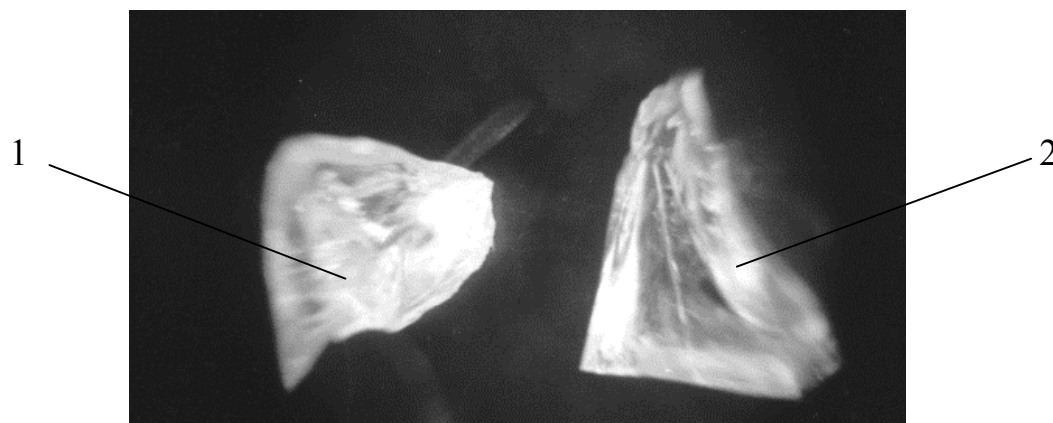


Рисунок 3.22 Внешний вид кристаллов наполнителя с различной диэлектрической проницаемостью: 1 – титанат стронция; 2 – кварцевое стекло.

Для получения кристаллов нужного размера производилось термическое разрушение искусственного монокристалла титаната стронция. Резкое охлаждение нагретого монокристалла в воде приводило к его разрушению с сохранением исходной диэлектрической проницаемости (1700...2000) ед.

Механическое разрушение монокристалла приводит к существенному уменьшению диэлектрической проницаемости до уровня (30...50) ед. Размеры зёрен сегнетоэлектрика (титаната стронция) и кварцевого стекла выбирались в пределах 1,5...2,5 мм и близкие по форме. Эксперимент проводился при статически неподвижной жидкости. Фотографирование осуществлялось до включения высоковольтного источника, в момент включения и после включения с интервалом в 5 секунд. Напряжение на электродах – 5000 В при расстоянии между электродами 10 мм

После качественной оценки адекватности математической модели процесса очистки дизельного топлива с помощью лабораторного электрофильтра был создан на основе Патента Украины UA 37109A опытный образец электрофильтра [38].

### **3.6. Методика оценки эффективности использования электрического фильтра для предварительной подготовки дизельного топлива**

В соответствии с программой экспериментальных исследований оценка эффективности использования разработанного электрического фильтра, предназначенного для предварительной подготовки дизельного топлива перед заправкой в топливные баки мобильной сельскохозяйственной техники, осуществлялась в два этапа.

На первом этапе были созданы опытные образцы (в количестве 3 шт.) электрофильтров (рис. 3.16) и при помощи стендовых испытаний были определены их функциональные характеристики.

На втором этапе были созданы опытные образцы (в количестве 3 шт.) установок для очистки дизельного топлива (рис. 3.18). и переданы в хозяйства: Агрофирма «Правда», Ботиевское ХПП и Нельговское ХПП Запорожской области в качестве заправочных станций.

Стендовые испытания опытных образцов указанных электрофильтров проводились согласно методики, регламентированной ГОСТ 14146-88, который распространяется на фильтры тонкой очистки топлива и их фильтрующие элементы, устанавливаемые в топливных системах низкого давления дизелей и предназначенные для окончательной очистки топлива [29].

В качестве испытуемого фильтра применялся электрический фильтр, конструкция которого разработана в четвертом разделе настоящей работы. Эффективность очистки топлива электрическим фильтром оценивали по двум параметрам: полнота и тонкость отсева примеси и полнота отделения воды. Полнота и тонкость отсева загрязнителя электрическим фильтром проверялась на стенде, схема которого представлена на рис. 3.10.

Средой для испытания служило дизельное топливо по ДСТУ 3868-99. В качестве примеси (искусственного загрязнителя) применяли кварцевую пыль.

Перед проведением испытаний установку согласно ГОСТ 14146-88 промывали циркуляцией дизельного топлива через технологический фильтр 9, в качестве которого использовали серийный фильтр тонкой очистки 2ТФ-3, установ-

ливаемый на двигателях семейства СМД с тонкостью фильтрации 20 мкм. После завершения промывки системы в схему включали электрический фильтр 5, рис. 4.6.

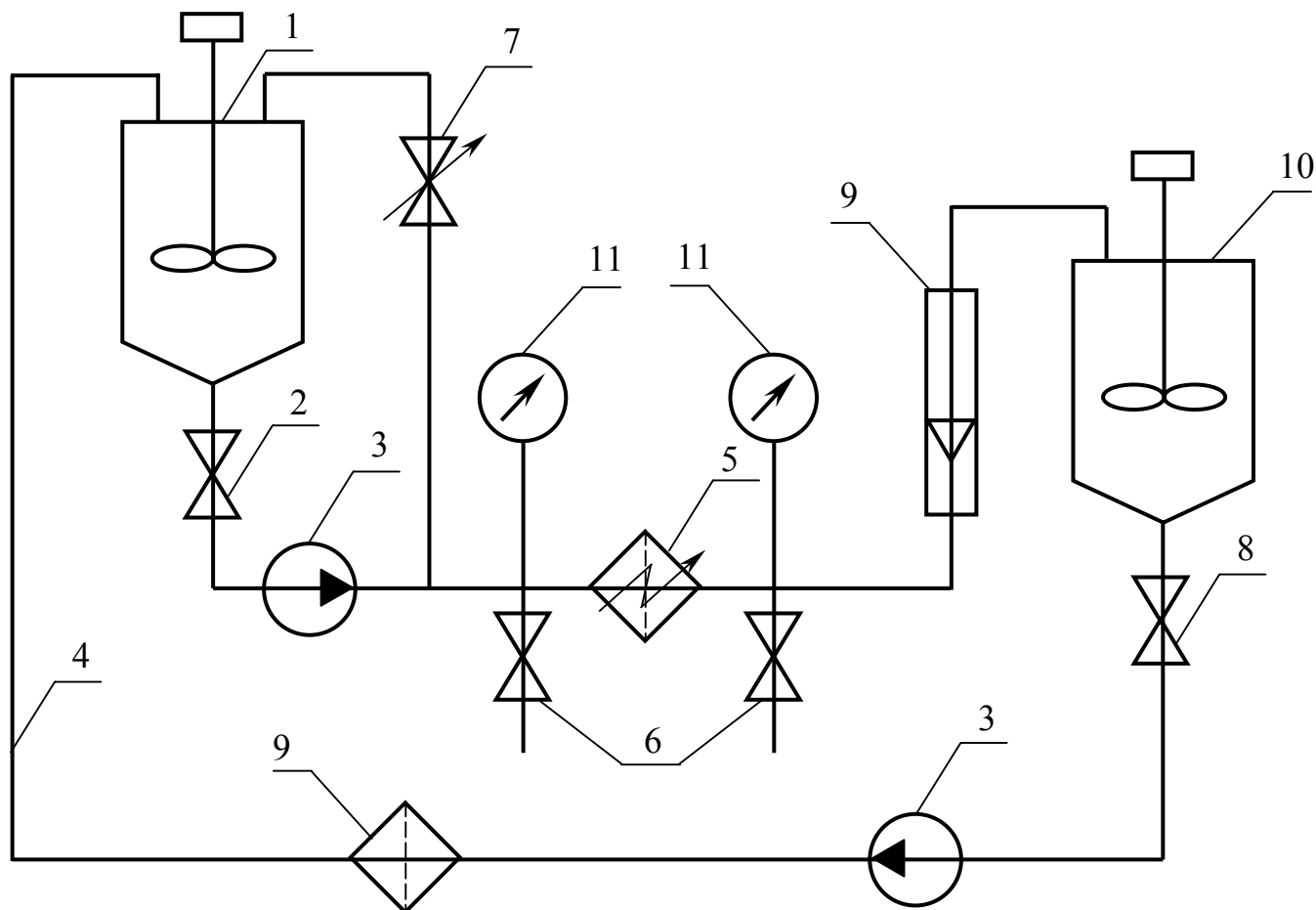


Рисунок 3.23 Схема стенда для определения полноты отсева загрязнителя: 1 – расходный бак; 2, 8 – краны; 3 – насос; 4 – трубопровод; 5 – испытуемый электрический фильтр; 6 – краны отбора проб; 7 – расходомер; 9 – технологический фильтр; 10 – вспомогательный бак; 11 – манометр.

Искусственный загрязнитель перед введением в бак 1 просушивался при температуре  $150 \pm 20$  °С не менее 3-х часов и после охлаждения в эксикаторе загрязнитель тщательно перемешивался в топливе мешалкой, которая установлена в баке 1.

Концентрация загрязнителя составляла 0,1% массы дизельного топлива, залитого в бак 1, т.е. 40 гр.

Фракционный состав загрязнителя регламентировался ГОСТ 14146-88 и содержал частицы кварцевой пыли следующих размеров: 2; 4; 8; 18; 20 и свыше

20мкм. При испытаниях применялся тот же загрязнитель (кварцевый песок), что и при испытаниях плунжерных пар.

Регулированием производительности насоса 3 за счет перепуска устанавливали расход топлива через электрический фильтр 5, обеспечивающий перепад на фильтре 5 ( $3 \pm 1$ ) кПа, технологический фильтр 9 из работы выключали.

Отбор проб дизельного топлива производили сразу после включения установки перед фильтром и после 5 минут работы электрического фильтра в контуре циркуляции за фильтром.

Полноту отсева загрязнителя рассчитывали по формуле (3.29).

Концентрацию загрязнителя в топливе определяли с помощью прибора ПЭАЖ - 1.

Результаты анализа мембранных фильтров №5 на топливах, взятых до и после электрического фильтра, позволили определить полноту отсева по формуле (3.13). Для сравнения, согласно ГОСТ 14146-88, полнота отсева для фильтров, устанавливаемых на автотракторных дизелях, должна быть в пределах 0,8...0,85.

Анализ проб №1 (1мл топлива), взятых до фильтра, и №2 (10мл топлива), взятых после фильтра, позволил установить тонкость отсева электрофильтром.

Полнота отделения воды оценивалась на установке, представленной на рис. 3.10.

Перед началом испытаний установку промывали путем циркуляции дизельного топлива через технологический фильтр 9, при этом испытуемый электрический фильтр 5 с установки был снят.

Электрический фильтр 5 включали в схему установки после завершения промывки.

В расходный бак 1 заливали 10 литров дизельного топлива, и при работающей мешалке вводилась дистиллированная вода в концентрации 1 % массы топлива ( $100 \text{ см}^3$ ). При этом объем воды не превышал вместимость отстойника электрического фильтра. Регулировкой производительности насоса 3 устанавливали расход топлива, обеспечивающий перепад на фильтре 5( $3 \pm 1$ ) кПа.

Испытания продолжали до тех пор, пока все топливо не перекачивалось из

бака 1 в бак 10 при закрытом кране 8 слива с бака 10.

После завершения перекачки отстой из фильтра 5 сливали в стакан, отстаивали 30 мин и измеряли объем воды с погрешностью не более 1,25 мл.

Полноту отделения воды рассчитывали по формуле [124]

$$\varphi = \frac{Q}{Q_0}, \quad (3.30)$$

где  $Q$  и  $Q_0$  - соответственно объем воды, задержанного электрофильтром, и находящийся в баке.

Эффективность очистки топлива от воды с помощью электрофильтра дополнительно оценивали тестом на окраску при добавлении в него кристаллов марганцевокислого калия.

Эксплуатационные испытания мобильной сельскохозяйственной техники, на которых установлены двигатели семейства СМД, имели целью оценить стабильность функциональных характеристик топливоподающей аппаратуры, в частности, серийных фильтров тонкой очистки и ТНВД с применением и без применения предварительной очистки дизельного топлива и определить влияние этих характеристик на показатели эффективности использования мобильных сельскохозяйственных агрегатов.

Наблюдения были установлены за девятью сельскохозяйственными агрегатами в т.ч. три трактора Т-150 К. Все сельскохозяйственные агрегаты были разбиты на три группы по три агрегата: трактора первой группы заправлялись топливом, в состоянии поставки; трактора второй группы заправлялись топливом, отстоянным не менее 48 часов; трактора третьей группы заправлялись топливом предварительно очищенным заправочной установкой с электрофильтром. Перед наблюдениями на двигатели перечисленных тракторов были установлены новые фильтры тонкой очистки 2ТФ-3, топливные насосы высокого давления модели 221.1111.004-40 после капитального ремонта, соответствующие техническим требованиям.

Фильтры тонкой очистки перед установкой на трактор проходили испытания на стенде, где определялся начальный перепад давления  $\Delta P$ . Затем через каж-

дые 750 моточасов наработки фильтр снимался и производился контроль перепада давления при расходе 0,7 л/мин.

Аналогично фильтрам перед установкой на трактор проходили испытания и регулировку ТНВД на стенде «Моторпал» Н<sub>ц</sub> – 108. При испытаниях определялись следующие характеристики: 1 – пусковая подача; 2 - подача коррекции; 3 - номинальная подача.

По каждой из указанных характеристик определялась средняя подача и подача по штуцерам.

По результатам измерения подача по штуцерам определялись неравномерность подачи и уменьшение в зависимости от наработки средней подачи.

Неравномерность подачи определялась по формуле:

$$\delta = \frac{2(V_{\max} - V_{\min})}{V_{\max} + V_{\min}} \cdot 100\%, \quad (3.31)$$

где  $V_{\max}$  и  $V_{\min}$  - соответственно наибольшее и наименьшее значение количества топлива в мерном сосуде от одной форсунки, см<sup>3</sup>.

Стенд «Моторпал» Н<sub>ц</sub> – 108 укомплектован эталонными форсунками одной группы и отвечал требованиям системы контрольных образцов ТУ 1023.001-89.

Все ТНВД с наблюдаемых тракторов с периодичностью наработки 750 моточасов снимались и устанавливались на стенд для измерения указанных ранее характеристик.

### **3.7 Выводы по третьему разделу.**

1. В соответствии с программой экспериментальных исследований наряду с использованием известных методик и стандартного метрологического оборудования для выполнения поставленных в диссертационной работе задач были разработаны новые методики, усовершенствованы лабораторные образцы испытательных стендов и созданы образцы нового оборудования. В частности, для моделирования процесса изнашивания прецизионных соединений топливоподающей аппаратуры разработана методика ускоренных износных испытаний на основе моделирования и усовершенствована машина трения СМТ-1 путем создания специ-

ального модуля для испытания пары трения типа «кольцо-кольцо» в среде загрязненного дизельного топлива. Разработана методика изучения процесса осаждения механических примесей в электрическом поле с размещенными в нем кристаллами из диэлектрика с высокими диэлектрическими свойствами.

2. Разработана математическая модель процесса очистки дизельного топлива силами электрического поля, в котором расположена поляризованная единичная сфера из диэлектрика, позволившая создать методику расчёта основного критерия эффективности очистки электрического фильтра коэффициента эффективности  $K_{эф}$  и эффективной площади  $S_{эф}$  осаждения механических примесей и воды.

3. Исследованы основные закономерности и получены зависимости для инженерного расчёта конструктивных параметров и технологических режимов электрического фильтра с наполнителем из диэлектрика. Так, например, коэффициент эффективности  $K_{эф}$  и эффективная площадь осаждения  $S_{эф}$  зависят прямо пропорционально от напряжения  $U$  на электродах, обратно пропорционально корню квадратному скорости течения жидкости, прямо пропорционально размерам диэлектрика и частиц механических примесей и весьма чувствительны к изменению диэлектрической характеристики наполнителя. Так, угловой коэффициент зависимостей  $K_{эф}=f(\varepsilon_1)$  отнесённый к размеру частиц примеси  $d$  составляет в среднем  $2,6 \cdot 10^{-3} \text{ мкм}^{-1}$ .

4. Анализ результатов математического моделирования процесса осаждения частиц примесей в дизельном топливе позволил установить что наиболее эффективным параметром, увеличение которого не требует усложнения конструкции электрофильтра и оказывает весьма существенное влияние на повышение его эффективности, является диэлектрическая проницаемость материала зёрен «наполнителя». В качестве таких материалов могут быть использованы титанат бария или титанат стронция, диэлектрическая проницаемость которых равна в пределах 1200...2000 единиц. Для сравнения, диэлектрическая проницаемость других широко известных материалов находится в пределах 2...32 единицы.

## РАЗДЕЛ 4

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ДОСТОВЕРНОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

#### 4.1 Оценка достоверности математической модели процесса изнашивания плунжерных пар ТНВД.

Разработанная и изложенная в 2.2 математическая модель процесса изнашивания плунжерных пар может быть использована для решения прикладных задач, связанных с прогнозированием ресурса, обоснованием технических требований к чистоте дизельного топлива и др., только в том случае, если её основные положения найдут экспериментальное подтверждение.

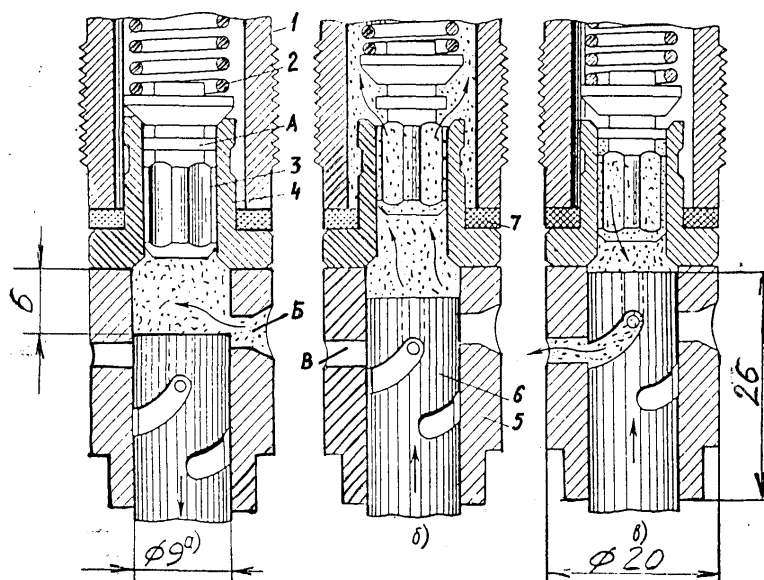


Рисунок 4.1 Конструкция и номинальные значения геометрических параметров плунжерной пары ТНВД: а - подача топлива в надплунжерное пространство; б - подача топлива в форсунку нагнетания; в - конец подачи топлива (отсечка); А - разгрузочный пояс; Б - впускное отверстие; В - отсечное отверстие; 1 - нажимной штуцер; 2 - пружина нагнетательного клапана; 3 - нагнетательный клапан; 4 - седло нагнетательного клапана; 5 - втулка плунжера; 6 - плунжер; 7 - прокладка.

При экспериментальных исследованиях процесса изнашивания прецизионных соединений топливной аппаратуры дизелей возникают ряд трудностей, которые заключаются в том, что практически не представляется возможность такие

исследования проводить на натуральных образцах, поскольку это связано со сложностью конструкции объекта исследования и большим количеством факторов, которые влияют на износ прецизионных соединений, в том числе плунжерных пар ТНВД, например, геометрия соединений, температура, загрязнение окружающей среды, топлива и т.д.

Поэтому промежуточным переходным звеном между натурой и математической моделью часто выступает физическая модель объекта.

Физическое моделирование содержит модельный лабораторный эксперимент, результаты которого в последующем переносят на природу.

В качестве исследуемого объекта выступает физическая модель. Физическая модель – это материальная функциональная модель, которая подобна оригиналу.

Конструкция и номинальные значения геометрических параметров оригинала, т.е. натурной плунжерной пары ТНВД, представлены на рис. 4.1.

Конструкция и геометрические параметры модели, которая применялась для лабораторных испытаний, представлены на рис. 3.3.

Полученные ранее выражения (3.11) и (3.6) позволяют получить масштабные коэффициенты для перерасчёта данных по скорости изнашивания и ресурсу, полученных в лабораторных условиях на модельных образцах (рис 3.3) на натурное трибосопряжение, т.е. плунжерную пару ТНВД. При этом учтено максимально возможное количество факторов, таких как: нагрузка, скорость скольжения, геометрические размеры трибосопряжений, структура сопряжённых материалов, смазывающая способность дизельного топлива и наличие в нём загрязнений, а также расход дизельного топлива через трибосопряжение.

Такая физическая модель даст возможность в лабораторных условиях исследовать влияние загрязнений, находящихся в дизельном топливе, на ресурс натуральных плунжерных пар. Полученные данные позволяют разработать и адаптировать к реальным условиям эксплуатации математическую модель изнашивания плунжерных пар топливного насоса высокого давления, которая является исходной для решения перечисленных ранее прикладных задач, включающих прогно-

зирование ресурса прецизионных соединений топливоподающей аппаратуры и обоснование технических требований к чистоте дизельного топлива.

Коэффициенты  $K_{\text{фн}}$  формы натурной плунжерной пары, геометрические размеры которой представлены на рис. 4.1, и модели  $K_{\text{фм}}$  (рис. 3.3), рассчитанные по формуле (3.4), имеют следующие численные значения:

$$K_{\text{фн}} = 90 \text{ м}^{-1}; \quad K_{\text{фм}} = 1,8 \text{ м}^{-1}$$

С учетом приведенных численных значений величин, входящих в формулу (3.4), получим коэффициент перерасчёта времени  $t_{\text{м}}$  испытания на износ модели ко времени  $t_{\text{н}}$  натуральных испытаний, за которое достигается величина износа, равная износу, полученному на модели:

$$K = 80,1, \quad \text{а} \quad t_{\text{н}} = 80,1 t_{\text{м}} \quad (4.1)$$

Скорость линейного изнашивания плунжерной пары ТНВД  $I_{\text{н}}$  связана со скоростью линейного изнашивания модельного трибосопряжения  $I_{\text{м}}$  формулами (3.9) и (3.11), и для рассматриваемой здесь схемы с приведенными выше численными значениями параметров представляются в виде:

$$I_{\text{н}} = 0,0892 \cdot I_{\text{м}}, \quad (4.2)$$

а величину линейного износа плунжерной пары при известном значении износа модельного соединения можно определить по формуле:

$$I_{\text{н}} = 0,0892 \cdot 80,1 \cdot I_{\text{м}} \quad (4.3)$$

Формулы (4.1), (4.2) и (4.3) служат для перерасчета времени и величины износа с модельного трибосопряжения на натурное (плунжерная пара ТНВД двигателя СМД-62).

Результаты ускоренных износных испытаний представлены в таблице 4.1.

Анализ данных износных испытаний модельных пар трения, приведенных в табл. 4.1, свидетельствует о существенном влиянии степени очистки дизельного топлива на величину линейного износа деталей испытываемых модельных пар трения. Как следует из графиков зависимости суммарного износа ( $I_{\text{м}}$ ) деталей модельной пары трения от времени ( $t$ ),  $I_{\text{м}} = f(t)$ , полученными по данным табл. 4.1 (рис. 4.2), скорость изнашивания со временем постепенно уменьшается. Уменьшение этой скорости объясняется наличием процесса приработки трущихся по-

верхностей. В течении первых трёх часов испытаний происходит упрочнение поверхностных слоёв за счёт пластических деформаций и формирования защитных поверхностных плёнок, которые являются продуктами реакции активных элементов, содержащихся в топливе, например, кислорода и серы, с материалом поверхности трения т.е. с железом.

Таблица 4.1

Результаты ускоренных износных испытаний модельных пар трения.

№ п/п	Использованное дизельное топливо	Вал, втулка	Среднеарифметическое значение износа, мкм, за время испытания, час							
			1	2	3	4	5	6	18	27
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	В состоянии поставки	Вал	5	9	12	20	22,5	24,5	24,6	46
		Втулка	4	7	9	15	16,5	18	33	35
		Суммарный износ	9	16	21	35	39	42,6	79	84
2	Очищенное серийным фильтром, тонкость фильтрации 20 мкм	Вал	4,5	7	10	13	17,5	20,5	40	44,5
		Втулка	3,5	5	7	9	12,5	14,5	29	32,5
		Суммарный износ	8	12	17	22	30	35	69	77
3	Очищенное электрофильтром, тонкость фильтрации 10 мкм	Вал	2	3	7	8,5	10	13	28,5	36,5
		Втулка	1	2	5	5,5	6,5	9	20,5	26,5
		Суммарный износ	3	5	12	14	16,5	22	49	63
4	Очищенное серийным фильтром, тонкость очистки 20 мкм, и электрофильтром, тонкость очистки 10 мкм	Вал	2	2,5	6,5	8,5	9,5	12	25	32,5
		Втулка	1	2	4,5	5,5	6,5	9	18	23,5
		Суммарный износ	3	4,5	11	14	16	21	43	56

Причём наличие участков приработки наблюдается для всех условий исследований. С повышением чистоты топлива участок приработки становится менее выраженным, а зависимость  $I_m = f(t)$  приближается к прямой. Кроме этого, анализируя приведенные на рис. 4.2 зависимости, можно однозначно утверждать, что степень чистоты дизельного топлива существенно влияет на износ трущихся

пар. Так например, величина износа трущихся пар № 1 (кривая 1), работающих на топливе в состоянии поставки, соответственно в 1,09; 1,33 и 1,5 раза превышает износ трущихся пар, работающих на топливе, очищенном серийным фильтром, электрофильтром и последовательной очисткой электрофильтром и серийным фильтром.

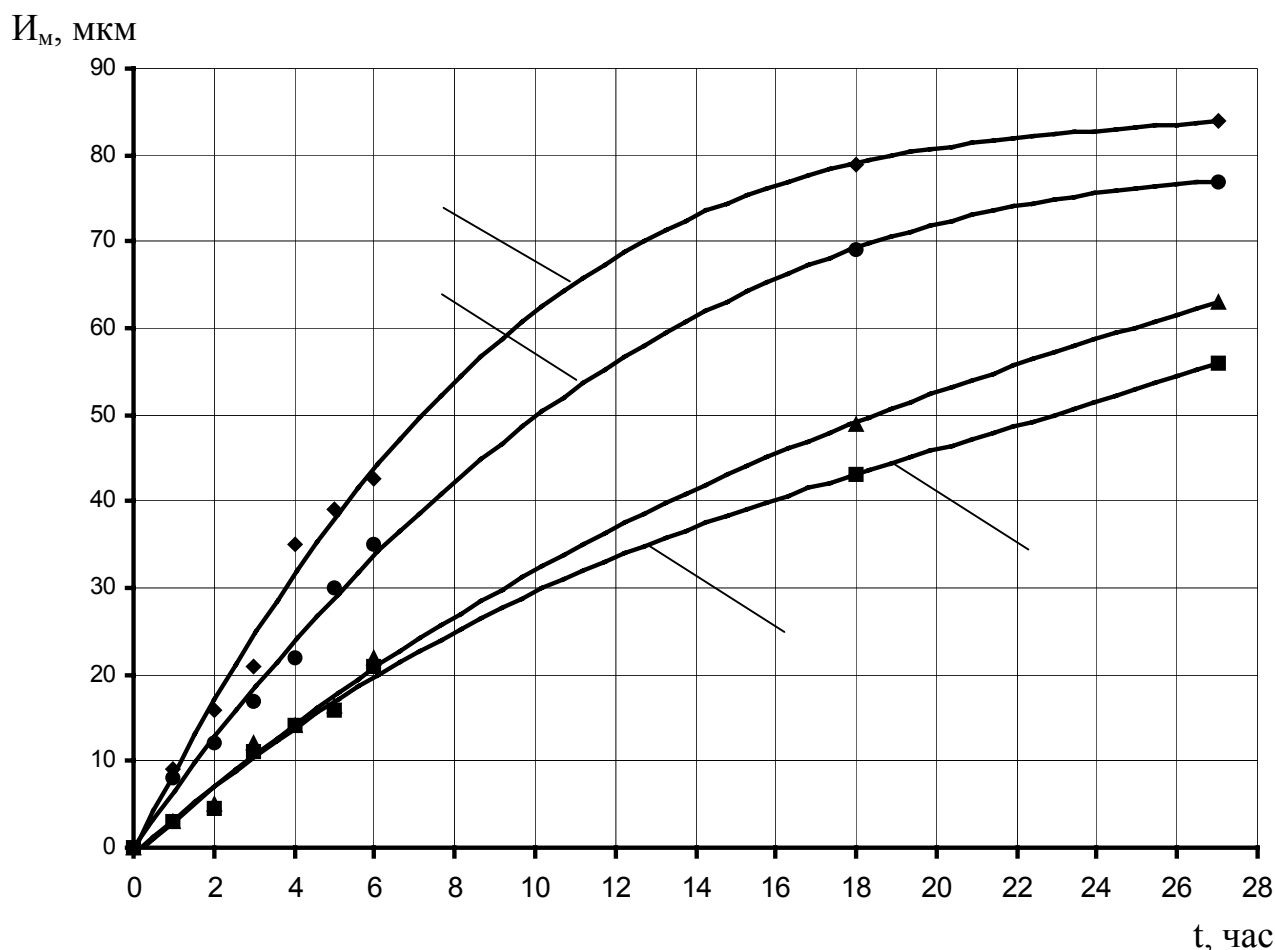


Рис. 4.2. Зависимость суммарного износа  $I_m$  деталей модельной пары трения от времени испытания  $t$ : 1 – топливо в состоянии поставки; 2 – топливо, очищенное серийным фильтром, тонкость фильтрации 20 мкм; 3 – топливо, очищенное электрофильтром, тонкость фильтрации 10 мкм; 4 – топливо, очищенное серийным фильтром, тонкость очистки 20 мкм и электрофильтром, тонкость очистки 10 мкм.

Приведенные данные позволяют сделать вывод о целесообразности введения в регламент технического обслуживания мобильной сельскохозяйственной техники операцию по подготовке дизельного топлива перед его заправкой, используя для этой цели электрофильтры.

Далее, используя модельные коэффициенты перерасчёта результатов ускоренных испытаний модельных трущихся пар (4.1) и (4.3), были получены аналогичные зависимости для натуральных образцов плунжерных пар ТНВД. При этом, представляя удвоенное значение суммарного износа, как зазор в плунжерной паре, и сопоставляя экспериментальные зависимости с расчётными (рис. 2.2), было установлено, что максимальное расхождение экспериментальных данных от расчётных не превышает 9,6 %. Этот факт является важным аргументом, подтверждающим **достоверность** разработанной математической модели процесса изнашивания прецизионных соединений топливоподающей аппаратуры и обоснованность методики ускоренных износных испытаний модельных трибосопряжений.

Для определения степени и характера влияния параметров (концентрация и дисперсный состав) чистоты дизельного топлива на процесс изнашивания прецизионных соединений топливоподающей аппаратуры были проведены ускоренные износные испытания образцов модельных пар трения результаты которых приведены в таблице 4.2.

Используя данные табл. 4.2. и пересчитав их с помощью формулы (4.2), получены аппроксимированные зависимости скорости изнашивания натурной пары трения, т.е. плунжерной пары, в зависимости от параметров чистоты дизельного топлива, рис 2.3.

Характерным для такого рода экспериментов является линейная зависимость скорости изнашивания от концентрации абразива в топливе. Эта линейная зависимость свидетельствует о том, что абразивные частицы не позволяют развиваться процессам приработки трущихся поверхностей, о которых отмечалось ранее. Защитные поверхностные плёнки не успевают образовываться, а износ из формы окислительного изнашивания переходит в форму изнашивания абразивного.

Как следует из графиков (рис. 2.3), самой опасной размерной группой частиц абразива является группа с размерами частиц до 6 мкм. Это можно объяснить следующим образом. Модельная пара трения «кольцо - кольцо» в отличие от натурной не имеет начального технологического зазора, и этот зазор не увеличива-

ется в процессе испытаний. Поэтому в зону трения наиболее активно подаются частицы малой размерной группы. Крупные частицы, попадающие в контакт, благодаря наличию фаски на поверхности неподвижного кольца сначала размалываются в контакте, а затем начинают вызывать усиленный износ.

Точка на оси ординат (рис. 2.3), из которой выходят прямые линии графика, соответствует величине скорости изнашивания  $I_m = 0,039$  мкм/час, являющейся средней скоростью, которая получается из графика (рис. 2.2), делением величины предельного износа на общее время испытаний. Эта скорость изнашивания является исходной, поскольку соответствует износу на эталонном (чистом) топливе.

Данные таблицы 4.2 с помощью модельных коэффициентов можно также представить в виде серии аппроксимированных зависимостей суммарного износа или зазора в плунжерной паре от времени эксплуатации при различной концентрации и различных размерах механических примесей в дизельном топливе (рис. 2.4). Графическая интерпретация результатов ускоренных износных испытаний модельных трибосоединений, представленных на рис. 2.3 и рис. 2.4, позволила впервые разработать методику обоснования технических требований, предъявляемых к параметрам чистоты (концентрация и гранулометрический состав) дизельного топлива, используемого для современной мобильной сельскохозяйственной техники.

На основе этой методики установлено, что для обеспечения нормируемого ресурса прецизионных соединений топливоподающей аппаратуры СМД – 62 в дизельном топливе не должны присутствовать механические примеси более 6 мкм, а концентрация не должна превышать 25 г/т.

Исходя из этого, следует, что совокупность конструкторских и эксплуатационных мероприятий, включающих серийную систему очистки, установленную на двигателе, предварительную очистку топлива перед заправкой, защиту от проникновения частиц технологической среды в топливо и др. с целью обеспечения функциональной стабильности мобильного сельскохозяйственного агрегата должны обеспечивать указанные требования.

Результаты исследований влияния параметров чистоты дизельного топлива на скорость изнашивания модельных трущихся пар.

№ п/п	Размер частиц механических примесей, мкм	Наименование деталей соединения	Скорость изнашивания модельной трущейся пары, мкм/час при различной концентрации механических примесей в дизельном топливе, г/т					
			25	50	75	100	125	150
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1...4	Вал	0,26	0,28	0,3	0,315	0,33	0,35
		Втулка	0,19	0,2	0,21	0,225	0,24	0,25
		Суммарная скорость	0,45	0,48	0,51	0,54	0,57	0,6
2	4...6	Вал	0,45	0,71	0,95	1,22	1,45	1,68
		Втулка	0,32	0,52	0,71	0,88	1,5	1,22
		Суммарная скорость	0,77	1,23	1,64	2,1	2,5	2,9
3	8...10	Вал	0,33	0,42	0,52	0,61	0,71	0,81
		Втулка	0,23	0,31	0,38	0,45	0,52	0,59
		Суммарная скорость	0,56	0,73	0,9	1,06	1,23	1,4
4	>15	Вал	0,2	0,29	0,36	0,44	0,52	0,6
		Втулка	0,15	0,21	0,26	0,32	0,38	0,44
		Суммарная скорость	0,35	0,5	0,62	0,76	0,9	1,04

Таким образом, экспериментальные исследования процесса изнашивания модельных трущихся соединений подтверждают **достоверность** математической модели процесса изнашивания плунжерных пар ТНВД двигателя СМД – 62. Максимальное расхождение экспериментальных данных от расчётных не превышает 9,6 %. Это даёт основание утверждать, что разработанные с помощью математической модели технические требования к чистоте дизельного топлива, используемого для мобильной сельскохозяйственной техники с установленными на ней двигателями СМД – 62, являются **обоснованными**.

На основании изложенного, целесообразно предусмотреть в инструкции по техническому обслуживанию мобильных сельскохозяйственных агрегатов операцию предварительной очистки дизельного топлива перед его заправкой очистите-

лями, обеспечивающими тонкость фильтрации не менее 4...6 мкм, массовую долю механических примесей не более 25 г/т и отсутствие нерастворённой воды.

#### **4.2. Оценка достоверности математической модели процесса очистки дизельного топлива силами электрического поля с рабочей поверхностью в виде кристаллов из диэлектрика.**

Анализ результатов математического моделирования, проведенного в третьем разделе, показал, что если в электрическое поле между двумя электродами поместить твердые тела с диэлектрической проницаемостью намного большей, чем у загрязнителя, то эти тела станут центрами осаждения загрязнений. Это дает значительное повышение коэффициента фильтрации электроочистки.

Экспериментальная проверка рабочей гипотезы, выдвинутой в третьем разделе, о возможности повышения эффективности использования неоднородного электрического поля для очистки дизельного топлива за счет размещения в межэлектродном пространстве диэлектриков осуществлялась путем исследования эффективности осаждения механических примесей на наполнителях с различной диэлектрической проницаемостью.

Результаты этих исследований представлены на фотографиях, отражающих процесс осаждения механических примесей на кристаллах с различной диэлектрической проницаемостью, расположенных в межэлектродном пространстве, заполненном дизельным топливом и приложенным напряжением.

Для анализа характера осаждения частиц механических примесей на рис. 4.3. представлен внешний вид кристаллов наполнителя в межэлектродном пространстве.

На рис. 4.4 зафиксирован процесс осаждения механических примесей на кристаллы наполнителя в дизельном топливе с момента включения источника питания и приложения электрического поля к электродам (рис.4.4, а) до завершения процесса осаждения механических частиц (рис.4.4, г).

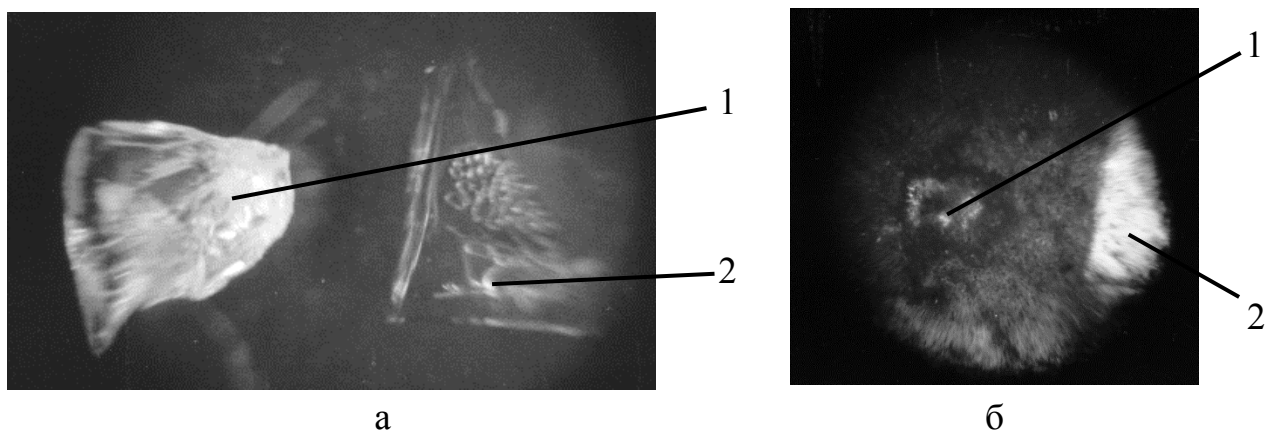


Рисунок 4.3 Внешний вид кристаллов наполнителя в межэлектродном пространстве, заполненном дизельным топливом: а - чистое дизельное топливо; б - дизельное топливо после введения загрязнителя (древесный уголь, размер частиц 1...20 мкм); 1 - кристалл титанита стронция; 2 - кристалл кварцевого стекла.

Как следует из фотографий (рис. 4.3) загрязнитель равномерно распределился между зернами кристаллов. На рис. 4.4, а зафиксирован момент выстраивания частиц механических примесей по силовым линиям электрического поля и их движение, в том числе вихреобразное, в зоне острых кромок кристалла титанита стронция. В дальнейшем на шестой секунде после включения источника питания (рис. 4.4 б), наблюдается рост агрегатов механических примесей, а также отрыв агрегатированных частиц от электродов и перенос их на кристалл, главным образом из сегнетоэлектрика (титанита стронция). После десятой секунды включения источника питания (рис. 4.4 в и рис. 4.4 г) процесс осаждения частиц механических примесей практически стабилизируется. Все механические примеси в виде иглообразных агрегатов с поверхности электродов переносятся на поверхность кристалла сегнетоэлектрика и образуют подобие «ежа». «Иглы», образованные меж примесями, располагаются по нормали к поверхности сегнетоэлектрика. Снятие напряжения питания приводит лишь к частичному освобождению кристалла сегнетоэлектрика от примесей.

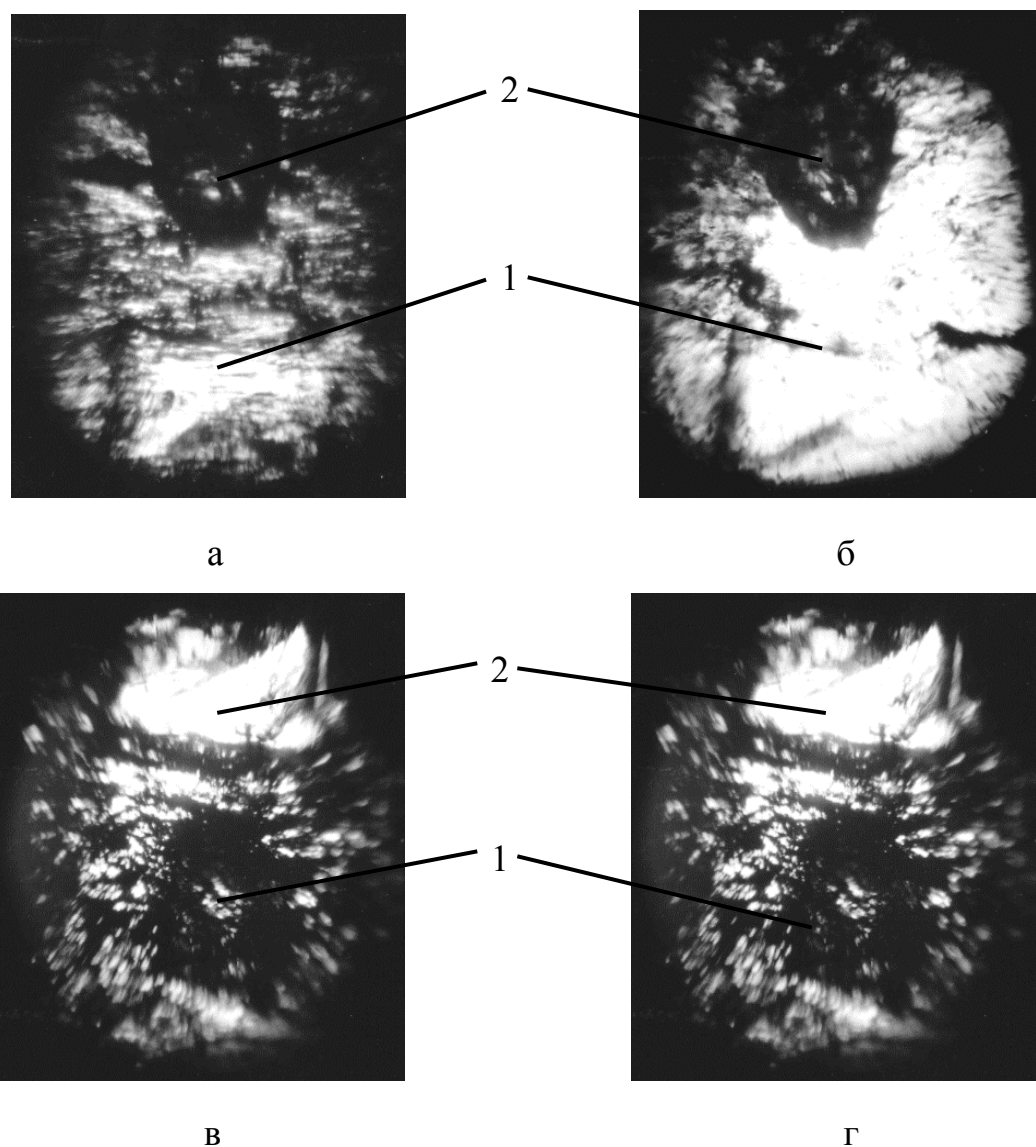


Рисунок 4.4 Процесс осаждения механических примесей на кристаллы наполнителя: а – расположение частиц механических примесей в момент приложения напряжения к электродам; б, в и г - расположение частиц механических примесей через 6, 10 и 20 секунд; 1 - кристалл титаната стронция; 2 - кристалл кварцевого стекла.

На кристалл кварцевого стекла примесей осаждается на несколько порядков меньше, чем на кристалл титаната стронция.

Проведённые лабораторные исследования позволили сделать вывод о том, что выдвинутая в третьем разделе данной работы гипотеза подтверждается: т.е. наполнитель из материала с высокой диэлектрической проницаемостью вызывает усиление осаждения механических примесей в поле разноимённо заряженных электродов, при этом зёрна диэлектриков с малой диэлектрической проницаемо-

стью данного эффекта не вызывают. Одновременно следует учесть, что острые углы и кромки кристаллов сегнетоэлектрика приводят к возникновению вихрей в очищаемой жидкости за счёт больших градиентов напряжённости электрического поля. Таким образом, полученные результаты качественно подтверждают достоверность разработанной математической модели процесса осаждения механических примесей в дизельном топливе силами электрического поля.

### 4.3 Результаты лабораторных испытаний макетного образца электрофилтра

Целью данных исследований явилась количественная оценка эффективности процесса очистки дизельного топлива с помощью макета ячейки электрофилтра.

Результаты экспериментов приведены в таблице 4.3.

Таблица 4.3

Результаты испытания макетного образца электрофилтра

Условия эксперимента		Количество и размер частиц механических примесей, мкм					
		5-10	10-25	25-50	50-100	100-200	>200
Количество частиц в исходном топливе		4221	1920	120	49	24	29
1. Электрофилтр без наполнителя, 7 кВ (АС СССР 1472097)	N	3883	1728	99,6	36,8	10,8	9,28
	K <sub>ф</sub>	0,08	0,10	0,17	0,25	0,55	0,68
2. Электрофилтр с сегнетоэлектриком (наполнителем), 7 кВ	N	2533	1594	106,8	40,2	9,8	0,6
	K <sub>ф</sub>	0,40	0,17	0,11	0,18	0,59	0,67
3. Электрофилтр с наполнителем и стабилизатором потока на входе, 7 кВ	N	2153	1267	94,8	34,3	8,4	7
	K <sub>ф</sub>	0,49	0,34	0,21	0,30	0,65	0,76
4. Электрофилтр с наполнителем и механическим фильтром на выходе, 7 кВ	N	2153	1267	77	27	3	1
	K <sub>ф</sub>	0,49	0,34	0,36	0,54	0,87	0,96
5. Электрофилтр с наполнителем, механическим фильтром и напряжением до 14 кВ	N	1519	557	31	8	3	1
	K <sub>ф</sub>	0,64	0,71	0,74	0,83	0,89	0,96

По данным табл. 4.3 получены графики изменения коэффициента фильтрации в зависимости от размера мехпримесей и условий эксперимента (рис. 4.5).

В первом случае (кривая 1) осаждение мехпримесей осуществляется на поверхности четырёх коаксиальных электродах, между которыми прикладывалось напряжение 7 кВ. Коэффициент фильтрации составлял 0,08 для примесей ( $d = 5 \dots 10$  мкм) и 0,68 для  $d > 200$  мкм. Такие невысокие характеристики фильтра обусловлены, во-первых, малым числом электродов; во-вторых, большим диаметром проходных отверстий; в-третьих – большим радиусом коаксиальных электродов, что не создаёт ощутимых преимуществ использования нелинейных электрических полей.

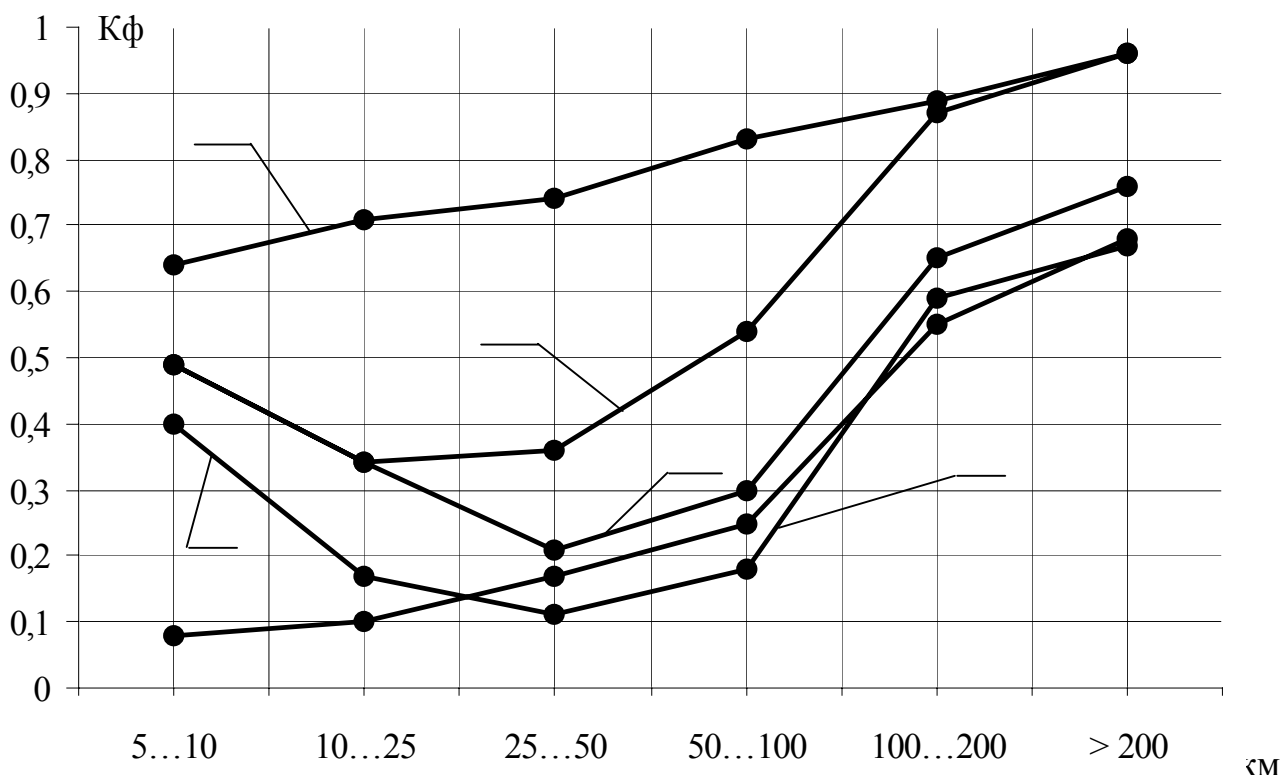


Рисунок 4.5 Зависимость коэффициента фильтрации опытного образца электрофильтра ( $K_{\phi}$ ) от размера примесей и условий эксперимента.

Во втором случае (кривая 2) после установки перед четвёртым внутренним электродом сепаратора с зёрнами из сегнетоэлектрика произошло существенное повышение коэффициента фильтрации в области малых частиц, в тоже время снизился коэффициент фильтрации в области частиц среднего размера, что объясняется активным агрегатированием примесей в области зёрен сегнетоэлектриков и

образованием большого числа частиц среднего размера, которые не все удерживаются на зёрнах, сепараторе и на четвёртом электроде, тем более, что после него находится непосредственно выход из фильтра. Удержание частиц на электродах было существенно затруднено турбулентными потоками, создаваемыми входным патрубком, направляющим струю жидкости с большой скоростью на первый электрод. Для создания ламинарного потока жидкости на входной патрубке с внутренней стороны был установлен входной маточник в виде перфорированного щитка кольцевой формы. Подбор формы, конструкции и размеров маточника позволил существенно поднять коэффициент фильтрации в области средних размеров частиц (10...25 мкм), что видно на графике (кривая 3). Так как сепаратор был установлен в области достаточно больших скоростей жидкости – фактически в центре фильтра, и за сепаратором находился всего один электрод, то для удержания образовавшихся агрегатов примесей, а также глобул воды, выделенных из топлива на центральном выпускном патрубке, был собран двухступенчатый механический фильтр. Первая ступень - перфорирующий цилиндр с намоткой ленты из стекловолокна - гидрофильного материала, а вторая ступень – перфорированный цилиндр с намоткой из двух слоёв провода МГТФ – 0,15 в тефлоновой изоляции – гидрофобный слой. Это выполнялось с целью укрупнения глобул воды на первом гидрофильном слое и удержания на втором гидрофобном. Расстояние между слоями обеспечивалось порядка 8 мм для сбора и обеспечения возможности удаления воды и примесей под действием силы тяжести на нижнюю часть фильтра. Обслуживание данного механического фильтра сводится к замене стеклотканевой ленты и перемотки провода с тефлоновой изоляцией с его промывкой. Установка данного механического фильтра позволила поднять коэффициент фильтрации в области частиц с размером более 50 мкм (кривая 4), т.е. удерживать значительную часть образовавшихся в поле зёрен сегнетоэлектрика агрегатов примесей.

Увеличение напряжённости электрического поля из-за повышения в два раза напряжения на выходе высоковольтного источника (кривая 5) привело к увеличению коэффициента фильтрации в области средних частиц практически вдвое,

что соответствует теоретическим расчётам. Таким образом, совокупность предложенных решений привела к увеличению коэффициента фильтрации в пределах 0,64...0,96.

На основании проведенных испытаний опытного образца электрического фильтра с наполнителем из сегнетоэлектрика можно сделать следующие выводы:

- Размещение зерен сегнетоэлектриков с высоким значением диэлектрической проницаемости в поле смежных электродов приводит к существенному увеличению осаждения частиц большого и среднего размера загрязнителя за счет агрегатирования частиц маленького размера, находящихся в дизельном топливе.

- Характер осаждения примесей таков, что в зоне размещения зерен сегнетоэлектрика примеси осаждаются на зерно, а не на поверхность электродов.

- Для существенного повышения коэффициента фильтрации в области средних частиц загрязнения необходимо последовательное размещение наполнителя с зернами сегнетоэлектрика между коаксиальными электродами фильтра.

- Для повышения коэффициента фильтрации в области крупных частиц и защиты от прорыва частиц из-за кратковременного снижения напряжения на электродах необходима установка механического фильтра грубой очистки на выходе из фильтра.

#### **4.4 Выводы и практические рекомендации по четвертому разделу**

1. Проведенными экспериментальными исследованиями подтверждена достоверность математической модели процесса изнашивания прецизионных соединений топливоподающей аппаратуры. Максимальное расхождение экспериментальных данных с расчетными не превышает 9,6%. Это позволяет утверждать, что разработанные технические требования к чистоте дизельного топлива, используемого для мобильной сельскохозяйственной техники с установленными на ней двигателями СМД – 62, являются обоснованными и составляют не более 25 г/т по массе 4...6 мкм по размерам механических примесей и полное отсутствие нерастворённой воды.

2. Рекомендовано предусматривать в инструкции по техническому обслуживанию мобильных сельскохозяйственных агрегатов операцию предвари-

тельной очистки дизельного топлива перед его заправкой очистителями, обеспечивающими технические требования к его чистоте. Это позволит обеспечить ресурс ТНВД в пределах 3000 моточасов и увеличить сроки замены серийных фильтров тонкой очистки.

3. Экспериментальными исследованиями качественно подтверждены основные положения математической модели процесса осаждения механических примесей, находящихся в дизельном топливе, силами электрического поля с диэлектрическим наполнителем. Так например, подтверждено, что основными факторами, влияющими на эффективность осаждения механических примесей, являются диэлектрическая характеристика наполнителя  $\epsilon_1$ , напряжение на электродах  $U$  и скорость потока жидкости  $V$ .

4. Исходя из установленных основных закономерностей процесса очистки дизельного топлива силами электрического поля с диэлектрическим наполнителем позволили разработать принципиально новую конструкцию и создать опытные образцы электрических фильтров и установок для предварительной очистки дизельного топлива с функциональными характеристиками, близкими к разработанным техническим требованиям к чистоте дизельного топлива. Опытный образец электрического фильтра при лабораторных исследованиях позволил получить коэффициент фильтрации для частиц размером менее 5 мкм не менее 0,64. Указанные характеристики электрофильтра позволяют обеспечить массовую долю механических примесей размером менее 5 мкм в подготовленном к заправке дизельном топливе не более 26,2 г/т при допустимой норме 25 г/т.

5. Анализ полученных закономерностей позволил выдвинуть гипотезу о возможности существенного повышения эффективности электроочистителей за счёт использования в качестве наполнителя материалов с высокими значениями диэлектрической проницаемости. В качестве таких материалов могут быть использованы титанат бария или титанат стронция, диэлектрическая проницаемость которых составляет 1200...2000 единиц (диэлектрическая проницаемость широко известных диэлектриков находится в пределах 2...32 единиц).

6. используя полученные закономерности процесса очистки дизельного

топлива силами электрического поля и выдвинутую научную гипотезу повышения его эффективности, разработана принципиально новая конструкция и созданы опытные образцы электрических фильтров и установок для предварительной очистки дизельного топлива с функциональными характеристиками, близкими к разработанным ТУ на чистоту дизельного топлива. В частности, лабораторные испытания опытных образцов электрофильтров подтвердили способность их обеспечить тонкость фильтрации не более 10 мкм. Для частиц размером менее 5 мкм коэффициент фильтрации составляет не менее 0,64, а для нерастворённой воды независимо от размеров капель коэффициент фильтрации равен единице. Это позволяет обеспечить полное удаление воды из дизельного топлива и уменьшить количество частиц загрязнения от 10 до 78 раз для размеров 2...8 мкм и полном осаждении частиц более 8 мкм, что составляет 26,2 г/т по массе при допустимой норме 25 г/т. Полученные характеристики электрофильтра значительно превосходят показатели известных аналогов.

Конструкция электрофильтра защищена патентом (UA 37109A) на его устройство и способ регенерации.

## РАЗДЕЛ 5

### ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ ПРОВЕРКА И ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

#### 5.1 Результаты стендовых испытаний эффективности разработанного электрического фильтра с диэлектрическим наполнителем

Эффективность разработанного электрофильтра с диэлектрическим наполнителем проверялась через стендовые испытания согласно ГОСТ 14146-88, который распространяется на фильтры тонкой очистки топлива и их фильтрующие элементы, устанавливаемые в топливных системах низкого давления дизелей и предназначенные для окончательной очистки топлива [29].

Схема стенда представлена на рис. 3.23.

Средой для испытания служило дизельное топливо по ДСТУ 3868-99. В качестве примеси (искусственного загрязнителя) применяли кварцевую пыль.

Концентрацию загрязнителя в топливе определяли с помощью прибора ПЭАЖ-1 по методике (см. разд. 3).

Результаты анализа мембранных фильтров №5 на топливах, взятых до и после электрического фильтра, позволили определить полноту отсева, среднее значение которой составило  $\varphi = 97 \%$ . Согласно ГОСТ 14146-88 полнота отсева для фильтров, устанавливаемых на автотракторных дизелях, должна быть в пределах 80...85 %.

Анализ проб, взятых до фильтра и после фильтра, позволил установить тонкость и коэффициент полноты отсева электрофильтром. Результаты анализа представлены в табл. 5.1 и на рис. 5.1.

Таблица 5.1

## Результаты стендовых испытаний электрического фильтра

Количество частиц в пробе топлива в объеме 10 мл	Размерная группа загрязнителя, мкм.				
	2 – 4	4 – 6	6 – 8	8 - 10	10 - 12 и более
1. Перед электроочистителем	4300	1820	470	180	70
2. После электроочистителя	419	92	6	-	-
3. Коэффициент полноты отсева $\varphi = (1 - x_2 / x_1) \times 100\%$	90	95	99	100	100

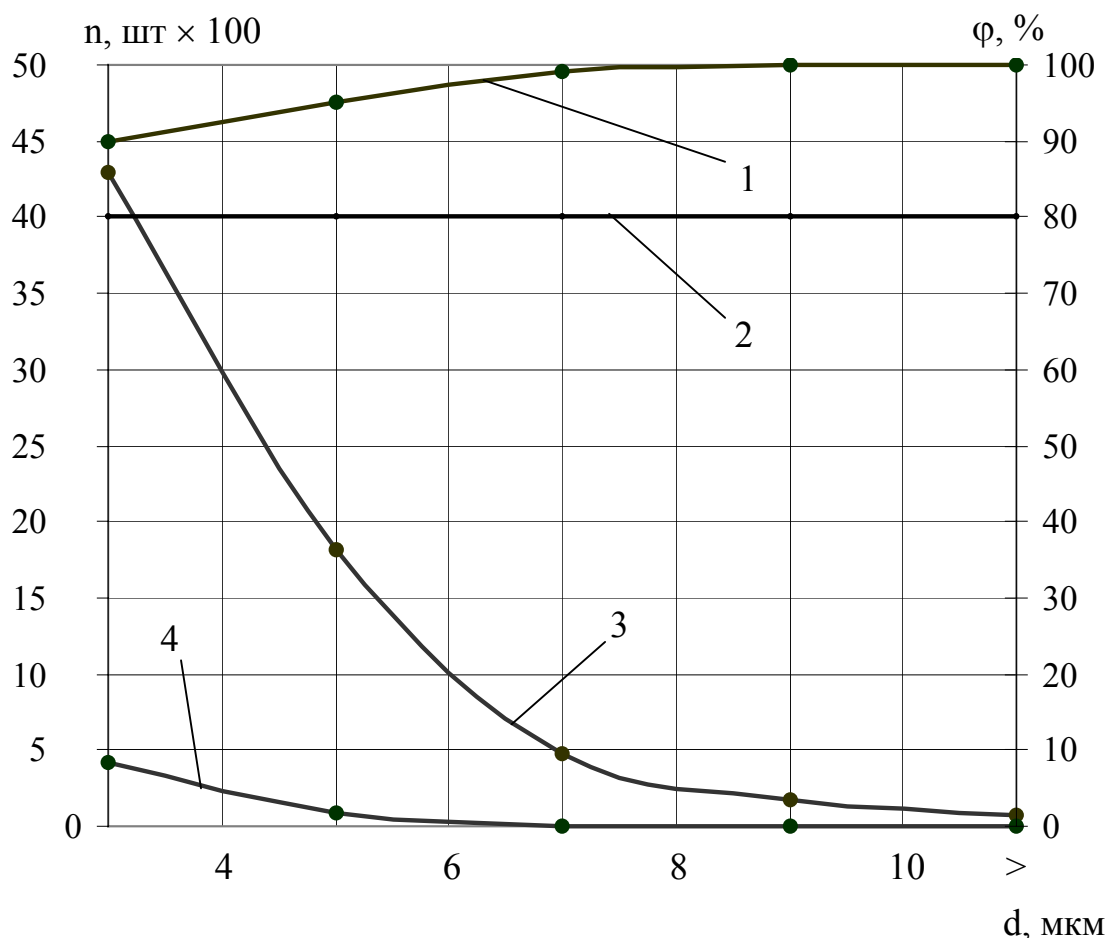


Рисунок 5.1 Характеристика функционирования электроочистителя: 1 – коэффициент отсева механических примесей в зависимости от их размера; 2 – нормируемые значения коэффициента отсева механических примесей серийного фильтра тонкой очистки ГОСТ 14146-88; 3 и 4 – характеристики дисперсного отсева механических примесей на выходе и входе диэлектрического фильтра, соответственно.

Анализ результатов, представленных в табл. 5.1 и рис. 5.1, позволяет оценить эффективность работы электрофильтра.

В дизельном топливе полностью отсутствуют частицы более 8 мкм. Количество частиц размерной группы 6...8 мкм уменьшилось в 78 раз, размерной группы 4...6 мкм - в 19 раз; и размерной группы 2...4 мкм - в 10 раз.

Приведенные данные свидетельствуют об эффективном функционировании электрического фильтра при удалении механических примесей из дизельного топлива.

Полнота отделения воды оценивалась на том же стенде (рис. 3.23) и рассчитывали по формуле (3.30). Результаты испытаний предоставлены в табл. 5.2.

Результаты испытаний и последующий расчёт коэффициента  $\varphi$  полноты отделения воды показали, что вся вода, находящаяся в топливе, отделяется электрическим фильтром ( $\varphi = 0,99...1,00$ ).

Таблица 5.2

Результаты стендовых испытаний электрического фильтра на эффективность отделения воды

Количество проб топлива	Объём воды в топливе, см <sup>3</sup>	Объём отстоя в фильтре, см <sup>3</sup>	Коэффициент полноты отделения воды, $\varphi$
Проба № 1	100	99	0,99
Проба № 2	100	100	1,00
Проба № 3	100	100	1,00

Эффективность очистки топлива от воды с помощью электрофильтра дополнительно оценивали тестом на окраску при добавлении в него кристаллов марганцевокислого калия [124]. Тест на окраску показал полное отсутствие воды в топливе, которое находилось в баке 10.

Проведенные стендовые испытания подтверждают эффективность применения разработанного электрического фильтра для очистки дизельного топлива от механических примесей и воды.

Так, количество механических частиц загрязнителя уменьшается от 10 до

78 раз для размерных групп 2...8 мкм, полным исключением частиц размером более 8 мкм и полным отделением воды из дизельного топлива.

## **5.2 Результаты эксплуатационной проверки эффективности применения предварительной очистки дизельного топлива на мобильной сельскохозяйственной технике**

Эксплуатационные испытания мобильных сельскохозяйственных агрегатов имели целью оценить стабильность функциональных характеристик топливоподающей аппаратуры дизелей и машинотракторных агрегатов в целом с применением и без применения очистки дизельного топлива при заправке в топливные баки. Очистка топлива производилась с помощью разработанного электрического фильтра (раздел 3).

В испытаниях принимали участие 9 мобильных сельскохозяйственных комплексов, на которых был установлен один и тот же тип базового двигателя СМД – 62 с серийным фильтром тонкой очистки 2ТФ – 3.

Измерение начального перепада давления на новых фильтрах, до их установки на двигатель, позволило установить их среднюю величину  $\Delta P = 3,5$  кПа, что отражено на рис. 5.2.

Результаты испытаний представлены на рис. 5.2 семейством кривых, из анализа которых следует:

- при использовании топлива в состоянии поставки (заправка проводилась из топливозаправщика в полевых условиях) после наработки 750 моточасов перепад давления составлял 30 кПа, (рис. 5.2, кривая 1). Предельным перепадом является  $\Delta P = 35$  кПа. При достижении такого перепада двигатель трудно запускается и не развивает мощность. На основании полученных данных можно утверждать, что при использовании дизельного топлива в состоянии поставки ресурс фильтров тонкой очистки составит 915...920 моточасов.

По техническим условиям и стандартам на фильтры такого типа ресурс должен быть не менее 1000 моточасов.

- при использовании топлива с предварительным отстаиванием и фильтрацией через бумажные фильтры (заправка через раздаточную колонку) перепад давления, равный 35 кПа, был достигнут после наработки 1500 моточасов (рис. 5.2, кривая 2);

- кривая 3 на рис. 5.2 соответствует применению системы предварительной очистки топлива с помощью разработанного электростатического фильтра. Топливо использовалось в состоянии поставки и перед заправкой в баки прокачивалось через разработанный электростатический фильтр. При использовании такой системы подготовки дизельного топлива, перепад давления, равный 35 кПа, был достигнут при наработке 3000 моточасов.

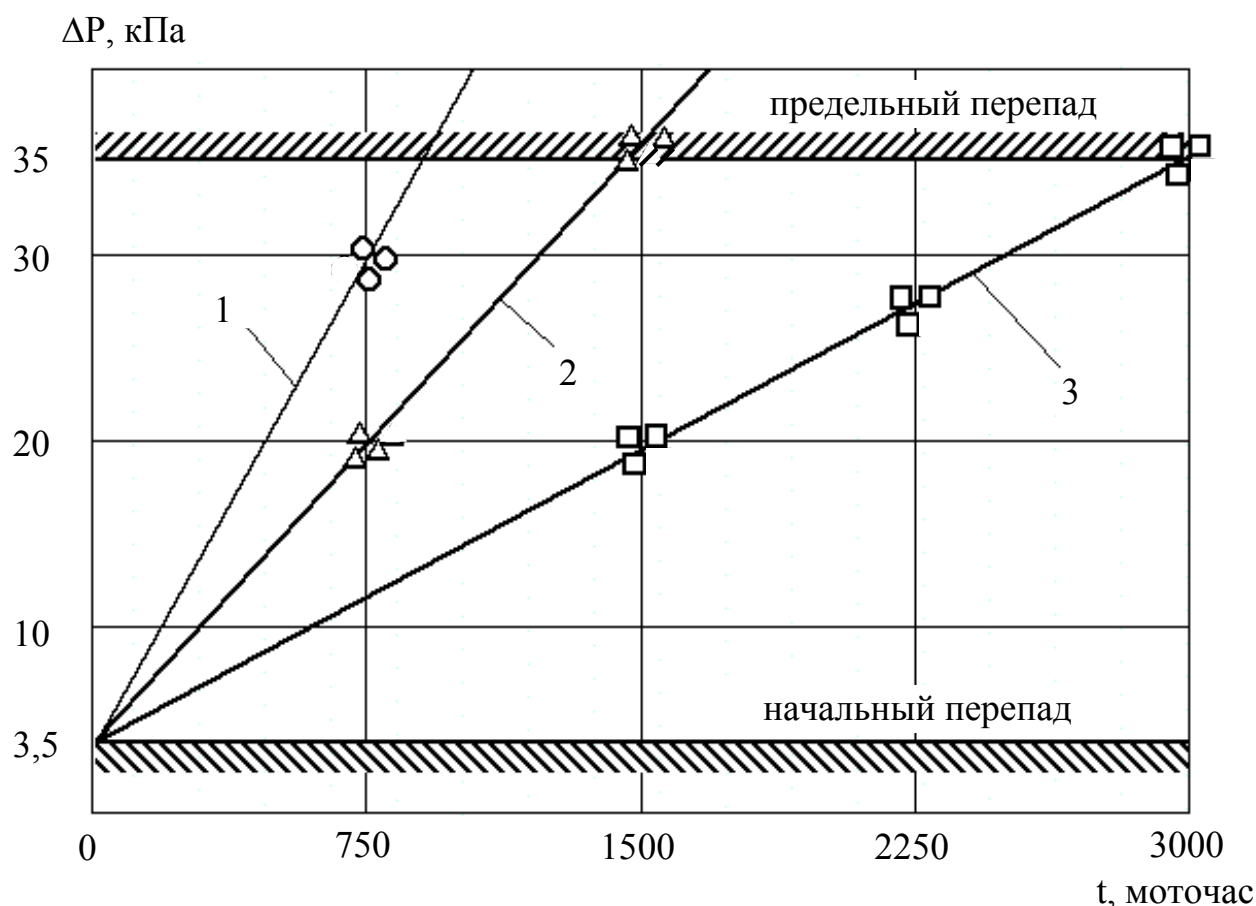


Рисунок 5.2 Зависимость перепада давления на серийных фильтрах тонкой очистки от времени эксплуатации: 1 – при использовании топлива в состоянии поставки; 2 – при использовании топлива с предварительным отстаиванием и фильтрацией бумажным фильтром; 3 – при использовании топлива, очищенного электрическим фильтром перед заправкой его в бак.

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что применение разработанного электрического фильтра для очистки и обезвоживания дизельного топлива перед заправкой в баки сельскохозяйственной техники позволит увеличить ресурс серийных фильтров тонкой очистки с 917 моточасов до 3000 моточасов, что в 3 раза больше требований ТУ и в 3,27 раза превышает ресурс фильтров, работающих на неочищенном топливе. Это позволит повысить надёжность и эффективность мобильной сельскохозяйственной техники при выполнении полевых работ, поскольку частота замены фильтра значительно уменьшается.

Одновременно с эксплуатационными испытаниями фильтров тонкой очистки испытания проходили 9 топливных насосов высокого давления 221.1111.004 – 40, устанавливаемых на двигателях СМД – 62.

Перед установкой на двигатели все ТНВД проходили испытания и регулировку на стенде «Моторпал» Нц – 108. Начальные параметры насосов соответствовали ТУ на изделия и представлены в приложении Д.5.

Неравномерность подачи между штуцерами ТНВД определяли по формуле

$$\delta = \frac{2(V_{\max} - V_{\min})}{V_{\max} + V_{\min}} \cdot 100\%, \quad (5.1)$$

где  $V_{\max}$  – наибольшее количество топлива в мерном сосуде от одной форсунки, см<sup>3</sup>;

$V_{\min}$  – наименьшее количество топлива в мерном сосуде от одной форсунки, см<sup>3</sup>.

Стенд «Моторпал» Нц – 108 был укомплектован эталонными форсунками одной группы и отвечал требованиям системы контрольных образцов ТУ 1023.001 – 89.

Все топливные насосы с периодичностью наработки 750 моточасов снимались с двигателей и устанавливались на стенд для измерения параметров, указанных в приложении Д.5.

Параметры топливных насосов, эксплуатируемых на топливе в состоянии поставки (вариант III), представлены в приложении Д.5, эксплуатируемых на топливе с предварительным отстаиванием и фильтрацией через бумажные фильтры

(вариант II), представлены в приложении Д.5, эксплуатируемые на топливе в состоянии поставки с применением электроочистки (вариант I) представлены в приложении Д.5.

Анализ полученной информации, свидетельствует о том, что степень чистоты дизельного топлива существенно влияет на износ соединений и функциональные характеристики топливной аппаратуры, динамика, изменения которых в зависимости от наработки в конечном итоге не может не отражаться на показателях эффективности использования мобильного сельскохозяйственного машинно-тракторного агрегата в целом.

Некоторые количественные характеристики этих показателей можно получить при анализе результатов теплового расчета двигателя, в котором использованы данные эксплуатационных исследований приведенных в табл. 5.4...5.6. Пример теплового расчета двигателя СМД-62 и сводная таблица результатов этого расчета для различных наработок топливной аппаратуры приведены в Приложениях Д 2 и Д 3.

По данным указанного расчета получены зависимости  $g_e$ ,  $N_e$ ,  $g_e/N_e = f(t)$  для различных вариантов очистки дизельного топлива (рис. 5.3, рис. 5.4). Здесь  $g_e$  – удельный расход топлива, кг/(кВт·ч);  $N_e$  – эффективная мощность, кВт;  $g_e/N_e$  – приведенный удельный расход топлива, кг/(кВт<sup>2</sup>·ч);  $t$  - наработка, ч.

Анализ зависимостей приведенных на рис.5.3 и рис.5.4 позволяет сделать следующие выводы:

- при эксплуатации мобильных сельскохозяйственных комплексов на топливе в состоянии поставки (т.е. без предварительной очистки) номинальная подача и удельный расход топлива с увеличением наработки (моточасов) уменьшается. так, через 750 моточасов на 15,4% и 1,5% через 1500 моточасов на 27,2% и 2,2%, через 2250 моточасов на 38% и 2,3% соответственно. Из-за этого с увеличением наработки происходит снижение эффективной мощности двигателя на 14,2%, 25,7%, 36,7% соответственно;

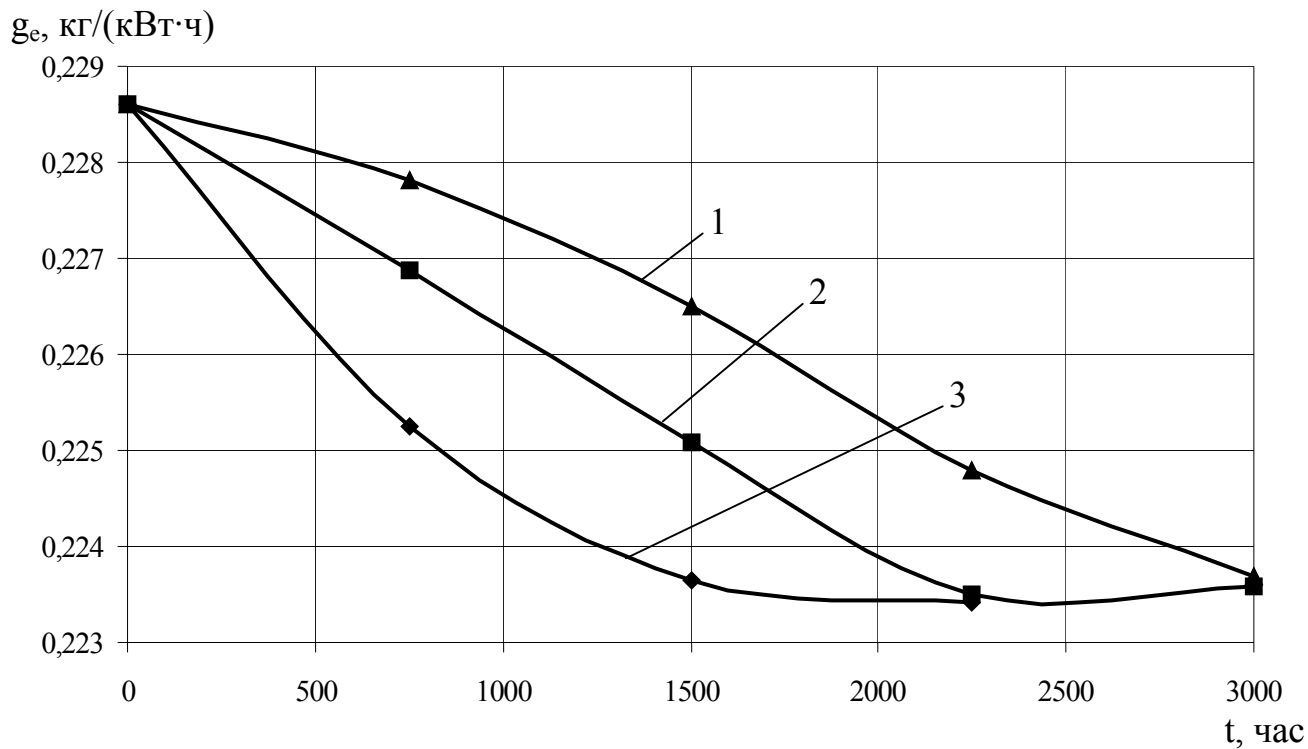


Рисунок 5.3 Зависимости  $g_e = f(t)$  при различных вариантах очистки дизельного топлива: 1 – очистка электрофильтром; 2 – отстоянное топливо; 3 – топливо в состоянии поставки.

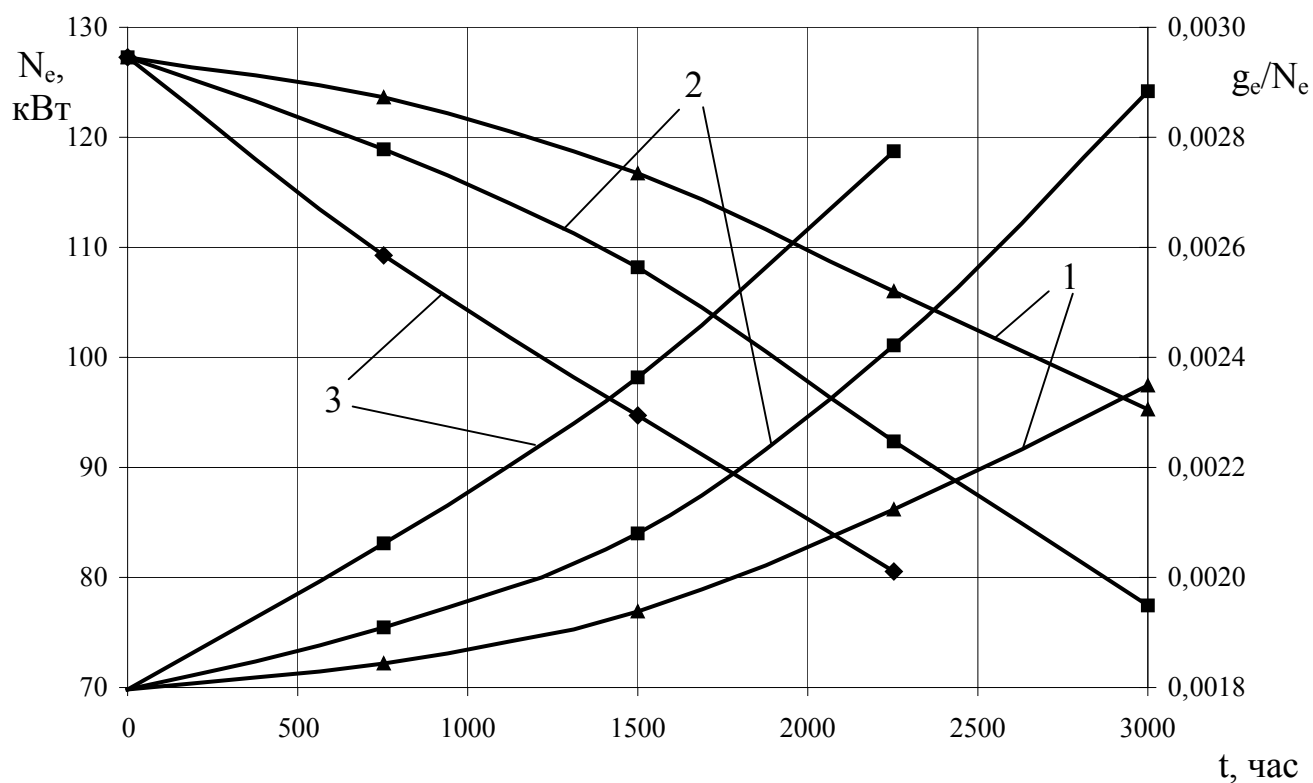


Рисунок 5.4 Зависимости  $N_e = f(t)$  и  $g_e/N_e = f(t)$  при различных вариантах очистки дизельного топлива: 1 – очистка электрофильтром; 2 – отстоянное топливо; 3 – топливо в состоянии поставки.

- снижение эффективной мощности двигателя не может не сказаться на тяговых характеристиках МТА в целом. Численные значения  $N_{кр}'$ ,  $P_{кр}'$  и  $[R_a]$  МТА с трактором Т-150К на пахоте соответствующие полученным значениям эффективной мощности  $N_e'$  двигателя для различных вариантов использования дизельного топлива приведены в табл. 5.3.  $N_{кр}'$ ,  $P_{кр}'$  - текущие значения мощности и тягового усилия на крюке трактора,  $[R_a]$  – допустимое тяговое усилие плуга.

Таблица 5.3

Тяговые характеристики МТА с трактором Т-150К на пахоте.

№ П/П	Вариант I			Вариант II			Вариант III		
	Первая передача								
	$N_{кр}'$	$P_{кр}'$	$[R_a]$	$N_{кр}'$	$P_{кр}'$	$[R_a]$	$N_{кр}'$	$P_{кр}'$	$[R_a]$
1	94,1	43,7	39,3	94,1	43,7	39,3	94,1	43,7	39,3
2	89,6	41,6	37,4	87,8	40,0	36,0	80,6	38,5	34,7
3	84,2	37,0	33,3	79,7	35,0	31,5	69,0	29,5	26,6
4	77,9	34,0	30,6	68,1	29,2	26,3	60,0	26,0	23,4
5	69,9	30,0	27,0	57,3	24,6	22,1	-	-	-
	Вторая передача								
1	97,4	37,3	33,6	97,1	37,3	33,6	97,1	37,3	33,6
2	92,5	35,8	32,6	90,7	34,4	31,0	83,3	30,0	27,0
3	88,8	33,0	29,7	82,3	29,4	26,5	71,2	29,4	26,6
4	80,5	28,6	25,7	70,3	24,2	21,8	62,0	21,0	18,9
5	72,2	25,0	22,5	59,2	20,2	18,2	-	-	-

Комплектуя пахотный агрегат исходя из условий максимального использования тягового усилия трактора таким образом, чтобы соблюдалось условие  $R_{анл} \leq [R_a]$  был произведён расчёт фактической производительности и погектарного расхода топлива машино-тракторного агрегата на пахоте при работе его на различных передачах и различных вариантах использования дизельного топлива (табл. 5.4).

При этом использовались марки плугов ПЛН-4-35, ПЛН-5-35 и ПЛН-6-35. расчёт тягового усилия плуга осуществлялся при  $\Delta C = 5\%$ ,  $h = 0,3$  м,  $K_0 = 50$  кПа, значение уклона  $i = 0$ .

По данным табл. 5.4 получены графики зависимости производительности МТА и погектарного расхода топлива от наработки при различных варианта ис-

пользования топлива, рис 5.5.

Таблица 5.4

Технико-экономические показатели МТА  
(на базе трактора Т-150К) на пахоте.

№ п/п	Вариант I					Вариант II					Вариант III				
	Технико-экономические показатели пахотного агрегата														
	Пер.	$n_k$	$R_a$	$W$	$g_{га}$	Пер.	$n_k$	$R_a$	$W$	$g_{га}$	Пер.	$n_k$	$R_a$	$W$	$g_{га}$
1	II	6	32,6	2,43	8,71	II	6	32,6	2,43	8,71	II	6	32,6	2,43	8,71
2	II	5	28,3	2,31	8,76	II	5	28,3	2,27	9,07	II	4	22,8	2,07	9,05
3	II	5	28,3	2,24	8,96	II	4	22,8	2,05	9,03	II	4	22,7	1,78	8,96
4	I	5	28,2	1,95	8,99	I	4	22,6	1,70	8,97	II	4	22,6	1,51	10,51
5	I	4	22,7	1,75	8,95	I	4	22,5	1,35	11,3	-	-	-	-	-

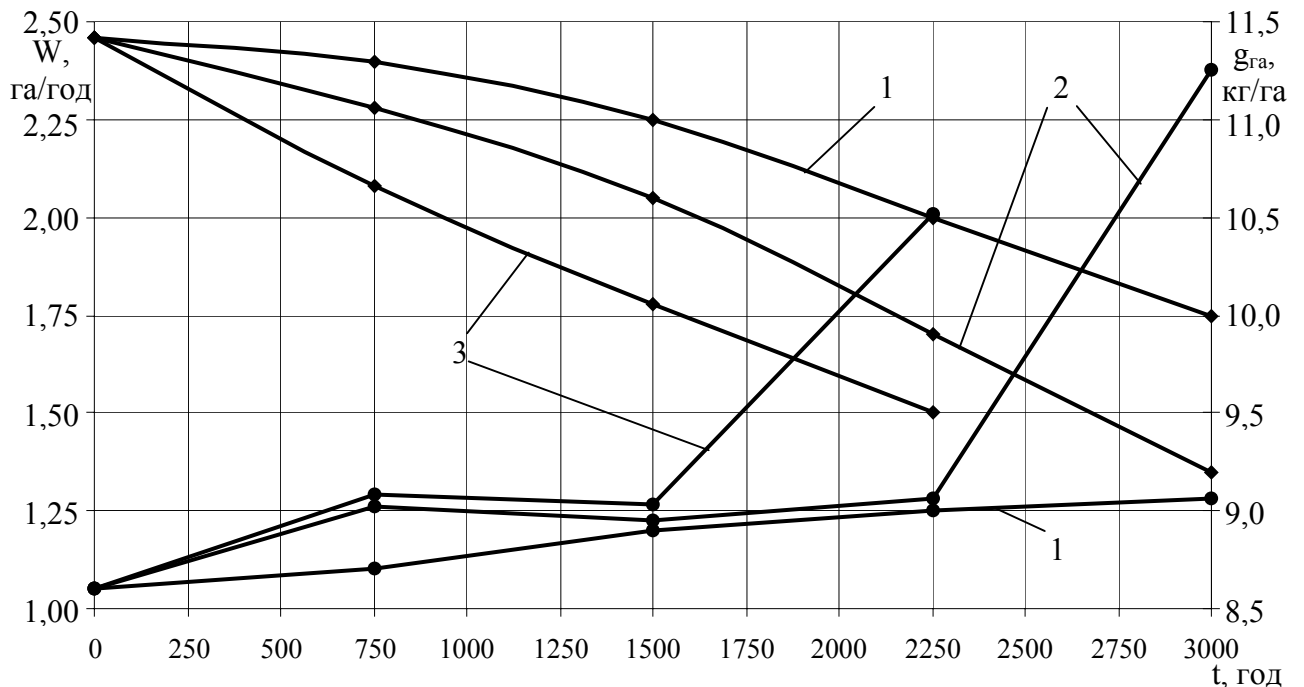


Рисунок 5.5. Зависимость производительности и погектарного расхода топлива от времени работы МТА на пахоте при различных вариантах очистки дизельного топлива: 1 – очистка топлива электрофильтром; 2 – отстоянное топливо; 3 – топливо в состоянии поставки.

Анализ зависимостей приведенных на рисунке 5.5, показал, что скорость уменьшения производительности МТА на вспашке при использовании топлива в состоянии поставки происходит в 1,92 раза (рис. 5.5 кривые 1 и 3) быстрее, а скорость увеличения погектарного расхода топлива в 6,5 раза медленнее по сравне-

нию с вариантом использования топлива с предварительной очисткой его электрофильтром.

- использование топлива с предварительным отстаиванием и фильтрацией его через бумажные фильтры, установленных на раздаточных колонках, позволяет снизить градиент изменения зависимостей функциональных параметров МТА от его наработки. Это обеспечивает без дополнительных капитальных вложений увеличение ресурса топливной аппаратуры, например ТНВД на более чем 700 моточасов.

- установлено, что среди испытанных вариантов самую высокую стабильность функциональных параметров МТА обеспечивает вариант предусматривающий предварительную очистку дизельного топлива вновь созданным электрофильтром. Так, снижение эффективной мощности двигателя происходит в 2 раза медленнее, а приведенный удельный расход топлива в 2 раза быстрее по сравнению с вариантом использования топлива в состоянии поставки.

Таким образом, полученные результаты подтверждают выдвинутую гипотезу о влиянии чистоты дизельного топлива на стабильность функциональных параметров мобильной сельскохозяйственной техники и позволяют утверждать целесообразность предварительной очистки дизельного топлива разработанным электрофильтром, поскольку предварительное отстаивание и фильтрация через бумажные фильтры, что практикуется в настоящее время, не позволяют полностью отделить механические примеси и воду от топлива.

### **5.3 Оценка влияния чистоты дизельного топлива на надежность мобильной сельскохозяйственной техники**

Целью данного исследования является подтверждение выдвинутой в разделе 1 научной гипотезы и определить численные показатели повышения надежности топливной системы за счет увеличения чистоты дизельного топлива.

Любой мобильный машинно-тракторный агрегат представляет собой систему состоящую из ряда подсистем. К таким подсистемам, выполняющим самостоятельные функции относится топливная система дизельного двигателя. Которая в свою очередь также может быть представлена, как система, состоящая из

более мелких подсистем.

Надежность машинно-тракторного агрегата зависит от надежности каждой из подсистем, а также от способа их соединения в общую систему. При последовательном соединении подсистем, как имеет место в данном случае, повышение надежности любой элементарной подсистемы пропорционально повышает надежность всей системы в целом.

Воспользовавшись известными подходами изложенными в разделе 2.3 была произведена сравнительная оценка коэффициентов готовности  $K_r$ , как комплексного показателя надежности, топливной системы дизельного двигателя СМД-62 при использовании топлива с различной степенью его очистки.

Для определения численного значения коэффициента готовности  $K_r$ , использовалась формула (2.27). при этом приближенный расчет интенсивности событий  $\lambda_{ij}$  и  $\mu_{io}$  характеризующих состояние системы базировался на экспертных оценках специалистов по обслуживанию и ремонту топливной аппаратуры, значения времени технологических операций.

Значения времени на техническое обслуживание и ремонт топливной аппаратуры при существующем способе использования дизельного топлива (в состоянии поставки) и при предварительной очистки его разработанным электрическим фильтром приведены в таблице 5.8.

Для определения значения времени на технологическое обслуживание и ремонт топливной аппаратуры при предварительной очистки дизельного топлива электрическим фильтром табл. 5.8 были использованы результаты эксплуатационных исследований. По результатам этих исследований установлено, что применение предварительной очистки дизельного топлива электрофильтром ресурс штатных фильтров тонкой очистки увеличивается более чем в 3 раза. Такое увеличение ресурса будет справедливо и для фильтров грубой очистки. Ресурс ТНВД увеличился в 2,5 раза. Можно допустить. Что такое увеличение ресурса будет наблюдаться и для распылителей форсунок. На основании изложенного, можно утверждать, что изменятся в сторону уменьшения, значения времени на диагностирование и поиск неисправностей перечисленных элементов в 3 и 2,5 раза соответ-

ственно. При этом допускаем, что время на ремонт перечисленных элементов остается неизменным.

Таблица 5.8

Усредненные значения времени на выполнение технологических операций по техническому обслуживанию и ремонту топливной аппаратуры

Наименование операции	Характер использования дизельного топлива			
	В состоянии поставки		С предварительной очисткой электро-фильтром	
	Среднее время, $T_i$ , мин	Интенсивность события, $\lambda_{ij}$	Среднее время, $T_i$ , мин	Интенсивность события, $\lambda_{ij}$
1. Диагностирование неисправности и подготовка к ремонту фильтра грубой очистки	$T_{23} = 40$	0,025	$T_{23} = 15$	0,066
2. Диагностирование неисправности и подготовка к ремонту фильтра тонкой очистки	$T_{24} = 50$	0,02	$T_{24} = 15$	0,066
3. Диагностирование неисправности и подготовка к ремонту форсунок	$T_{25} = 120$	0,0083	$T_{25} = 48$	0,02
4. Диагностирование неисправности и подготовка к ремонту ТНВД	$T_{26} = 180$	0,005	$T_{26} = 72$	0,013
5. Ремонт фильтра грубой очистки	$T_{30} = 5$	0,2	$T_{30} = 5$	0,2
6. Ремонт фильтра тонкой очистки	$T_{40} = 15$	0,066	$T_{40} = 15$	0,066
7. Ремонт форсунок	$T_{50} = 120$	0,0083	$T_{50} = 120$	0,0083
8. Ремонт ТНВД	$T_{60} = 240$	0,0041	$T_{60} = 240$	0,0041
9 Подготовка и проведение ремонтных работ	$T_{02} = 120$	0,0083	$T_{02} = 120$	0,0083
10. $\lambda_{01} = \mu_{10}$	-	0,1	-	0,1

Анализ данных таблицы 5.8 свидетельствует о том, что за счет повышения чистоты дизельного топлива используемого для мобильной сельскохозяйственной техники путем предварительной его очистки, разработанным электрофильтром

коэффициент готовности топливной системы дизельного двигателя повышается с  $K_r = 0,79$  до  $K_r = 0,85$ , что составляет 7,6%. Это подтверждает выдвинутую ранее гипотезу о влиянии чистоты дизельного топлива на надежность мобильной сельскохозяйственной техники.

#### **5.4 Техничо - экономическая оценка эффективности использования электрофильтра для очистки дизельного топлива перед его заправкой**

Расчет экономической эффективности от использования электроочистки для подготовки дизельного топлива перед его использованием производился на примере сельскохозяйственных предприятий Запорожской области. По данным ОблСтата на 01. 01. 2003 года число сельскохозяйственных предприятий различных организационно-правовых форм хозяйствования составляет 406 хозяйств, тракторный парк этих предприятий составляет 9980 единиц, который потребляет ориентировочно 162200 тонн дизельного топлива в год и 563,1 т в сутки соответственно.

Исходя из опыта изготовления экспериментальных образцов установок электроочистки дизельного топлива, цена одной установки составляет 3000 грн. Если предположить, что все хозяйства будут оснащены указанными установками, то капитальные вложения на организацию системы предварительной очистки дизельного топлива в масштабах области составит:

$$K_{уст} = 3000 \cdot 406 = 1218 \text{ тыс. грн.}$$

Экономический эффект от использования установок для электроочистки дизельного топлива будет достигаться за счет увеличения срока замены топливных фильтров тонкой очистки и за счет повышения ресурса ГНВД. Другие статьи, например, снижение скорости потери производительности тракторного агрегата, увеличение коэффициента готовности, снижение расхода дизельного топлива и др., из-за сложности расчетом не учитывались.

По данным экспериментальных исследований доказано, что внедрение электрофильтра для очистки дизельного топлива перед его заправкой позволяет увеличить сроки замены топливных фильтров тонкой очистки с 917 моточасов до

3000 моточасов, (в 3,27 раза), а ресурс ТНВД - с 1920 моточасов (при условии одного капитального ремонта) до 3840...4800 моточасов, (в 2,0...2.5 раза), (в расчётах принимаем 4000 моточасов).

Потребность области в ТНВД и топливных фильтрах тонкой очистки определяем следующим образом. Тракторный парк включает в себя 9980 тракторов, нормативный срок службы трактора 8...10 лет, среднегодовая наработка составляет в среднем 1000 моточасов. То есть за срок эксплуатации трактор должен наработать 8000...10000 моточасов. В расчётах принимаем 10000 моточасов.

Тогда потребность в ТНВД составит по области

$$n = \frac{Q \cdot b}{q}, \quad (5.1)$$

где Q – ресурс работы трактора, моточас;

q – ресурс работы ТНВД, моточас;

b – количество тракторов в области, шт.

$$n_1 = \frac{10000 \cdot 9980}{1920} = 51979 \text{шт};$$

$$n_2 = \frac{10000 \cdot 9980}{4000} = 24950 \text{шт}.$$

Потребность в топливных фильтрах тонкой очистки определяем по формуле

$$m = \frac{Q \cdot b}{q'}, \quad (5.2)$$

где q' - ресурс работы топливного фильтра тонкой очистки, моточасов.

$$m_1 = \frac{10000 \cdot 9980}{917} = 108833 \text{шт};$$

$$m_2 = \frac{10000 \cdot 9980}{3000} = 33267 \text{шт}.$$

Затраты на приобретение ТНВД составят

$$C_n = n \cdot C_n, \quad (5.3)$$

где  $C_n$  – затраты на приобретение ТНВД, тыс. грн.;

$C_n$  – стоимость одного ТНВД, грн., ( $C_n = 1160$  грн.).

$$C_{n1} = 51979 \cdot 1160 = 60295,6 \text{ тыс. грн.}$$

$$C_{n2} = 24950 \cdot 1160 = 28942 \text{ тыс. грн.}$$

Затраты на приобретение топливных фильтров тонкой очистки составят

$$C_\phi = n \cdot C_\phi, \quad (5.4)$$

где  $C_\phi$  – затраты на приобретение фильтров тонкой очистки, тыс. грн.;

$C_\phi$  – стоимость одного топливного фильтра тонкой очистки, грн., ( $C_n = 120$  грн.).

$$C_{\phi1} = 10883 \cdot 120 = 13060 \text{ тыс. грн.}$$

$$C_{\phi2} = 33267 \cdot 120 = 3992 \text{ тыс. грн.}$$

В процессе эксплуатации допускается один капитальный ремонт ТНВД.

Затраты на ремонты за анализируемый период составят

$$Z_p = n \cdot C_p, \quad (5.5)$$

где  $Z_p$  – затраты на ремонты ТНВД, тыс. грн.;

$n$  – количество ремонтируемых ТНВД, шт.;

$C_p$  – стоимость одного ремонта ТНВД, грн. ( $C_p = 580$  грн.).

$$Z_{p1} = 51979 \cdot 580 = 30147,8 \text{ тыс. грн.}$$

$$Z_{p2} = 24950 \cdot 580 = 14471 \text{ тыс. грн.}$$

Среднегодовые затраты на приобретение ТНВД по вариантам соответственно составляют:

$$C'_{n1} = 6029,56 \text{ тыс. грн.};$$

$$C'_{n2} = 2894,2 \text{ тыс. грн.}$$

Среднегодовые затраты на приобретение топливных фильтров тонкой очистки соответственно составляют:

$$C'_{\phi1} = 1306 \text{ тыс. грн.};$$

$$C'_{\phi2} = 399,2 \text{ тыс. грн.}$$

Среднегодовые затраты на ремонты ТНВД соответственно составляют:

$$Z'_{p1} = 3014,78 \text{ тыс. грн.}; \quad Z'_{p2} = 1447,1 \text{ тыс. грн.}$$

Для расчёта эксплуатационных затрат используется формула

$$I = Z + A + P + \mathcal{E}_л, \quad (5.6)$$

где  $Z$  – заработная плата обслуживающего персонала, тыс. грн.;

$A$  – амортизация основных средств, тыс. грн.;

$P$  – затраты на ремонт, тыс. грн.;

$\mathcal{E}_л$  – оплата за потреблённую электроэнергию, тыс. грн.

В связи с тем, что затраты труда остаются неизменными (дополнительный персонал для обслуживания электрофильтра не требуется) и потребление электроэнергии остаётся прежним (устанавливается электрофильтр вместо бензоколонки, потребляемая мощность которых  $P = 0,5$  кВт и режимы работы одинаковы) для упрощения расчётов эти показатели опускаем.

Годовая величина амортизационных отчислений на электрофильтр рассчитывается по формуле

$$A_{эл.ф} = \frac{B \cdot a}{100} \cdot k, \quad (5.7)$$

где  $B$  – балансовая стоимость электрофильтра, грн.;

$a$  – норма амортизационных отчислений, % ( $a = 15\%$ );

$k$  – количество электрофильтров, шт.

$$A_{эл.ф} = \frac{3000 \cdot 15}{100} \cdot 406 = 182,7 \text{ тыс. грн.}$$

Годовые отчисления на ремонт электрофильтров составят

$$P_{эл.ф} = \frac{B \cdot r}{100} \cdot k, \quad (5.8)$$

где  $r$  – норма отчислений на текущие ремонты и ТО, % ( $r = 7\%$ ).

$$P_{эл.ф} = \frac{3000 \cdot 7}{100} \cdot 406 = 85,26 \text{ тыс. грн.}$$

Тогда годовые эксплуатационные затраты составят

$$H_1 = C'_{н1} + C'_{ф1} + Z'_{p1}, \quad (5.9)$$

$$H_1 = 6029,56 + 1306 + 3014,78 = 10350,34 \text{ тыс. грн.}$$

$$H_2 = C'_{н2} + C'_{ф2} + 3'_{р2} + P_{эл.ф} + A_{эл.ф}, \quad (5.10)$$

$$H_2 = 2894,2 + 399,2 + 1447,1 + 85,26 + 182,7 = 5008,46 \text{ тыс. грн.}$$

Годовая экономия эксплуатационных затрат равна

$$\Delta H = H_1 - H_2, \quad (5.11)$$

$$\Delta H = 10350,34 - 5008,46 = 5341,88 \text{ тыс. грн.}$$

Срок окупаемости дополнительных капитальных вложений составит

$$T = \frac{K_{уст}}{\Delta H}, \quad (5.12)$$

$$T = \frac{1218}{5341,88} = 0,23 \text{ года}$$

## 5.5 Выводы по пятому разделу

1. Экспериментальными исследованиями в условиях эксплуатации доказано, что использование предварительно очищенного электрофильтром топлива в тракторах Т-150 позволяет увеличить сроки замены топливных фильтров тонкой очистки с 917 моточасов до 3000 моточасов, что в 3 раза больше, чем предусмотрено ТУ, и в 3,27 раза превышает ресурс фильтров, работающих на неочищенном топливе.

2. Стендовые испытания опытных образцов вновь созданных электрофильтров подтверждают его работоспособность при высоких функциональных характеристиках. Так, при прокачке дизельного топлива через электрофильтр с обоснованными режимами количество механических частиц загрязнителя уменьшается от 10 до 78 раз для частиц размером 2...8 мкм и полным исключением частиц размером более 8 мкм и воды. Полученные характеристики электрофильтра значительно превосходят аналогичные показатели штатных фильтров тонкой очистки для которых коэффициент отсева не превосходит 80 % для частиц не менее 20 мкм.

3. Установлено, что среди испытанных в эксплуатационных условиях вариантов использования дизельного топлива самую высокую стабильность функциональных параметров мобильных сельскохозяйственных комплексов (на базе трактора Т-150) обеспечивает вариант предусматривающий предварительную его очистку вновь созданным электрофильтром. Так, скорость снижения эффективной мощности двигателя происходит в 2,20 раза быстрее, а скорость увеличения приведенного удельного расхода топлива в 1,76 раза медленнее по сравнению с вариантом использования топлива в состоянии поставки.

В частности, эффективная мощность двигателя  $N_e = 127,3$  кВт за 2250 моточасов при использовании топлива в состоянии поставки снизилась до  $N_e = 80,5$  кВт, а при предварительной очистке электрофильтром до  $N_e = 105,9$  кВт.

4. Годовая экономия за счет снижения эксплуатационных затрат на тракторный парк сельхозпроизводителей Запорожской области, путем использования предварительно очищенного электроочистителем предполагаемой конструкции, дизельного топлива, составит 5 млн. 342 тыс. грн. С учетом наличия в хозяйствах области импортной зерно- и кормоуборочной техники, экономический эффект будет значительно превышать указанную сумму.

Оценка надежности топливной системы двигателя СМД-62 позволила установить, что использование предварительно очищенного электрофильтром дизельного топлива для мобильных сельскохозяйственных комплексов обеспечивает повышение ее надежности. Так, коэффициент готовности  $K_r$  увеличился с 0,79 для топливных систем, работающих на топливе в состоянии поставки, до 0,85 – на топливе предварительно очищенном электрофильтром. Это увеличение составляет 7,6%.

## ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

В диссертации приведено теоретическое обобщение и новое решение научной задачи повышения эффективности использования мобильной сельскохозяйственной техники за счет улучшения технического обслуживания и обеспечение чистоты дизельного топлива.

По результатам исследований сделаны следующие основные выводы:

1. По результатам исследований и обобщения опыта эксплуатации мобильной сельскохозяйственной техники установлено, что эффективность ее использования главным образом зависит от функциональной стабильности и надежности составных ее систем и агрегатов, в т.ч. топливной системы, 50 % отказов которой обусловлено загрязнением дизельного топлива. Расход топлива за последние годы из-за ухудшения технического состояния топливной аппаратуры дизелей увеличился в среднем на 15...20%.

2. Установлена закономерность влияния загрязненности дизельного топлива на функциональные характеристики машино-тракторного агрегата (на базе трактора Т-150К), исследование которых позволило доказать, что использование очищенного электрофильтром дизельного топлива обеспечивает уменьшение скорости падения эффективной мощности двигателя в 2,2 раза, производительности на пахоте в 1,92 раза, а скорости увеличения приведенного удельного и погектарного расхода топлива соответственно до 1,76 и до 6,5 раза в сравнении с использованием топлива в состоянии поставки. Например, производительность МТА на пахоте после наработки трактора 2250 моточасов при использовании топлива в состоянии поставки снизилась с 2,43 га/ч до 1,51 га/ч, а при предварительной очистке электрофильтром до 1,95 га/ч.

3. Разработана и экспериментально проверена математическая модель процесса изнашивания прецизионных соединений топливной аппаратуры, использование которой позволило обосновать технические требования к загрязненности дизельного топлива для мобильной сельскохозяйственной техники и разработана методика прогнозирования ресурса плунжерных пар ТНВД. Для обеспечения за-

данного ресурса плунжерных пар предельная норма загрязнения не должна превышать 25 г/т для частиц механических примесей размером до 4...6 мкм, 62 г/т – для частиц до 8...10 мкм и 100 г/т – для частиц более 15 мкм.

4. Предложена методика ускоренных износных испытаний плунжерных пар ТНВД на модельных образцах пар трения. Особенность указанной методики состоит в том, что расчет износа плунжерных пар в эксплуатационных условиях выполнялся по результатам ускоренных испытаний через масштабные коэффициенты времени и скорости износа:  $t_n = 80,1 t_m$ ,  $I_n = 89210^{-4}$  Им.

5. Установлены основные зависимости коэффициента эффективности сепарации механических примесей из дизельного топлива силами электрического поля, в котором расположена поляризованная единичная сфера из диэлектрика от технологических режимов и конструктивных параметров коаксиальных электродов. Используя эти закономерности, разработана конструкция электрофильтра, обеспечивающая сепарацию механических частиц размером не менее 8 мкм и воды с коэффициентом полноты отделения  $\varphi = 100 \%$ , что превышает требования государственных стандартов на фильтры тонкой очистки.

6. Экспериментально доказано, что использование очищенного дизельного топлива, до уровня технических требований, обеспечивает увеличение срока замены топливных фильтров тонкой очистки двигателя СМД-62 с 917 моточасов до 3000 моточасов. Ресурс плунжерных пар ТНВД при этих условиях увеличивается с 960 моточасов до 2370 моточасов. Полученные результаты обеспечивают повышение надежности топливной системы. Коэффициент готовности,  $K_T$  - увеличился на 7,6 %.

7. Экономические расчеты доказали целесообразность использования для мобильной сельскохозяйственной техники дополнительно очищенного дизельного топлива. Годовая экономия от уменьшения эксплуатационных затрат на тракторный пар сельхозпроизводителей Запорожской области, без учета наличия импортной техники, при применении предложенного средства очистки дизельного топлива составляет 5 млн. 342 тыс грн. в год. Срок окупаемости капиталовложений составляет 0,23 года.

8. На основании выполненных исследований рекомендуется использовать в сельскохозяйственном производстве и в учебном процессе ВУЗов:

- установку с обоснованными технологическими и конструктивными параметрами электрофильтра для очистки дизельного топлива (Акт внедрения от 19.04.2002);

- предусмотреть в регламенте технического обслуживания мобильной сельскохозяйственной техники операцию предварительной очистки дизельного топлива;

- методику и программу для ПЭВМ прогнозирования ресурса прецизионных соединений топливной аппаратуры дизельных двигателей (Акт внедрения от 14.01.2003).

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анилович В.Я., Гринченко А.С., Литвиненко В.Л. Надёжность машин в задачах и примерах. Харьков, ОКО. – 2001. – 319 с.
2. Анилович В.Я., Гринченко А.С. О контроле и оценке надёжности с учетом потери информации. // Надёжность и контроль качества – 1978 - № 1 - с.16-18.
3. Анилович В.Я., Гринченко А.С. Оценка характеристик надёжности при случайной продолжительности испытаний. // Надёжность и контроль качества. – 1978. - №8. - с.33-43.
4. Абдулаев А. Исследование смазки в трансмиссии пропашного трактора в условиях Узбекистана: Автореф. дис. канд. техн. наук. - Ташкент, 1970. - 16 с.
5. Александер П., Хадсон Р.Ф. Физика и химия шерсти. – М.: Лег. Пром., 1971. - 190 с.
6. Баранов А.А. Научно-техническое обеспечение создания новой уборочной техники. // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 2002. - №3. – с. 3-7.
7. Венцель Е.С., Овчаров Л.Я. Теория вероятности и ее инженерные приложения. – М.: 1988. – 477 с.
8. Белянин П.Н. Тонкая центробежная очистка рабочих жидкостей авиационных гидравлических систем: Дис. докт. техн. наук. – М.: НИАТ, 1974. - 285 с.
9. Бездольная Е.Н. Расчёт срока службы фильтрующих элементов. // Тр. ЦНИИТА. – Л.: 1997. – Вып. 63. – с. 41-45.
10. Борисов М.В., Павлов И.А., Пстников В.И. Ускоренные испытания машин на износостойкость, как основа повышения их качества. – М.: Изд-во стандартов, 1976. – 352 с.
11. Богородицкий Н.П., Волокбинский Ю.М. Теория диэлектриков. – Л.: Энергия, 1965. - 344 с.
12. Бойко В.Т., Никонов К.В. К расчету подемоторных сил неоднородного электрического поля в дисперсной среде. // Вопросы авиационной химмотологии. – К.: КИИГА, 1978. – Вып. 2. - с. 74-78.
13. Браун Э.Д., Слушкович Б.Л. Современные серийные машины трения.//

Трение и износ. – 1984. - т.5, № 1. - с. 94-99.

14. Белый В.А., Свириденко А.И. Актуальные направления развития исследований в области трения и изнашивания. // Трение и износ, 1987. - т.8, № 1. - с. 5-25.

15. Болдар Л.Н. Основополагающие принципы приработки деталей. // Збірник наукових праць. Серія: Технічні науки. – Луганськ: ЛДАУ, 2001. - №10 (22). – 232 с.

16. Войтов В.А., Попов А.В. Разработка математической модели электро-статистического фильтра с рабочей поверхностью в виде сферы из диэлектрика. // Вестник ХГАДТУ: сб. науч. тр. Вып. 12-13. – Харьков: ХГАДТУ, 2000. - с. 100-102.

17. Walkenhorst W., Zebel G. Uber ein neues schwebstofffilter hoher abscheideleistung und gerinden. Str. – Staub, 1964, № 11, p. 444...448.

18. Войтов В.А. Конструктивная износостойкость узлов трения гидромашин. Ч.2. Методология моделирования граничной смазки в гидромашинах. – Харьков: Центр Леся Курбаса, 1997. - 152 с.

19. Грановский М.Г., Лавров И.С., Смирнов О.В. Электрообработка жидкостей. – Л.: Химия, 1976. - 216 с.

20. Гаража В.В. Исследование вопросов очистки авиационного топлива от эмульсионной воды в квазипостоянном поле: Дис. канд. техн. наук. – К.: КИИГА, 1975. - 270 с.

21. Havlecek V. The improvement of efficiency of fibrous dielectric filters by application of an external electric field, Int. // G. Air and Water Poll. - 1961. Vol. 4, Nos. ¾, - pp. 225-236.

22. Гаража В.В., Казанец В.И. К вопросу расчета эффективности очистки диэлектрической жидкости в ячейке фильтроэлемента с высоковольтным сетчатым электродом. // Вопросы авиационной химмотологии. – К.: КИИГА, 1977. – Вып. 1.- с. 131-134.

23. Гаража В.В., Халиль С.А. Выбор поляризационного наполнителя для разрушения водно-масляных эмульсий в квазипостоянном электрическом поле

электродегидрататора. // Вестник КМУГА. - 1998. - № 1. - с.82-87.

24. Гаража В.В., Халиль С.А. Очистка авиационных гидравлических и моторных масел от эмульсированной воды и механических загрязнений в квазипостоянном электрическом поле. // Вестник КМУГА. – 1999. - № 2. - с.248-255.

25. Гуревич Д.Ф. Основы теории износа плунжерных пар. // Автомобильная промышленность. – 1958. № 2. – с. 20-24.

26. Губкин А.Н. Физика диэлектриков. – М.: Высш. шк., 1971. – 242 с.

27. Григорьев М.А., Борисова Г.В. Очистка топлива в двигателях внутреннего сгорания. – М.: Машиностроение, 1991. – 208 с.

28. Григорьев М.А., Понаморев Н.Н. Распределение размеров частиц загрязнений в рабочих жидкостях. // Автомоб. промышленность. – 1981. - № 10. с. 23-24.

29. ГОСТ 1414Б-88. Фильтры очистки топлива дизелей. Общие технические требования. – М.: 1988. - 16с.

30. Дидур В.А., Иванов Г.И., Дидур В.В. Прогнозирование ресурса топливной аппаратуры дизелей в зависимости от загрязнённости топлива. – В Кн.: Праці Таврійської державної агротехнічної академії. Вип. 1. Том 3, Мелітополь. 1999. – с. 3-15.

31. Данциг Дж. Линейное программирование, его обобщения и применение. М., Прогресс, 1961. - 600 с.

32. Дейнега Ю.Ф. Углеводородные дисперсные системы в электрических полях. // Химия и технология топлив и масел. // Киев. ин-т коллоид. химии АН УССР. – 1982. - №12.- с. 15-17.

33. Дейнега Ю.Ф., Попко К.К., Ковганич Н.Д. // Влияние сильных электрических полей на реологические свойства углеводородных дисперсных систем. – К.: Наук. думка, Вып. 10. – 1978. - с. 85-98.

34. Дейнега Ю.Ф. Ульберг З.Р., Эстрела-Льопис В.Р. Электрофоретическое осаждение металлополимеров. – К.: Наук. думка, 1976. - 256 с.

35. Дидур В.В. Моделирование процесса удаления воды из жидких нефтепродуктов. // Труд. ТГАТА. Отраслевое машиностроение, темат. научн.-техн. сб.

Вып. 2. Т. 4. Мелитополь. – 1998. – с. 74-81.

36. Дидур В.В., Кюрчев В.Н. Обоснование технических требований к чистоте дизельного топлива. // Механіка та машинобудування № 1 / АН ВШУ, ХДПУ м. Харків. – 2000. – с. 54-59.

37. Дидур В.В. Исследование математической модели электростатического фильтра с рабочей поверхностью в виде сферы из диэлектрика // Праці ТДАТА, наук. фах. вид. Вип. 1. Т. 17. – Мелітополь: - 2000. – с. 56-65.

38. Дидур В.В. Электрический фильтр с диэлектрическим наполнителем // Праці ТДАТА - Мелітополь, 2003. – Вип. 15, т.1 – с.54-56.

39. Electrostatic separation of solids from liquids. Gulf sciences and Technology Co. Filtration and Separation, 1977.

40. Электричний фільтр і спосіб його регенерації. Деклараційний патент на винахід UA 7B03C5/00; Дідур В.В. та ін; № 1771-III; Заявл. 20.03.2000; Опубл. 16.04.2001; Бюл. № 3.

41. Евдокимов Ю.А., Колесников В.И., Тетерин А.И. Планирование и анализ эксперимента при решении задач трения и износа.-М.:Наука, 1980. – 228 с.

42. Зарицкий В.С. Определение вероятности надежной работы системы в течении заданного промежутка времени. Изд. АН СССР, техническая кибернетика, 1966, № 1.

43. Зоммерфельд А. Электродинамика.- М.: Изд. иностр. лит., 1958.-500 с.

44. Зубченко А.Н. и др. О выборе конфигурации рабочей части электросепаратора авиационных ГСМ. // Вопросы авиационной химмотологии. – К.: КИИ-ГА, 1983. - с. 61-64.

45. Икрамов У.А. и др. Износ основных деталей дорожных машин. // Под ред. У.А. Икрамова. – Ташкент: Фан. – 1976. – 134 с.

46. Иванов В.Н. и др. Исследование изнашивания деталей топливного насоса дизеля Д-50 и изыскание мероприятий по повышению работоспособности плунжерных пар. // Трение и износ в машинах. – М.: АН СССР. – 1962. – Вып. 16. – с. 24-50.

47. Иофинов С.А. Эксплуатация машинно-тракторного парка. – М.: Колос,

1974. – 400 с.

48. Икрамов У.А. Расчётные методы оценки абразивного износа – М.: Машиностроение, 1987. – 288 с.

49. Кугель Р.В. Основные задачи проблемы надёжности машин. // Вестник машиностроения. – 1981. – № 11. - с. 49-55.

50. Кугель Р.В. Эксплуатационная надёжность тракторов. - М.: Агропроиздат. 1990. - 114 с.

51. Комплексная система технического обслуживания и ремонта машин в сельском хозяйстве. – М.: ГОСНИТИ, 1985. - 144 с.

52. Конкин Ю.А., Никулин Ю.В. Дашкова Л.В. Развитие фирменного ремонта и технического сервиса в АПК. – М.: АгроНИЦ ТЭИИТО, 1989. - 60 с.

53. Кавалерчик К.М. Организационно-экономические основы управления работоспособностью и оптимизации долговечности машин: Автореф. дис. докт. эконом. наук. – М.: МИИСП, 1989. - 32 с.

54. Коновалов В.М., Скрицкий В.Я., Рокшевский В.А. Очистка рабочих жидкостей в гидроприводах станков. – М.: Машиностроение, 1976. - 288 с.

55. Коганов Э.С., Коганов Ю.С., Скачков А.Е. Электрические методы очистки и контроля судовых топлив. – Л.: Судостроение, 1990. - 216 с.

56. Карабцов Г.П. Разработка электроочистителя реактивных топлив от загрязнений. Автореф. дис. канд. техн. наук. – К.: КИИГА, 1982. - с. 24.

57. Коваленко В.П., Турчанинов В.Е. Средства очистки нефтепродуктов от механических загрязнений. – М.: ЦНИИТЭнефтехим, 1984. - 68 с.

58. Кюрчев С.В. Підвищення надійності і ефективності використання зернових жнивараок шляхом модернізації їх приводів: Автореф. дис. канд. техн. наук. – Луганск, 2003. – 18 с.

59. Кравченко В.Г. Разработка электроочистителя с наполнителем из гранул конденсаторной керамики для очистки авиационных топлив и масел: Дис. канд. техн. наук. – К.: КИИГА, 1987. - 196 с.

60. Коваль В.П. Манзий В.С. Никитин А.Г. Уравнение траектории заряженной частицы, движущейся в плоскопараллельном электрическом поле. //

Средства математического моделирования технических задач. – К.: Ин-т математики АН УССР. – 1975. - с.18-24.

61. Кравченко В.Г., Чирков С.В. Очистка авиационных горюче-смазочных материалов электроочистителем поляризационного принципа действия. // Исследование процессов подготовки, применения и контроля качества авиа ГСМ и спецжидкостей. – К.: КИИГА, 1989. – Вып. 1. - с. 8-12.

62. Кириш А.А. Влияние внешнего электрического поля на осаждение частиц в волокнистом фильтре. // Теоретические основы химической технологии. // Киев, ин-т коллоид. химии АН УССР. – 1971. - № 9. - с.76-80.

63. Карапетян М.А., Шагян А.Г. Диэлектрическая сфера во внешнем неоднородном поле. // Изв. АН Армянской ССР. Сер. техн. наук. – 1984. - № 2. - с.14-19.

64. Кривенко М.П., Федосов Н.М. Ремонт и техническое обслуживание системы питания автотракторных двигателей. – М.: Колос, 1980. – 250 с.

65. Кочанов Э.С., Кочанов Ю.С., Скачков А.Е. Электрические методы очистки и контроля судовых топлив. – Л.: Судостроение, 1990. – 216 с.

66. Красников Ю.В., Попов А.В., Дидур В.В. Моделирование процесса очистки органических жидкостей электростатическим фильтром с диэлектрической поверхностью // Труд. ТГАТА. Вып. 1. Т. 6. – Мелитополь: - 1998. – с. 81-89.

67. Коваленко В.П. Загрязнение и очистка нефтяных масел. – М.: Химия, 1978. – 304 с.

68. Корницкий Ю.В. Основы физики диэлектриков. – М.: Энергия, 1979. – 248 с.

69. Кравченко В.Г., Чирков С.В., Казанцев В.И. Исследование зависимости эффективности очистки гидравлического масла АМГ-10 в электроочистителе от параметров изоляционного покрытия электродов. // Исследование эксплуатационных свойств авиаГСМ и спецжидкостей. – К.: КИИГА, 1987. - с. 30-35.

70. Карасик И.И. Развитие критериев и методов экспериментальной оценки прирабатываемости материалов. // Вестник машиностроения. – 1984. - № 11. - с. 16-19.

71. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике. - М.: Наука, 1968. -720 с.
72. Кармин С. Основы теории случайных процессов. – М.: 1971. – 535 с.
73. Киреев И.М., Такмачёв М.А. Влияние износа плунжерных пар на процесс впрыска топлива двигателя Д – 108 ЦНИИТА – Л.: 1969. - Вып. 42. - с. 42-57.
74. Кищук А.С. и др. Практикум по техническому обслуживанию тракторов. – Глеваха: ИМЭСХ, 2002. - 109 с.
75. Коваленко В.П., Турчанинов В.Е. Очистка нефтепродуктов от загрязнений. –Л.: Недра, 1990. - 160 с.
76. Лейбовский М.Г. Оборудование для очистки жидкостей в электрическом поле. // Химическое и нефтеперерабатывающее машиностроение. - М.: ЦИНТИХИМ – НЕФТЕМАШ, 1987. - с. 46.
77. Лебедев А.Т., Сандонирский М.Г., Ткаченко Д.И. Теория трактора и автомобиля. // Методические указания. Изд. ХИМЭСХ, Харьков, 1989. – 89 с.
78. Механизация сельскохозяйственного производства. // Научн. тр. КГАУ. – Симферополь, 2000. – Вып. №65. – 235 с.
79. Методические указания по оценке, прогнозированию и нормированию ресурса и безотказности сельскохозяйственной техники. – М.:ГОСНИТИ, 1975.– 28с.
80. Мартыненко А.Г., Коноплёв В.П., Ширяева Г.П. Очистка нефтепродуктов от загрязнений. – М.: Химия, 1974. - 88 с.
81. Машина трения для испытания материалов на трение и износ 2070 СМТ-1: Техническое описание и инструкция по эксплуатации. – ПО «Точприбор», 1989. – 71 с.
82. Натарзан В.М. Обеспечение работоспособности тракторов сельскохозяйственного назначения: Автореф. дис. докт. техн. наук. – Новосибирск: СибИМЭ, 1987. - 35 с.
83. Никитин Г.А., Никонов К.В. Фильтрация рабочих жидкостей. – Киев: КИИГА, 1984. - 59 с.
84. Никитин Г.А., Дидур В.А., Байбиков В.Ю. Исследование возможности очистки дизельного топлива от механических примесей силами электрического

поля. // Науч. труды / Укр. с.- х. акад. – 1979. - Вып. 227. - с. 15-19.

85. Никитин Г.А. Электрические очистители диэлектрических жидкостей. – К.: Знание, 1980. - 18 с.

86. Никитин Г.А., Чирков С.В. Влияние загрязнённости жидкости на надёжность работы гидросистем летательных аппаратов. – М.: Транспорт, 1969. – 183 с.

86. Никитин Г.А., Чирков С.В. Влияние загрязнённости жидкости на надёжность гидросистем летательных аппаратов. – М.: Транспорт, 1969. – 183 с.

87. Никитин А.Г. Исследования и оптимизация параметров электроочистителей жидкостей масляных и гидравлических систем летательных аппаратов: Автореф. дис. канд. техн. наук. – М.: МИИГА, 1979. - 23 с.

88. Никонов К.В. Исследование метода очистки реактивных топлив от частиц загрязнений силами электрического поля: Дис. канд. техн. наук. – К.: КИИГА, 1975. - 133 с.

89. Никитин Г.А., Никитин А.Г., Данилов В.М. Экономия нефтепродуктов, используемых в технологических целях. – К.: Техника, 1984. – 128 с.

90. Никитин А.Г., Манзий В.А. Оптимизация профиля щелевого канала электроочистителя жидких диэлектриков. // Вопросы авиационной химмотологии. – К.: КИИГА, 1977. - Вып.1. - с. 121-126.

91. Никонов К.В. Движение частиц в электрическом поле. // Вопросы авиационной химмотологии. – К.: КИИГА, 1983. - с. 64-68.

92. Никонов К.В. Поведение частиц загрязнений при электроочистке реактивных топлив. // Вопросы авиационной химмотологии. – К.: КИИГА, 1984. - с. 69-71.

93. Никитин А.Г. Исследование влияния некоторых конструктивных параметров на работоспособность электроочистителей. // Вопросы авиационной химмотологии. – К.: КИИГА, 1982. - с. 29-34.

94. ОСТ 70.2.8-82. Испытания сельскохозяйственной техники. Надёжность. Сбор и обработка информации. – Введ.1.07.83. - 122 с.

95. ОСТ 70.2.6-77. Испытания сельскохозяйственной техники. Тракторы,

машины сельскохозяйственные, машины для животноводства и кормопроизводства. Надёжность. Показатели и методы их оценки. – 44 с.

96. Основы электрогазодинамики дисперсных систем. / Верещагин И.П и др. – М.: Энергия, 1974. - 480 с.

97. Остроумов Г.А. Взаимодействие электрических и гидродинамических полей. – М.: Наука, 1979. – 320 с.

98. Пасечников Н.С. Научные основы технического обслуживания в сельском хозяйстве. – М.: Колос, 1983. - 143 с.

99. Пронников А.С. Надёжность машин. – М.: машиностроение, 1978. – 592 с.

100. Писаренко В.Г. и др. Удаление органической и неорганической дисперсной фазы из диэлектрических жидкостей. – К.: ОМПФИГ АН УССР. 1985. - 20 с.

101. Проскуряков В.А., Смирнов О.В. Очистка нефтепродуктов и нефтедержащих вод электрообработкой. – СПб.: Химия, 1992. - 112 с.

102. Пат. № 995124 (Великобритания), / Электростатический осадитель. / № 14704/64; Заявлено 18.04.1963; Оpubл. 09.04.1964.

103. Пат. № 3386227 (США), / Электростатическое фильтрующее устройство. / № 576578; Заявлено 01.09.1966; Оpubл. 04.06.1968.

104. Пат. № 3820306 (США), / Электростатический осадитель, содержащий диэлектрические решетки. / № 194983; Заявлено 02.11.1971; Оpubл. 28.06.1974.

105. Пат. № 2090773А (Великобритания), / Электрический фильтр с гранулирующим фильтрующим слоем для определения частиц материала при высоких температурах. / № 2090773; Заявлено 19.11.1981; Оpubл. 21.07.1982.

106. Пат. № 4372837(США). / Электрофильтр с радиальным зазором. / Оpubл. 08.02.1983.

107. Pohl H.A., Schwar I. Particle separation by nonuniform electric fields in liquid dielectrics. // Journal of the electrochemical society - 1960, Vol. 107. - № 5, pp. 383-385.

108. Попов А.В., Иванов Г.И., Красников Ю.В. Исследование математиче-

ской модели электростатического фильтра с рабочей ячейкой из коаксиальных цилиндров. // *Авиационно-космическая техника и технология*. – Харьков.: ХАИ, 1998. – Вып. 6. - с. 304-311.

109. Попов А.В., Красников Ю.В., Иванов Г.И. Принципы построения структурных схем электростатических фильтров с рабочими элементами из коаксиальных цилиндров. // *Авиационно-космическая техника*. – Харьков.: ХАИ, 1998. - Вып. 7. - с. 26-31.

110. Pohl H.A. *Journal of Applied Physics*, 1958, Vol. 19, № 8, p. 56...62.

111. Петканчин И., Стоилов С.Т. Движение сферических коллоидных частиц в неоднородном электрическом поле. Поверхностные силы в тонких пленках и диспесных системах. Сборник докладов IV конференции. – М.: Наука, 1972. - с. 132-136.

112. Pohl H.A. Nonuniform field effects in poorly media. // *Journal of the electrochemical society*. - 1960, Vol. 107. - № 5. - p. 286-290.

113. Панченков Г.М., Цабек Л.К. Поведение эмульсий во внешнем электрическом поле. – М.: Химия, 1969. - 190 с.

114. Панченков Г.М., Цабек Л.К. Дипольный момент капельки эмульсии, помещенной во внешнее электрическое поле. // *Известия ВУЗов. Серия «Нефть и газ»*, 1968. - № 7. - с. 14-16.

115. Пинковский Я.И. Электроразделители и область их применения. // *Химия и технология топлив и масел*. – 1969. - № 11. - с. 21-24.

116. Перегудов Ф.И., Тарасенко Ф.П. Введение в системный анализ: Учебное пособие для ВУЗов. – М.: Высш. шк., 1989. – 367 с.

117. Пучин Е.А., Кушнарев Л.И. Повышение эффективности использования машин в АПК // *Технический сервис в АПК. Сб.научн. трудов МГАУ под ред. Е.А.Пучина*. М. 2002, с.133.

118. Пособие по эксплуатации машинно-тракторного парка. Под ред. Фере Н.Э.; Колос, 1978. – 255 с.

119. РД.10.16.0002.012-87. Руководящий документ. Оценка надёжности восстанавливаемых деталей по постепенным отказам. – М.: ГОСНИТИ, 1988.-28с.

120. Рыбаков К.В., Коваленко В.П., Турчинов В.Б. Очистка нефтепродуктов от механических примесей и воды. – М.: ЦНИИТ Энефтехим, 1974. - 78 с.
121. Рыбаков К.В. Фильтрация авиационных топлив. - М.: Транспорт, 1983. - 158 с.
122. Рабчинская Г.И. Радиотехнические материалы. - М.: Госэнергоиздат, 1956. - 328 с.
123. Рыбаков К.В., Карпенкина Т.Н. Повышение чистоты нефтепродуктов. - М.: Агропромиздат, 1986. - 112 с.
124. Руденко А., Рыбаков К.В. О фильтрации дизельного топлива // Техника в сел. хоз-ве. 1968. - № 9. - с. 29-33.
125. Семкович А.Д. Сократить сроки ремонта автотракторного парка. //Техника в сельском хозяйстве. – 1981. - № 11. - с. 47-48.
126. Степанов М.Н. Статистические методы обработки результатов механических испытаний. – М.: Машиностроение, 1985. - 232 с.
127. Семенихин Н.М., Жолковский Э.К., Веселов Ю.С. Влияние внешнего электрического поля на удержание коллоидных частиц волокнистыми фильтрами.// Электронная обработка материалов. Киев, ни-т коллоид. химии АН УССР. - 1980. - № 3. - с.63-65.
128. Спосіб відновлення моторних мастил. Деклараційний патент на винахід. UA 6С10М175/02 / Дідур В.В. та ін.; № 3687-ПХ; Заявл. 15.11.2000; Опубл. 29.12.2000; Бюл. № 8; 15.11.2000; Бюл. № 6-11.
129. Сухарев Э.А. Теория эксплуатационной надёжности машин. – Ровно: Изд-во РГГУ. – 2000. – 164 с.
130. Смирнов О.В., Эстрела-Льопис В.Р., Семенихин Н.М. К теории концентрации и коагулирования слабопроводящих суспензий в электрическом поле применительно к очистке жидкостей. // Поверхностные явления в дисперсных системах. – К.: Наук. думка, 1971. - с. 34-40.
131. Селиванов А.И., Артемьев Ю.Н. Теоретические основы ремонта и надёжности сельскохозяйственной техники. – М.: Колос, 1978. – 248 с.
132. Словарь-справочник по трению, износу и смазке деталей машин. /

В.Д. Зозуля и др. – К.: Наук. думка, 1990. – 259 с.

133. Смойт В. / Электростатика и электродинамика. – М. – Л.: 1954. – 604 с.

134. Стреттон Дек. / Теория электромагнетизма. – М. – Л.: 1948. – 540 с.

135. Сокольников И.С. Тензорный анализ. - М.: Наука, 1971. - 376 с.

136. Слезкин Н.А. Динамика вязкой несжимаемой жидкости. - М.: Гостехтеоретиздат, 1955. - 520 с.

137. Справочник по эксплуатации, ремонту и хранению сельскохозяйственной техники. – М.: Россельхозиздат, 1982. - 318 с.

138. Тамм И.Е. Основы теории электричества. – М.: Наука, 1976. - 616 с.

139. Тореев Б.М. Физика диэлектрических материалов. – М.: Энергия, 1982. – 320 с.

140. Терлецкий Я.П., Рыбаков Ю.П. Электродинамика. – М.: Высш. шк., 1980. – 335 с.

141. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. М.: Наука, 1977. – 736 с.

142. Устройство для очистки жидкостей в электрическом поле: А.с. № 1144725 (СССР), / Вернигора В.А. и др. Оpubл. 1985, Бюл. № 10.

143. Устройство для очистки жидкостей в электрическом поле: А.с. № 617045 (СССР), Черненко Ж.С., Чирков С.В., Белогузов В.С. и др.; Оpubл. 1978; Бюл. № 28.

144. Усъяров О.Г., Каплан Ф.С. Исследование коагуляции дисперсных частиц в электрическом поле. // Физико-химическая механика дисперсных систем. – К.: Наук. думка, 1978. - Вып.10. -с. 70-84.

145. Физические величины. Справочник. – М.: Энергоиздат, 1991. – 1232 с.

146. Федына В.П. Процесс коагуляции частиц твердой фазы в электросепараторе жидких диэлектриков. // Исследование процессов подготовки, применения и контроля качества авиаГСМ и спецжидкостей. – К.: КИИГА, 1989. - с.12-16.

147. Халиль С.А. Экспериментальная установка и методика разрушения водно-масляных эмульсий в квазипостоянном электрическом поле. // Проблемы эксплуатации и надежности авиационной техники: Сб. науч. тр. / КМУГА, - К.:

1998. - с.34-37.

148. Халиль С.А. Высокоэффективное восстановление эксплуатационных свойств рабочих жидкостей авиационных гидромасляных систем в квазипостоянном электрическом поле: Дис. канд. техн. наук. – Киев: НАУ, 2001. - 186 с.

149. Zebel G. Deposition of aerosol flowing past cylindrical fiber in a uniform electric field. // Journal of colloid science. - 1965, Vol. 20. - № 6ю - pp. 522-524.

150. Чертков Я.Б., Рыбаков К.В. Зрелов В.Н. Загрязнения и методы очистки нефтяных топлив. – М.: Химия, 1970. - 240 с.

151. Чирков С.В., Черненко Ж.С., Белогузов В.С. Исследование эффективности работы электроочистителя с диэлектрическим наполнителем. // Вопросы авиационной химмотологии. – К.: КИИГА, 1977. - Вып. 1. - с. 127-130.

152. Челпан Л.К., Фаттух Я., Маликов Н.Н. Обоснование оптимального поля зазора в размерных группах плунжерных пар для селективной сборки при ремонте с учетом динамики изнашивания в различных зонах эксплуатации. // Информ. вестник диссертационного Совета Д063.72.04. Повышение эффективности использования с. – х. техники. - Саранск, 1998, Вып. 3. - с. 60-81.

153. Чихос Х. Системный анализ в трибонике. – М.: Мир, 1982. - 352 с.

154. Чечет В.А., Пучин Е.А., Драчев Д.И. Об актуальности диагностики дизельной топливной аппаратуры // Диагностика, надежность и ремонт машин. Сб. науч. трудов МГАУ Под ред. Е.А.Пучина. М 2001 г. с. 3-7.

155. Чечет В.А. Контроль мощности и топливной экономичности тракторных и комбайновых дизелей в условиях эксплуатации. Автореф. дис. канд. техн. наук. М ГОСНИТИ, 1986 г.

156. Электроочиститель диэлектрической жидкости: А.с. № 1223996 (СССР), / Бербер В.А. и др. Оpubл. 1986, Бюл. № 14

157. Электроочиститель: А.с. № 1002012 (СССР), / Задорожный В.И. Оpubл. 1983, Бюл № 9.

158. Электрический очиститель диэлектрических жидкостей: А.с. № 691199 (СССР). / Никитин Г.А., Никонов К.В., Карабцов Г.П. Оpubл. 1979, Бюл. № 38.

159. Электроочиститель потока диэлектрической жидкости: А.с. № 598641 (СССР), Чирков С.В., Черненко Ж.С., Гаража В.В. и др.; Оpub. 1978; Бюл № 11.

160. Янтовский Е.И., Апфельбаум М.Е. Струйные течения слабопроводящих диэлектрических жидкостей, вызванные неоднородным электрическим полем. // Магнитная гидродинамика. – 1983. - № 4. - с. 99-103.

# **ПРИЛОЖЕНИЕ**

**ПРИЛОЖЕНИЕ А**  
**ПРОГРАММА ДЛЯ ЭВМ РАСЧЁТА ИЗНОСА**  
**ПЛУНЖЕРНОЙ ПАРЫ ТНВД**

**ПРИЛОЖЕНИЕ Б**  
**ПРОГРАММА ДЛЯ ВЫЧИСЛЕНИЯ**  
**КОЭФФИЦИЕНТА ФИЛЬТРАЦИИ**  
**ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ФИЛЬТРА**

**ПРИЛОЖЕНИЕ В**  
**РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ**  
**ЗАГРЯЗНЁННОСТИ ДИЗЕЛЬНОГО ТОПЛИВА**

Динамика агрязненённости дизельного топлива при  
транспортировке от завода до АЗС.

Показатель	Железная дорога		Нефтебаза		Автомобильная цистерна	
	цистерна	Резервуар	раздаточный агрегат	после налива	после транспортировки	...
Содержание загрязнений, %	0,002	0,003	0,0019	0,0041	0,0049	0,0056
Размерные группы, мкм	Число частиц на 1 мл, шт					
1...10	4800	6840	4660	9280	12900	12640
10...20	1560	1540	1590	2490	3080	3670
20...30	700	628	626	830	670	1000
30...40	110	100	88	188	262	938
40...50	отсутствует	2	отсутствует	8	20	84
> 50	Отсутствует			10		

Таблица В.2.

Загрязненность дизельного топлива на АЗС и нефтескладах.

Показатель	Резервуар		Топливораздаточная колонка	
	До слива	После слива	До слива	После слива
Содержание загрязнений, %	0,013	0,071	0,062	0,074
Размерные группы, мкм	Число частиц на 1 мл, шт.			
1...10	12423	118010	39993	...
10...20	741	1938	761	545
20...30	101	278	230	107
30...40	65	183	81	36
40...50	9	36	41	12
> 50	9	22	36	16

**ПРИЛОЖЕНИЕ Г**  
**АКТЫ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ**  
**ИССЛЕДОВАНИЯ**

**ПРИЛОЖЕНИЕ Д**  
**РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ**

## Результаты расчётов эффективной площади захвата

 $S_{эф}$ , мм<sup>2</sup>, для капель воды при  $U = 5$  кВ

d = 10 мкм						
a, мм	$\epsilon_1 = 4$			$\epsilon_1 = 8$		
	V = 3 мм/с	V = 5 мм/с	V = 8 мм/с	V = 3 мм/с	V = 5 мм/с	V = 8 мм/с
0,5	0,314	0,272	0,233	1,13	0,97	0,90
1	0,360	0,272	0,233	1,89	1,58	1,30
2	0,314	0,233	0,197	2,22	1,68	1,21
4				2,11	1,39	
d = 10 мкм						
a, мм	$\epsilon_1 = 16$			$\epsilon_1 = 32$		
	V = 3 мм/с	V = 5 мм/с	V = 8 мм/с	V = 3 мм/с	V = 5 мм/с	V = 8 мм/с
0,5	2,97	2,25	1,70	6,89	5,40	4,30
1	4,46	4,27	3,77	8,89	7,10	6,90
2	7,93	6,28	4,77	18,6	16,1	13,4
4	8,08	5,64		29,5	18,6	
d = 25 мкм						
a, мм	$\epsilon_1 = 4$			$\epsilon_1 = 8$		
	V = 3 мм/с	V = 5 мм/с	V = 8 мм/с	V = 3 мм/с	V = 5 мм/с	V = 8 мм/с
0,5	0,89	0,82	0,68	3,30	2,40	1,80
1	1,38	1,12	0,89	4,62	4,46	4,08
2	1,48	1,04	0,75	8,16	6,66	4,98
4		0,48		9,62	6,69	4,64
a, мм	$\epsilon_1 = 16$			$\epsilon_1 = 32$		
	V = 3 мм/с	V = 5 мм/с	V = 8 мм/с	V = 3 мм/с	V = 5 мм/с	V = 8 мм/с
0,5	7,93	6,28	4,96	16,1	13,0	10,8
1	10,7	7,85	7,22	25,4	19,8	15,4
2	25,1	18,9	15,6	33,2	31,2	31,3
4	30,1	22,1	16,6	86,3	60,6	54,4
d = 50 мкм						
a, мм	$\epsilon_1 = 4$			$\epsilon_1 = 8$		
	V = 3 мм/с	V = 5 мм/с	V = 8 мм/с	V = 3 мм/с	V = 5 мм/с	V = 8 мм/с
0,5	1,88	1,41	1,33	6,86	5,31	4,12
1	3,01	2,76	2,26	8,48	6,90	6,59
2	5,30	4,27	3,01	17,6	15,4	12,8
4	3,12	2,13	1,34	22,3	16,4	11,9
a, мм	$\epsilon_1 = 16$			$\epsilon_1 = 32$		
	V = 3 мм/с	V = 5 мм/с	V = 8 мм/с	V = 3 мм/с	V = 5 мм/с	V = 8 мм/с
0,5	15,5	12,5	10,0	30,3	24,6	20,3
1	23,6	18,2	14,1	49,3	39,9	32,3
2	31,4	30,6	29,6	74,1	56,5	45,2
4	69,4	54,6	41,2	121,0	117,0	

Продолжение таблицы Д.1

d = 100 мкм						
	$\varepsilon_1 = 4$			$\varepsilon_1 = 8$		
	0,5	4,47	3,22	2,51	13,9	10,8
1	4,87	5,21	5,21	20,4	15,1	11,6
2	12,0	11,1	8,54	25,9	27,1	26,4
4	9,90	6,45	4,46	56,0	44,0	34,0
	$\varepsilon_1 = 16$			$\varepsilon_1 = 32$		
	0,5	29,4	23,4	19,2	56,6	45,1
1	47,7	37,4	30,5	93,3	75,4	61,5
2	69,1	51,5	42,7	149,0	119,0	95,5
4	109,0	94,2	93,7	198,0	169,0	154,0

Таблица Д.2

Результаты расчётов эффективной площади захвата

$S_{эф}$ , мм<sup>2</sup>, для воды при U = 10 кВ

d = 10 мкм						
a, мм	$\varepsilon_1 = 4$			$\varepsilon_1 = 8$		
	V = 3 мм/с	V = 5 мм/с	V = 8 мм/с	V = 3 мм/с	V = 5 мм/с	V = 8 мм/с
0,5	0,76	0,63	0,57	2,46	1,78	1,46
1	0,97	0,83	0,63	4,00	3,53	3,25
2	1,09			6,09	4,81	3,68
4						3,02
	$\varepsilon_1 = 16$			$\varepsilon_1 = 32$		
	0,5	6,44	4,95	4,00	13,1	10,6
1	7,97	6,69		20,0	15,5	11,9
2	17,2	14,9			28,5	27,1
4					46,6	
d = 25 мкм						
	$\varepsilon_1 = 4$			$\varepsilon_1 = 8$		
	0,5	1,81	1,33	1,26	6,9	5,3
1	2,83	2,82	2,20	8,5	6,9	6,6
2	5,28	4,30	3,00	17,6	15,4	12,8
4	3,22	2,18	1,39	22,3	16,4	12,0
	$\varepsilon_1 = 16$			$\varepsilon_1 = 32$		
	0,5	15,2	12,2	10,0	30,3	24,6
1	23,2	18,2	14,1	50,0	40,0	32,5
2	31,4	30,1	29,6	75,0	58,0	46,0
4	67,5	54,6	41,7	122,0	118,0	

Продолжение таблицы Д.2

d = 50 мкм						
	$\varepsilon_1 = 4$			$\varepsilon_1 = 4$		
0,5	4,24	3,14	2,28	13,3	11,0	9,0
1	5,34	5,34	5,02	19,8	15,1	11,6
2	11,1	9,04	6,78	27,5	28,0	26,4
4	11,1	7,54	5,02	55,3	43,2	32,7
	$\varepsilon_1 = 16$			$\varepsilon_1 = 32$		
0,5	28,9	23,0	19,2	56,0	45,0	37,0
1	46,5	37,4	30,5	91,4	75,4	61,5
2	67,8	51,5	42,7	147,0	118,0	95,0
4	120,0	111,0	95,5	196,0	170,0	155,0
d = 100 мкм						
	$\varepsilon_1 = 4$			$\varepsilon_1 = 8$		
0,5	10,6	7,70	5,89	28,2	21,5	17,2
1	13,8	9,42	7,54	44,1	33,3	26,4
2	22,6	21,4		58,9	43,5	38,5
4	41,2	27,1	18,1	118,0	105,0	84,4
	$\varepsilon_1 = 16$			$\varepsilon_1 = 32$		
0,5	56,5	43,9	35,6	101,0	80,9	66,2
1	91,1	71,6	58,1	169,0	135,0	111,0
2	13,8	109,0	90,0	270,0	219,0	181,0
4	181,0	161,0	151,0	418,0	336,0	270,0

Таблица Д.3

Результаты расчётов эффективной площади захвата

$S_{\text{эф}}$ , мм<sup>2</sup>, для кварца при U = 5 кВ

d = 10 мкм						
a, мм	$\varepsilon_1 = 4$			$\varepsilon_1 = 8$		
	V = 3 мм/с	V = 5 мм/с	V = 8 мм/с	V = 3 мм/с	V = 5 мм/с	V = 8 мм/с
0,5	0,110	0,079	0,059	0,510	0,457	0,360
1	0,080	0,059	0,059	0,630	0,511	0,410
2	0,060	0,042	0,028	0,570	0,406	0,314
4		0,016		0,455	0,271	0,196
	$\varepsilon_1 = 16$			$\varepsilon_1 = 32$		
0,5	1,22	1,05	0,97	2,97	2,21	1,67
1	2,10	1,78	1,48	4,47	4,13	3,80
2	2,57	1,88	1,39	7,53	6,10	4,60
4	2,34	1,58	1,04	9,09	6,30	4,30

Продолжение таблицы Д.3

d = 25 мкм						
	$\varepsilon_1 = 4$			$\varepsilon_1 = 8$		
	0,5	0,36	0,30	0,27	1,13	1,07
1	0,36	0,31	0,23	2,10	1,88	1,58
2	0,27	0,20	0,14	2,45	1,88	1,39
4	0,14	0,08	0,06	1,88	1,30	0,90
	$\varepsilon_1 = 16$			$\varepsilon_1 = 32$		
	0,5	3,62	2,64	1,92	8,00	6,36
1	4,44	4,61	4,44	10,4	7,50	7,05
2	8,84	7,30	5,70	20,0	18,8	15,5
4	10,1	6,88	4,97	34,7	25,0	17,8

Таблица Д.4

Результаты расчёта эффективной площади захвата

$S_{эф}$ , мм<sup>2</sup>, для кварца при U = 10 кВ

d = 10 мкм						
a, мм	$\varepsilon_1 = 4$			$\varepsilon_1 = 8$		
	V = 3 мм/с	V = 5 мм/с	V = 8 мм/с	V = 3 мм/с	V = 5 мм/с	V = 8 мм/с
0,5	0,27	0,23	0,20	1,05	0,90	0,83
1		0,23	0,16	1,68	1,39	1,13
2		0,16		1,89	1,39	1,09
4		7,04				
	$\varepsilon_1 = 16$			$\varepsilon_1 = 32$		
	0,5	2,70	2,00	1,58	6,29	4,81
1	4,15	3,97	3,52	7,75	6,49	6,49
2		5,50	4,13	16,9	14,6	11,7
4	7,75	5,23		25,8	18,5	
d = 25 мкм						
	$\varepsilon_1 = 4$			$\varepsilon_1 = 8$		
	0,5	0,76	0,69	0,63	2,80	2,10
1	1,13	0,97	0,76		3,99	3,68
2	0,97	0,76	0,57	7,11	5,52	4,31
4				6,89	4,81	3,39
	$\varepsilon_1 = 16$			$\varepsilon_1 = 32$		
	0,5	7,3	5,7	4,5	15,2	12,3
1	9,4	7,1	6,9	23,6	17,8	13,9
2	18,9	17,2	14,3	29,4	29,0	29,0
4		21,9		81,8	63,2	47,7

**ВЛИЯНИЕ ВЕЛИЧИНЫ ЦИКЛОВОЙ ПОДАЧИ  
ТОПЛИВА НА ЭФФЕКТИВНУЮ МОЩНОСТЬ  
ДВИГАТЕЛЯ СМД-62**

(пример теплового расчета тракторного дизеля СМД-62)

Исходные данные: тип двигателя - четырехтактный, шестицилиндровый, V-образный, однокамерный с турбонаддувом, с постоянным давлением перед турбиной.

Давление наддувочного воздуха  $P_k = 0,15$  МПа

Номинальная мощность  $N_{ен} = 121$  кВт

Номинальная частота вращения  $n_n = 2100$  об/мин

Степень сжатия  $\varepsilon = 15$

Основные размеры двигателя: диаметр цилиндра  $D = 0,13$  м,

ход поршня  $S = 0,115$  м

Коэффициент избытка воздуха  $\alpha = 1,8$

Дизельное топливо «Л» (ГОСТ 305-82)

Низшая удельная теплота сгорания топлива  $Q_n = 42500$  кДж/кг

Элементарный состав топлива:  $C = 0,857$ ;  $H = 0,113$ ;  $O = 0,01$

Параметры окружающей среды  $P_o = 0,1$  МПа,  $T_o = 288$  К

Показатель политропы сжатия воздуха в компрессоре  $n_k = 1,8$

Давление остаточных газов  $P_r = 1,1 \cdot P_k = 1,1 \cdot 0,15 = 0,165$  МПа

Температура остаточных газов  $T_r = 800$  К

Подогрев свежего заряда во впускном коллекторе  $\Delta T = 10$  К

Коэффициент наполнения  $\eta_v = 0,855$

Средний показатель политропы расширения  $n_2 = 1,25$

Коэффициент использования теплоты  $\xi = 0,8$

Степень повышения давления  $\lambda = 1,6$

Коэффициент полноты индикаторной диаграммы  $\varphi = 0,95$

Механический КПД двигателя  $\eta_m = 0,8$

Отношение хода поршня к диаметру цилиндра  $\psi = \frac{S}{D} = 0,855$

Все перечисленные параметры (помимо номинальных) варьируют для дизелей в известных пределах и являются среднестатистическими [79].

## I. ПАРАМЕТРЫ ИНДИКАТОРНОЙ ДИАГРАММЫ

### 1 Процесс впуска

а) температура наддувочного воздуха

$$T_k = T_o \left( \frac{P_k}{P_o} \right)^{\frac{n_k - 1}{n_k}} = 288 \left( \frac{0,15}{0,1} \right)^{\frac{1,8 - 1}{1,8}} = 345 K$$

б) коэффициент остаточных газов

$$\gamma = \frac{P_r T_k}{P_k \cdot T_r \cdot \eta_m (\varepsilon - 1)} = \frac{0,165 \cdot 345}{0,15 \cdot 800 \cdot 0,855 (15 - 1)} = 0,0396$$

в) температура в конце впуска

$$T_a = \frac{T_k + \Delta T + T_r}{1 + \varphi} = \frac{345 + 10 + 0,0396 \cdot 800}{1 + 0,0396} = 373,2 K$$

г) давление в конце впуска

$$P_a = \frac{T_a}{\varepsilon} \left[ \frac{\eta_v P_k (\varepsilon - 1)}{T_k} + \frac{P_r}{T_r} \right] = \frac{37362}{15} \left[ \frac{0,855 \cdot 0,15 (15 - 1)}{345} + \frac{0,165}{800} \right] = 0,1344 \text{ МПа}$$

### 2. Процесс сжатия

а) температура в конце сжатия

$$n_l = 1,41 - \frac{100}{n} = 1,41 - \frac{100}{2100} = 1,36$$

б) температура в конце сжатия

$$T_c = T_a \cdot \varepsilon^{n_l - 1} = 373,2 \cdot 15^{1,36 - 1} = 989,3 K$$

в) давление в конце сжатия

$$P_c = P_a \cdot \varepsilon^{n_l} = 0,1344 \cdot 15^{1,36} = 5,344 K$$

### 3 Процесс сгорания

а) теоретически необходимое количество воздуха в к.молях для сгорания 1 кг топлива

$$L_o = \frac{1}{0,21} \left( \frac{C}{12} + \frac{H}{4} - \frac{O}{32} \right) = \frac{1}{0,21} \left( \frac{0,857}{12} + \frac{0,133}{4} - \frac{0,01}{32} \right) = 0,5 \text{ к.моль} / \text{кг}$$

б) действительное количество воздуха в к.молях для сгорания 1 кг топлива

$$L = \alpha \cdot L_o = 1,8 \cdot 0,5 = 0,9 \text{ к.моль} / \text{кг}$$

в) число к.молей продуктов сгорания на 1 кг топлива

$$M = L + \frac{H}{4} + \frac{O}{32} = 0,9 + \frac{0,133}{4} + \frac{0,01}{32} = 0,9336 \text{ к.моль} / \text{кг}$$

г) теоретический коэффициент молекулярного изменения

$$\beta_o = \frac{M}{L} = \frac{0,9336}{0,9} = 1,0373$$

д) действительный коэффициент молекулярного изменения

$$\beta = \frac{\beta_o + \gamma}{1 + \gamma} = \frac{1,0337 + 0,0396}{1 + 0,0396} = 1,0359$$

е) средняя к.мольная теплоемкость свежего заряда при  $V = \text{const}$

$$\mu C_{v_m}^c = 20,1 + 1,735 \cdot 10^{-3} \cdot T_c = 20,1 + 1,735 \cdot 10^{-3} \cdot 989,3 = 21,82 \text{ кДж} / (\text{к.моль} \cdot \text{K})$$

ж) средняя к.мольная теплоемкость продуктов сгорания при  $P = \text{const}$

$$\begin{aligned} \mu C_{p_m}^z &= 8,314 + \left( 20 + \frac{0,92}{\alpha} \right) + \left( \frac{13,8}{\alpha} + 15,45 \right) \cdot 10^{-4} \cdot T_z = \\ &= 8,314 + \left( 20 + \frac{0,92}{1,8} \right) + \left( \frac{13,8}{1,8} + 15,45 \right) \cdot 10^{-4} \cdot T_z = 28,825 + 23,117 \cdot 10^{-4} \cdot T_z \end{aligned}$$

з) температура конца сгорания (по уравнения сгорания)

$$\begin{aligned} \frac{\xi Q_H}{L(1 + \gamma)} + (\mu C_{v_m}^c + 8,314 \cdot \lambda) \cdot T_c &= \beta \cdot \mu C_{p_m}^z \cdot T_z \\ \frac{0,8 \cdot 42500}{0,9(1 + 0,0396)} &= (21,82 + 8,314 \cdot 1,6) \cdot 989,3 = 1,0359(28,825 + 23,117 \cdot 10^{-4} \cdot T_z) \cdot T_z \end{aligned}$$

$$T_z = 2040 \text{ K}$$

(физический смысл имеет положительный корень)

и) давление конца сгорания

$$P_z = \lambda \cdot P_c = 1,6 \cdot 5,344 = 8,55 \text{ МПа}$$

к) степень предварительного расширения

$$\rho = \frac{\beta}{\lambda} \cdot \frac{T_z}{T_c} = \frac{1,0359}{1,6} \cdot \frac{2040}{989,3} = 1,335$$

#### 4 Процесс расширения

а) степень последующего расширения

$$\delta = \frac{\varepsilon}{\rho} = \frac{15}{1,335} = 11,236$$

б) температура в конце расширения

$$T_e = \frac{T_z}{\delta^{n_2-1}} = \frac{2040}{11,236^{1,25-1}} = 1114 \text{ К}$$

в) давление в конце расширения

$$P_e = \frac{P_z}{\delta^{n_2}} = \frac{8,55}{11,236^{1,25}} = 0,4156 \text{ К}$$

## II. ИНДИКАТОРНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ РАБОТЫ ДВИГАТЕЛЯ

а) теоретическое среднее индикаторное давление

$$\begin{aligned} p'_i &= \frac{P_c}{\varepsilon - 1} \left[ \lambda(\rho - 1) + \frac{\lambda \cdot \rho}{n - 1} \left( 1 - \frac{1}{\delta^{n_2-1}} \right) - \frac{1}{n - 1} \left( 1 - \frac{1}{\varepsilon^{n_1-1}} \right) \right] = \\ &= \frac{5,344}{15 - 1} \left[ 1,6(1,335 - 1) + \frac{1,6 \cdot 1,335}{1,25 - 1} \left( 1 - \frac{1}{11,236^{1,25-1}} \right) - \frac{1}{1,36 - 1} \left( 1 - \frac{1}{15^{1,36-1}} \right) \right] = 1,024 \text{ МПа} \end{aligned}$$

б) действительное среднее индикаторное давление

$$p_i = \varphi \cdot p'_i = 0,95 \cdot 1,024 = 0,973 \text{ МПа}$$

в) индикаторный коэффициент полезного действия

$$\eta_i = 8,314 \frac{L(1 + \gamma) \cdot T_c (\varepsilon - 1) \cdot p_i}{p_c \cdot Q_H} = 8,314 \frac{0,9(1 + 0,0396) \cdot 989,3(15 - 1) \cdot 0,973}{5,344 \cdot 42500} = 0,462$$

г) индикаторный удельный расход топлива

$$g_i = \frac{3600}{\eta_i \cdot Q_n} = \frac{3600}{0,462 \cdot 42500} = 0,183 \text{ кг} / (\text{кВт} \cdot \text{ч})$$

д) индикаторная мощность

$$N_i = \frac{P_i \cdot V_h \cdot n \cdot i}{120} = \frac{0,973 \cdot 1,525 \cdot 6}{120} = 155,8 \text{ кВт}$$

### III. ЭФФЕКТИВНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ РАБОТЫ ДВИГАТЕЛЯ

а) среднее эффективное давление

$$P_e = \eta \cdot P_i = 0,8 \cdot 0,973 = 0,778 \text{ МПа}$$

б) эффективный коэффициент полезного действия

$$\eta_e = \eta_i \cdot \eta_m = 0,462 \cdot 0,8 = 0,37$$

в) эффективный удельный расход топлива

$$g_e = \frac{g_i}{\eta_m} = \frac{0,183}{0,8} = 0,229 \text{ кг} / (\text{кВт} \cdot \text{ч})$$

г) эффективная мощность двигателя

$$N_e = N_i \cdot \eta_m = 155,8 \cdot 0,8 = 124,6 \text{ кВт}$$

Заявленная заводом-изготовителем эффективная мощность  $N_e = 121$  кВт на 2% меньше расчетной, а удельный эффективный расход топлива на 5% меньше расчетного.

д) часовой расход топлива

$$G_{\text{ч}} = g_e \cdot N_e = 0,229 \cdot 124,6 = 28,53 \text{ кг} / \text{час}$$

Эту величину можно рассчитать по расходу воздуха и действительному количеству воздуха для сгорания 1 кг топлива.

### IV РАСХОДЫ ВОЗДУХА И ТОПЛИВА

а) секундный массовый расход воздуха

$$G_{\text{к}} = 22,9 \cdot \frac{P_{\text{к}}}{T_{\text{к}}} = D^2 \cdot S \cdot \eta_v \cdot i \cdot n = 22,9 \cdot \frac{0,15}{345} \cdot 0,13^2 \cdot 0,115 \cdot 0,855 \cdot 6 \cdot 2100 = 0,2085 \text{ кг} / \text{с}$$

б) секундный массовый расход топлива

$$B_c = \frac{G_k}{29 \cdot L} = \frac{0,2085}{29 \cdot 0,9} = 7,988 \cdot 10^{-3} \text{ кг / с}$$

в) часовой расход топлива

$$G_{\text{ч}} = 3600 \cdot B_c = 3600 \cdot 7,988 \cdot 10^{-3} = 28,75 \text{ кг / час}$$

г) цикловой расход топлива одной секцией

$$B_{\text{ц}} = 120 \frac{B_c}{i \cdot n} = 120 \frac{7,988 \cdot 10^{-3}}{6 \cdot 2100} = 0,076 \cdot 10^{-3} \text{ кг / цикл} =$$

$$= 0,076 \text{ г / цикл} = 0,0916 \text{ см}^3 / \text{цикл}$$

д) расход топлива за 200 впрысков одной секцией на дизеле

$$B_{200} = 200 \cdot B_{\text{ц}} = 200 \cdot 0,0916 = 18,31 \text{ см}^3 / 200 \text{ циклов}$$

#### V. ВЛИЯНИЕ ПОДАЧИ ТОПЛИВА НА ЭФФЕКТИВНУЮ МОЩНОСТЬ

Так как при регулировании насоса на стенде впрыск осуществляется в атмосферу, а при работе дизеля – в среду сжатого воздуха с давлением близким к 50 атм, то цикловая подача на дизеле будет меньше, чем на стенде. При регулировке форсунок на давление 175 атм перепад давлений при впрыскивании на стенде будет 174 атм, а на дизеле 125 атм. Так как расход топлива приближенно пропорционален квадратному корню из перепада давлений, то соотношение в расходах

на стенде и дизеле будет пропорционально  $\sqrt{\frac{174}{125}} = 1,179$ . Поэтому расход за 200

впрысков на дизеле в пересчет на стендовый расход будет равен  $B_{200} \cdot 1,179 = 18,31 \cdot 1,179 = 21,6 \text{ см}^3$ , что хорошо согласуется с опытными данными для нового топливного насоса.

Для определения влияния величины подачи топлива на эффективную мощность двигателя расчетным путем следует предварительно пересчитать данные по подачам, полученные на регулировочном стенде, на подачи топлива на дизеле, для чего следует разделить на 1,179.

Ниже для примера приведен расчет эффективной мощности для номинальной подачи  $18,4 \text{ см}^3$  за 200 циклов, приведенной в таблице 5.5 (после 1500 мото-

часов). (Примечание: согласно регулировочным данным для дизеля СМД-62 величину номинальной подачи следует определять при частоте 1050 об/мин, а не 950 об/мин).

Величина подачи за 200 циклов в пересчете на дизель

$$а) B_{200} = 18,4 / 1,179 = 15,6 \text{ см}^3$$

б) подача за цикл составляет

$$B_{ц} = \frac{15,6}{200} = 0,078 \text{ см}^3 \text{ цикл} = 0,078 \cdot 0,83 = 0,0647 \text{ г / цикл}$$

(плотность топлива  $\rho_T = 0,83 \text{ г/см}^3$ )

в) секундный массовый расход топлива

$$B_c = B_{ц} \cdot \frac{n \cdot i}{2 \cdot 60} = 0,0647 \frac{2100}{120} = 6,794 \text{ г / с} = 6,794 \cdot 10^{-3} \text{ кг / с}$$

г) действительное количество воздуха для сгорания 1 кг топлива в кмоль/кг

$$L = \frac{G_{\kappa}}{29 \cdot B_c} = \frac{0,2085}{29 \cdot 6,794 \cdot 10^{-3}} = 1,058 \text{ кмоль / кг}$$

д) коэффициент избытка воздуха

$$\alpha = \frac{L}{L_o} = \frac{1,058}{0,5} = 2,058$$

Далее повторяется расчет, начиная с пункта 1-3-в

$$M = L + \frac{H}{4} + \frac{O}{32} = 0,058 + \frac{0,133}{4} + \frac{0,01}{32} = 0,0916$$

$$\beta_o = \frac{M}{L} = \frac{1,0916}{1,058} = 1,032$$

$$\beta = \frac{\beta_o + \gamma}{1 + \gamma} = \frac{1,032 + 0,0396}{1 + 0,0396} = 1,03$$

$$\mu C_{v_m}^z = 21,82 \text{ кДж / (кмоль} \cdot \text{K)}$$

$$\begin{aligned}\mu C_{v_m}^z &= 8,314 + \left(20 + \frac{0,92}{\alpha}\right) + \left(\frac{13,8}{\alpha} + 15,45\right) \cdot 10^{-4} \cdot T_z = \\ &= 8,314 + \left(20 + \frac{0,92}{2,116}\right) + \left(\frac{13,8}{2,116} + 15,45\right) \cdot 10^{-4} \cdot T_z = 28,749 + 21,972 \cdot 10^{-4} \cdot T_z\end{aligned}$$

$$\frac{\xi Q_H}{L(1+\gamma)} + (\mu C_{v_m}^c + 8,314 \cdot 1,6) \cdot 989,3 = 1,03(28,749 + 21,972 \cdot 10^{-4} \cdot T_z) \cdot T_z$$

$$T_z = 1932K$$

$$P_z = \lambda \cdot P_c = 1,6 \cdot 5,344 = 8,55MPa$$

$$\rho = \frac{\beta}{\lambda} \cdot \frac{T_z}{T_c} = \frac{1,03}{1,6} \cdot \frac{1932}{989,3} = 1,257$$

$$\delta = \frac{\varepsilon}{\rho} = \frac{15}{1,257} = 11,933$$

$$T_\varepsilon = \frac{T_z}{\delta^{n_2-1}} = \frac{1932}{11,933^{1,25-1}} = 1039K$$

$$P_\varepsilon = \frac{P_z}{\delta^{n_2}} = \frac{8,55}{11,933^{1,25}} = 0,3856MPa$$

$$\begin{aligned}p'_i &= \frac{P_c}{\varepsilon-1} \left[ \lambda(\rho-1) + \frac{\lambda \cdot \rho}{n-1} \left(1 - \frac{1}{\delta^{n_2-1}}\right) - \frac{1}{n-1} \left(1 - \frac{1}{\varepsilon^{n_1-1}}\right) \right] = \\ &= \frac{5,344}{15-1} \left[ 1,6(1,257-1) + \frac{1,6 \cdot 1,257}{1,25-1} \left(1 - \frac{1}{11,933^{1,25-1}}\right) - \frac{1}{1,36-1} \left(1 - \frac{1}{15^{1,36-1}}\right) \right] = 0,915MPa\end{aligned}$$

$$p_i = \varphi \cdot p'_i = 0,95 \cdot 0,915 = 0,869MPa$$

$$\begin{aligned}\eta_i &= 8,314 \frac{L(1+\gamma) \cdot T_c (\varepsilon-1) \cdot p_i}{P_c \cdot Q_H} = \\ &= 8,314 \frac{0,058(1+0,0396) \cdot 989,3(15-1) \cdot 0,869}{5,344 \cdot 42500} = 0,485\end{aligned}$$

$$g_i = \frac{3600}{\eta_i \cdot Q_H} = \frac{3600}{0,485 \cdot 42500} = 0,175 \kappa z / (\kappa Bm \cdot \mu)$$

$$N_i = \frac{P_i \cdot V_h \cdot n \cdot i}{120} = \frac{0,869 \cdot 1,525 \cdot 6}{120} = 139 \kappa Bm$$

Среднее давление механических потерь  $P_m$  по данным предыдущего расчета

$$P_m = P_i - P_c = 0,973 - 0,788 = 0,195 \text{ МПа}$$

Оно остается неизменным при изменении подачи топлива, поэтому в новом расчете

$$P_e = P_i - P_m = 0,869 - 0,195 = 0,674 \text{ МПа}$$

При этом механический к.п.д. равен:

$$\eta_m = \frac{P_e}{P_i} = \frac{0,674}{0,869} = 0,776$$

$$\eta_e = \eta_i \cdot \eta_m = 0,485 \cdot 0,776 = 0,376$$

$$g_e = \frac{g_i}{\eta} = \frac{0,175}{0,776} = 0,226 \text{ кг} / (\text{кВт} \cdot \text{ч})$$

$$N_e = N_i \cdot \eta_m = 139 \cdot 0,776 = 107,9 \text{ кВт}$$

Аналогично определяется эффективная мощность двигателя при других подачах топлива.

В данном частном случае снижение мощности оказалось в процентах примерно равным снижению подачи. Будет ли так при других подачах, следует проверить.

Предлагаемым способом можно построить графики изменения мощности и удельного расхода топлива в зависимости от подачи для всех рассматриваемых вариантов.

Следует отметить, что приведенный метод расчета не является достаточно точным, т.к. уменьшение подачи, а следовательно и температуры  $T_v$  уменьшается к.п.д. турбокомпрессора, а следовательно и давление наддува  $P_k$ . Расчеты показали, что в рассматриваемом примере это снижение невелико.

## Результаты теплового расчёта двигателя СМД-60

	Приведенный удельный расход													
	I <sup>й</sup> ряд				II <sup>й</sup> ряд					III <sup>й</sup> ряд				
	22,00000	18,60000	16,00000	13,60000	20,40000	18,40000	15,60000	13,10000		21,30000	20,00000	18,00000	16,10000	
B200	18,65988	15,77608	13,57082	11,53520	17,30280	15,60645	13,23155	11,11111		18,06616	16,96353	15,26718	13,65564	
Bц	0,07744	0,06547	0,05632	0,04787	0,07181	0,06477	0,05491	0,04611		0,07497	0,07040	0,06336	0,05667	
Bс * 1000	8,13104	6,87443	5,91349	5,02646	7,53969	6,80051	5,76565	4,84167		7,87233	7,39186	6,65267	5,95045	
L	0,88422	1,04586	1,21581	1,43036	0,95357	1,05722	1,24698	1,48495		0,91328	0,97265	1,08072	1,20825	
alfa	1,76845	2,09171	2,43161	2,86072	1,90715	2,11445	2,49396	2,96991		1,82656	1,94529	2,16143	2,41651	
M	0,91779	1,07942	1,24937	1,46392	0,98714	1,09079	1,28054	1,51852		0,94684	1,00621	1,11428	1,24182	
beta0	1,03796	1,03209	1,02761	1,02346	1,03520	1,03175	1,02692	1,02260		1,03675	1,03451	1,03106	1,02778	
beta	1,03651	1,03087	1,02655	1,02257	1,03386	1,03054	1,02589	1,02174		1,03535	1,03319	1,02987	1,02672	
c	71733,73928	66017,54353	61646,33502	57611,37331	69043,76481	65681,29672	60973,84140	56770,75629		70556,87545	68371,27119	65008,80310	61814,45842	
a	0,00241	0,00227	0,00217	0,00207	0,00235	0,00226	0,00215	0,00205		0,00238	0,00233	0,00225	0,00217	
b	29,88700	29,64142	29,45424	29,28192	29,77132	29,62700	29,42548	29,24608		29,83637	29,74243	29,59818	29,46142	
Tz	2058,45244	1938,94063	1842,89692	1750,51937	2003,05221	1931,69828	1827,75213	1730,81332		2034,39626	1988,97027	1917,14146	1846,66758	
ro	1,34793	1,26276	1,19518	1,13087	1,30829	1,25764	1,18460	1,11723		1,33068	1,29826	1,24735	1,19782	
delta	11,12819	11,87877	12,55037	13,26414	11,46534	11,92715	12,66255	13,42605		11,27241	11,55394	12,02545	12,52272	
Tв	1127,02808	1044,41151	979,12221	917,26994	1088,54283	1039,45373	968,91792	904,19719		1110,27706	1078,81211	1029,50577	981,66669	
Pв	0,42066	0,38771	0,36195	0,33777	0,40526	0,38574	0,35794	0,33268		0,41395	0,40138	0,38180	0,36295	
P'i	1,04218	0,92335	0,82740	0,73463	0,98717	0,91613	0,81222	0,71478		1,01831	0,97316	0,90161	0,83117	
Pi	0,99007	0,87718	0,78603	0,69790	0,93781	0,87032	0,77161	0,67904		0,96739	0,92451	0,85653	0,78962	
eta i	0,46143	0,48355	0,50371	0,52616	0,47135	0,48498	0,50715	0,53148		0,46568	0,47396	0,48790	0,50286	
g i	0,18357	0,17518	0,16816	0,16099	0,17971	0,17466	0,16702	0,15938		0,18190	0,17872	0,17361	0,16845	
Ni	158,53534	140,45905	125,86280	111,75151	150,16643	139,36076	123,55452	108,73095		154,90337	148,03643	137,15215	126,43721	
Pe	0,79507	0,68218	0,59103	0,50290	0,74281	0,67532	0,57661	0,48404		0,77239	0,72951	0,66153	0,59462	
eta m	0,80304	0,77770	0,75192	0,72059	0,79207	0,77595	0,74728	0,71283		0,79843	0,78908	0,77234	0,75304	
eta e	0,37055	0,37605	0,37875	0,37915	0,37334	0,37632	0,37898	0,37885		0,37181	0,37399	0,37682	0,37868	
	0	750	1500	2250	0	750	1500	2250	3000	0	750	1500	2250	3000
gс	0,228596	0,225249	0,223647	0,223413	0,228596	0,226885	0,225091	0,223508	0,223586	0,228596	0,227822	0,226492	0,224788	0,223687
	0	750	1500	2250	0	750	1500	2250	3000	0	750	1500	2250	3000
Ne	127,31096	109,23467	94,63843	80,52713	127,31096	118,94206	108,13639	92,33014	77,50658	127,31096	123,67900	116,81206	105,92777	95,21283
gс/ Ne	0,00180	0,00206	0,00236	0,00277	0,00180	0,00191	0,00208	0,00242	0,00288	0,00180	0,00184	0,00194	0,00212	0,00235

Среднеарифметические начальные значения параметров  
испытываемых ТНВД

Параметр	Частота вращения, мин <sup>-1</sup>	Число циклов	Средняя подача, см <sup>3</sup>	Подача по штуцерам, см <sup>3</sup>	Неравномерность подачи, %
1	2	3	4	5	6
Пусковая подача	100	50	-	9,0...11,5	24,3
Подача коррекции	750 <sup>+50</sup> <sub>-20</sub>	200	25,3	25,3...27,5	8,3
Номинальная подача	950	200	22,0 ± 0,2	21,3...22,7	6,3

Среднеарифметические значения параметров испытываемых ТНВД,  
эксплуатируемых на топливе в состоянии поставки

1	2	3	4	5	6
750 моточасов					
Пусковая подача	100	50	-	7,2...10,0	32,5
Подача коррекции	750 <sup>+50</sup> <sub>-20</sub>	200	20,1	22,1...19,3	13,5
Номинальная подача	950	200	18,6	18,1...20,0	9,9
1500 моточасов					
Пусковая подача	100	50	-	5,9...8,4	34,9
Подача коррекции	750 <sup>+50</sup> <sub>-20</sub>	200	18,4	17,0...19,6	14,2
Номинальная подача	950	200	16,0	15,2...17,3	12,9
2250 моточасов					
Пусковая подача	100	50	-	6,0...9,0	40
1	2	3	4	5	6
Подача коррекции	750 <sup>+50</sup> <sub>-20</sub>	200	15,7	14,1...16,8	17,4
Номинальная подача	950	200	13,6	12,3...14,7	17,7

Среднеарифметические значения параметров ТНВД, эксплуатируемых  
на топливе с предварительным отстаиванием  
и фильтрацией через бумажные фильтры.

1	2	3	4	5	6
750 моточасов					
Пусковая подача	100	50	-	8,3...10,8	26,1
Подача коррекции	750 <sup>+50</sup> <sub>-20</sub>	200	23,5	22,3...24,7	10,2
Номинальная подача	950	200	20,4	19,7...21,1	6,8
1500 моточасов					
Пусковая подача	100	50	-	7,4...10,1	30,8
Подача коррекции	750 <sup>+50</sup> <sub>-20</sub>	200	20,3	19,2...22,0	13,6
Номинальная подача	950	200	18,4	18,0...20,1	11
2250 моточасов					
Пусковая подача	100	50	-	5,7...8,4	38,2
Подача коррекции	750 <sup>+50</sup> <sub>-20</sub>	200	17,8	16,8...19,5	14,8
Номинальная подача	950	200	15,6	15,1...17,4	14,1
3000 моточасов					
Пусковая подача	100	50	-	5,2...8,2	44,7
Подача коррекции	750 <sup>+50</sup> <sub>-20</sub>	200	15,2	13,6...16,2	17,4
Номинальная подача	950	200	13,1	11,8...14,2	18,4

Среднеарифметическое значение параметров испытуемых ТНВД,  
эксплуатируемых на топливе, очищенном  
электростатическим фильтром.

1	2	3	4	5	6
750 моточасов					
Пусковая подача	100	50	-	8,8...11,4	25,7
Подача коррекции	750 <sup>+50</sup> <sub>-20</sub>	200	24,5	23,2...25,3	8,6
Номинальная подача	950	200	21,3	20,5...22,2	7,9

Продолжение таблицы

1	2	3	4	5	6
1500 моточасов					
Пусковая подача	100	50	-	8,1...10,9	29,4
Подача коррекции	750 <sup>+50</sup> <sub>-20</sub>	200	22,8	21,2...24,6	14,8
Номинальная подача	950	200	20,0	19,1...21,2	10,4
2250 моточасов					
Пусковая подача	100	50	-	7,2...10,2	34,4
Подача коррекции	750 <sup>+50</sup> <sub>-20</sub>	200	20,2	18,2...21,9	18,4
Номинальная подача	950	200	18,0	17,1...19,8	14,6
3000 моточасов					
Пусковая подача	100	50	-	5,8...8,3	35,4
Подача коррекции	750 <sup>+50</sup> <sub>-20</sub>	200	18,2	16,2...19,9	20,4
Номинальная подача	950	200	16,1	15,0...17,8	17

**ПРИЛОЖЕНИЕ Е**  
**ПАТЕНТЫ УКРАИНИ**