

На правах рукописи

АЛ-ЖАВХАР Али Еззат Махди

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ
ДИЗЕЛЕЙ Д-240 ПО РЕЗУЛЬТАТАМ АНАЛИЗА
СОСТАВА ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ**

Специальность: 4.3.1. Технологии, машины и оборудование для АПК

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Москва — 2026

Работа выполнена на кафедре эксплуатации машинно-тракторного парка ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева».

Научный руководитель: **Дидманидзе Ремзи Назирович**,
кандидат экономических наук, доцент,
доцент кафедры эксплуатации машинно-тракторного парка ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева».

Официальные оппоненты: **Таркинский Виталий Евгеньевич**
доктор технических наук, профессор, врио
директора Новокубанского филиала ФГБНУ
«Российский научно-исследовательский
институт информации и технико-экономических исследований по инженерному обеспечению агропромышленного комплекса» (КубНИИТиМ);

Юденичев Андрей Николаевич
кандидат технических наук, старший научный
сотрудник 231 научно-исследовательской
лаборатории 23 научно-исследовательского
отдела ФАУ «25-й ГосНИИ химмотологии
Минобороны России»

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Рязанский государственный
агротехнологический университет имени
П. А. Костычева»

Защита диссертации состоится 15.10.26 в 10⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета 35.2.030.03 на базе ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева» по адресу: 127434, Москва, ул. Прянишникова, д. 19, тел./факс: +7(499)976-17-14.

Юридический адрес для отправки почтовой корреспонденции (отзывов): 127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49.

С диссертацией можно ознакомиться в Центральной научной библиотеке имени Н. И. Железнова ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева» и на сайте университета www.timacad.ru.

Автореферат разослан _____.

Ученый секретарь диссертационного совета, кандидат технических наук, доцент

Пуляев Николай Николаевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Повышение коэффициента готовности самоходной сельскохозяйственной техники (мобильных энергетических средств, МЭС) достигается в первую очередь за счёт повышения качества выполнения мероприятий технического сервиса, проводимых в рамках планово-предупредительной и перспективных стратегий ТО и ремонта.

Исследования показывают, что достижению данной задачи может способствовать широкое внедрение оперативной диагностики на всех видах ТО вплоть до ежедневного, поскольку первым шагом к выявлению возможных скрытых и развивающихся неисправностей является мониторинг параметров работы МЭС.

Одним из таких параметров является состав выхлопных газов двигателя: очевидно, что изменение параметров рабочего процесса ДВС влияет на содержание различных элементов в отработавших газах (ОГ).

Несмотря на то, что данный вывод очевиден, теоретический и практический задел в использовании состава отработавших газов как диагностического показателя, как показывает анализ литературы, практически отсутствуют, что указывает на актуальность выполнения исследований в данной области.

Степень разработанности темы. Решением проблем технического обеспечения агропромышленного комплекса занимается большое количество научных и научно-педагогических специалистов, среди которых можно выделить выдающихся деятелей науки, таких, как сотрудники РГАУ–МСХА *О.Н. Дидманидзе, М.Н. Ерохин, А.Г. Левшин.*

Диагностика поршневых ДВС опирается на методологию и технические средства, заложенные *В.М. Михлиным, В.И. Бельских, В.И. Черноивановым, В.А. Аллилуевым.* Большой вклад в данную сферу внесли и продолжают вносить *С.Н. Девянин, Ю.В. Катаев, В.А. Чечет, А.В. Дунаев, А.Г. Арженковский, Д.И. Петровский* и их последователи, в частности, в РГАУ–МСХА: *В.В. Егоров, А.В. Бижаев, В.Н. Щукина.*

Несмотря на имеющийся потенциал, исследование состава отработавших газов дизеля именно как диагностического показателя присуще в основном "гаражным мастерам"; в научном сообществе данный подход представлен незаслуженно слабо, опираясь на единичные публикации, например, *В.Н. Ложкина* и *А.И. Фомичева.* Настоящая работа призвана заложить теоретические и технологические основы для дальнейшего использования анализа выхлопных газов дизелей в диагностических целях.

Цель исследования: оценить возможность использования состава отработавших газов для оценки технического состояния тракторных дизелей.

Для достижения поставленной цели необходимо решение следующих задач

1. Подтвердить или опровергнуть применимость диагностирования по составу отработавших газов для дизелей.
2. Определить, какой режим работы двигателя позволяет достичь наибольшей стабильности и воспроизводимости результатов измерения состава отработавших газов.
3. Разработать методику диагностирования дизеля по составу отработавших газов, в том числе алгоритм преобразования количественных диагностических показателей в вероятностные; сконструировать необходимую оснастку.
4. Выявить компоненты отработавших газов, концентрация которых даёт информацию о состоянии дизеля.
5. Провести экономическое обоснование предлагаемой технологии.

Научная новизна работы: получена методика оценки технического состояния дизеля по концентрации компонентов отработавших газов на режимах холостого хода, в том числе при дросселировании впуска.

Практическая значимость: разработан метод для оперативной дифференциальной оценки состояния дизеля и его отдельных узлов без разборки.

Методы исследований включают в себя: математическое моделирование для обоснования требуемых режимов работы дизеля при диагностировании, а позже — при определении экономического эффекта; планирование и реализация эксперимента по измерению состава отработавших газов; автоматизированный статистический анализ экспериментальных данных.

Объект исследования: оценка технического состояния дизелей сельскохозяйственных МЭС по составу отработавших газов

Предмет исследования: методы и средства оценки технического состояния дизелей сельскохозяйственных МЭС, основанные на анализе выхлопных газов; их достоверность, точность постановки диагноза и технологические показатели (трудоемкость, себестоимость и т. д.)

Рабочая гипотеза: исследование выхлопных газов дизельного двигателя (в том числе с применением машинного анализа полученных данных) позволяет выявлять неисправности в оперативном режиме без вмешательства в конструкцию.

Научные положения диссертации:

1. Обзор литературных источников и научно-практического опыта показал, что анализ состава выхлопных газов дизельного двигателя в диагностических целях, несмотря на очевидный потенциал, слабо раскрыт в научной литературе и в основном ограничен опытом энтузиастов-практиков.
2. Разработана и проверена методика диагностирования дизеля по составу отработавших газов на различных установившихся режимах холостого хода: установлено, что только установившийся режим способен дать точный и воспроизводимый результат.
3. Выявлена прямая корреляция между неисправностью форсунки и содержанием оксидов азота в отработавших газах. Показано, что дросселирование воздуха на впуске позволяет повысить чувствительность оценки изношенности двигателя по содержанию NOx и CO .

На защиту выносятся:¹

1. Алгоритм определения вероятностей конкретных неисправностей при конкретных диагностических показателях, используемых для дальнейшей работы экспертной системы;
2. Результаты экспериментов по выявлению значащих показателей состава выхлопных газов дизельного двигателя, способных дать представление о техническом состоянии двигателя;

¹Соотв. страницы 9, 12, 15

3. Разработанное мобильное рабочее место и технология диагностирования дизельных двигателей сельскохозяйственных МЭС по показателям состава выхлопных газов.

Достоверность результатов исследования подтверждается результатами математической обработки экспериментальных данных при помощи существующих и авторских аналитических программ, а также высокой чувствительностью задействованных методов для выявления неисправностей топливной аппаратуры и изношенности двигателя.

Апробация работы.

Результаты исследований доложены на следующих конференциях:

- Международная научная конференция молодых учёных и специалистов, посвящённая 150-летию со дня рождения А.Я. Миловича (Москва, 2024);
- Чтения академика В.Н. Болтинского: научно-практическая конференция, посвящённая 90-летию Шарова Николая Михайловича (Москва, 2024);
- Чтения академика В.Н. Болтинского: научно-практическая конференция, посвящённая 160-летию РГАУ–МСХА и 115-летию кафедры тракторов и автомобилей.

По результатам исследования опубликовано 5 научных работ, из них 3 в изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

Автор выражает свою искреннюю благодарность:

- коллективу кафедры "Эксплуатация машинно-тракторного парка" РГАУ–МСХА, в том числе, научному руководителю Р. Н. Дидманидзе и научному консультанту В. В. Егорову за руководство на всех этапах выполнения диссертационной работы;
- сотрудникам кафедры "Тракторы и автомобили" РГАУ–МСХА за всестороннюю помощь в проведении экспериментальных исследований;

Примечания. В ряде публикаций двигатель задействованного трактора Агромаш-85ТК был ошибочно указан как Д-144 вместо Д-145Т.

Объём диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и приложений. Общий объём диссертации 152 страницы, основного текста — 119 страниц, имеется 76 рисунков, 13 таблиц, список литературы из 108 наименований.

Основное содержание работы

Введение содержит краткую сводку о характере работы, её содержании и основных положениях.

В первой главе диссертации рассмотрены вопросы формирования состава отработавших газов, технической эксплуатации тракторов и методов их диагностирования.

Обеспечение бесперебойной работы машинно-тракторного парка невозможно без развитой системы технического сервиса, которая, не в последнюю очередь, должна опираться на информацию о состоянии двигателя как наиболее энергонасыщенного узла.

Методологические основы технического диагностирования ДВС заложены ещё в СССР *В.М. Михлиным, В.И. Бельских, В.И. Черноивановым, В.А. Аллилуевым*, что привело к появлению нескольких научных школ.

В РГАУ–МСХА вопросами безаварийной эксплуатации МТП занимаются кафедры «Эксплуатация машинно-тракторного парка» и «Тракторы и автомобили», в частности, *О.Н. Дидманидзе, А.Г. Левшин, А.Г. Арженовский*. Технические средства диагностирования и сервиса поршневых двигателей здесь исследовались и исследуются такими учёными, как *В.А. Чечет, С.Н. Девянин, Ю.В. Катаев, Д.И. Петровский, А.В. Бижаев, В.В. Егоров, В.Н. Щукина*.

Также следует выделить исследователей из других организаций, внёсших свой вклад в методологию и аппаратное обеспечение диагностики ДВС: *А.В. Дунаев, П.М. Черейский и А.А. Соломашкин* (ГОСНИТИ/ВИМ), *В.И. Беляев* (Алтайский ГАУ), *В.З. Какоткин и И.И. Лобанов* (МИИТ/РУТ), *Б.Г. Мартынов* (СПбГАУ).

Применение состава отработавших газов как диагностического показателя, несмотря на значительный потенциал, рассматривается в прямом смысле единицами исследователей. *В.Н. Ложкин и А.И. Фомичев* в своих исследованиях показывают возможности данного метода. В настоящей диссертации задействована совершенно иная методология (статические режимы работы вместо динамических), что позволяет достичь более точных результатов измерения.

Выводы по первой главе представляются следующими. Анализ состава отработавших газов дизелей в настоящее время выполняется главным образом для получения показателей экологичности и эффективности, но не для диагностирования. В связи с этим, следует исследовать актуальность диагностирования дизелей по составу отработавших газов.

Вторая глава диссертации описывает теоретические изыскания, проведённые для конкретизации требований, предъявляемых к диагностированию дизельных ДВС по показателям состава отработавших газов.

В первую очередь, путём математического моделирования показана недостаточная точность метода измерения состава ОГ при помощи эластичной ёмкости на переходных режимах работы дизеля.

В качестве основы для математической модели использованы полученные при помощи ИМДЦ-2 характеристики разгона, в дальнейшем обрабатываемые скриптами на Python для приведения к шагу 50 мс и имитации затухающих колебаний. На рис. 1 показана полученная базовая модель многократного разгона двигателя.

Вычисления проводятся на примере концентрации абстрактного компонента R . В первом приближении принято, что R пропорциональна частоте n_d вращения вала дизеля и его угловому ускорению ε :

$$R = K_{Rn} \cdot n + K_{R\varepsilon} \cdot \varepsilon,$$

где K_{Rn} и $K_{R\varepsilon}$ — масштабные коэффициенты для соответственно n_d и ε .

С учётом всех действующих факторов получено выражение для итоговой концентрации компонента R в эластичной камере:

$$R_v(t) = t^{-1} \int_{\tau=0}^t R(\tau) \cdot \frac{n_d(\tau)}{\overline{n_d}} \cdot d\tau \quad (1)$$

Дальнейшее математическое моделирование при варьировании входных параметров показывает, что даже небольшая разница в управлении подачей топлива способна исказить результаты, что неприемлемо (рис. 2).

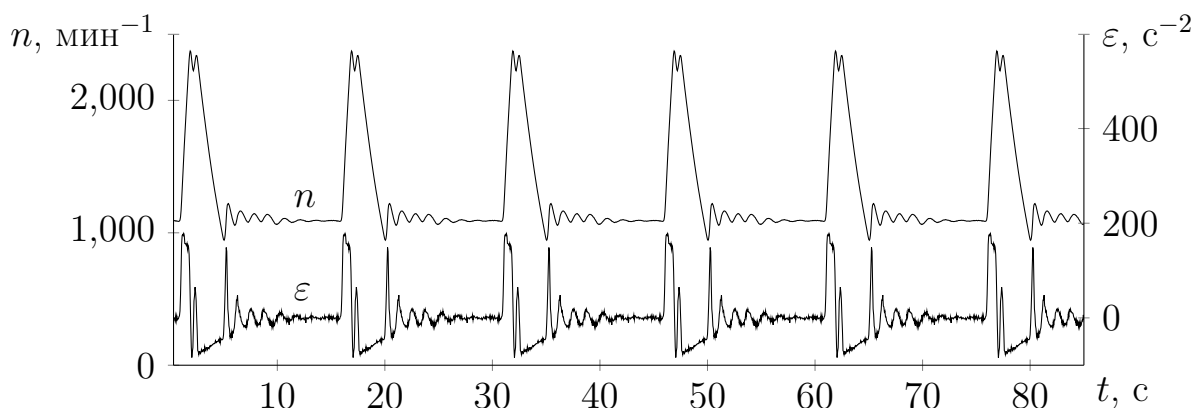


Рисунок 1 — Базовая модель многократного разгона

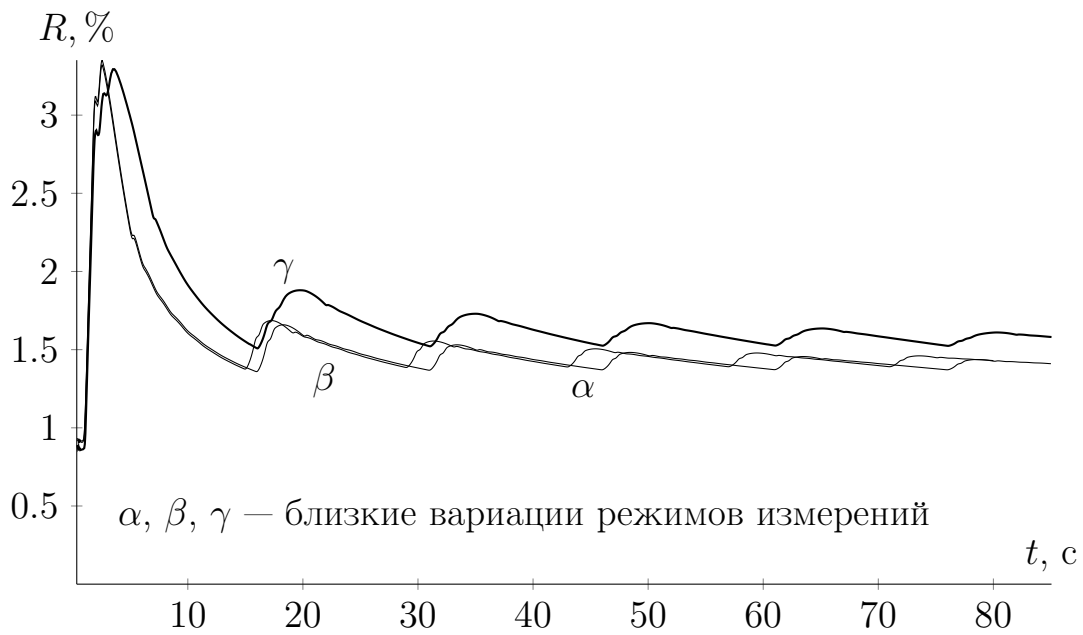


Рисунок 2 — Варьирование показателей при режиме динамической нагрузки

В то же время, диагностирование при постоянной частоте вращения коленчатого вала позволяет добиться стабильных результатов при условии соблюдения принципов работы с газоанализатором.

Следующий раздел второй главы описывает принцип учёта числовых данных от оперативного диагностирования в экспертной системе (кроссплатформенное компьютерное приложение) авторства научного консультанта В.В. Егорова. Данная система представляет собой модуль искусственного интеллекта, не требующий больших вычислительных мощностей для работы. Система предоставляет список возможных неисправностей при введённых признаках, а также рекомендации по их устранению.

Диагностические данные также могут быть рассмотрены в качестве признака, для этого необходимо перевести их в формат нечёткой логики (т.н. процесс фаззификации от англ. *fuzzy logic*), используя аппроксимацию математическими уравнениями. В разделе 2.2 расширен имеющийся задел в данной области и представлен улучшенный алгоритм аппроксимации.

Разработан скрипт на Python, позволяющий автоматически исследовать сколь угодно большой список математических уравнений с полученными коэффициентами детерминации R^2 с целью нахождения оптимума между точностью, простотой и универсальностью. По результатам анализа наиболее результативной показала себя сигмоидная функция 2, применяемая, в том числе, в нейросетевых алгоритмах. На рис. 3 показано, как изменение коэффициента a сигмоиды влияет на её поведение.

$$y = 1 / (1 + \exp(-a \cdot (x - b))) \quad (2)$$

Эмпирическим путём при помощи аппроксимации средствами Python (пакет `scipy`) определено оптимальное значение коэффициента a (соответствующее сплошной линии на рис. 3), вычисляемое по формуле 3.

$$a = 8 \cdot (y_{\max} - y_{\min}) / (x_{\max} - x_{\min}) \quad (3)$$

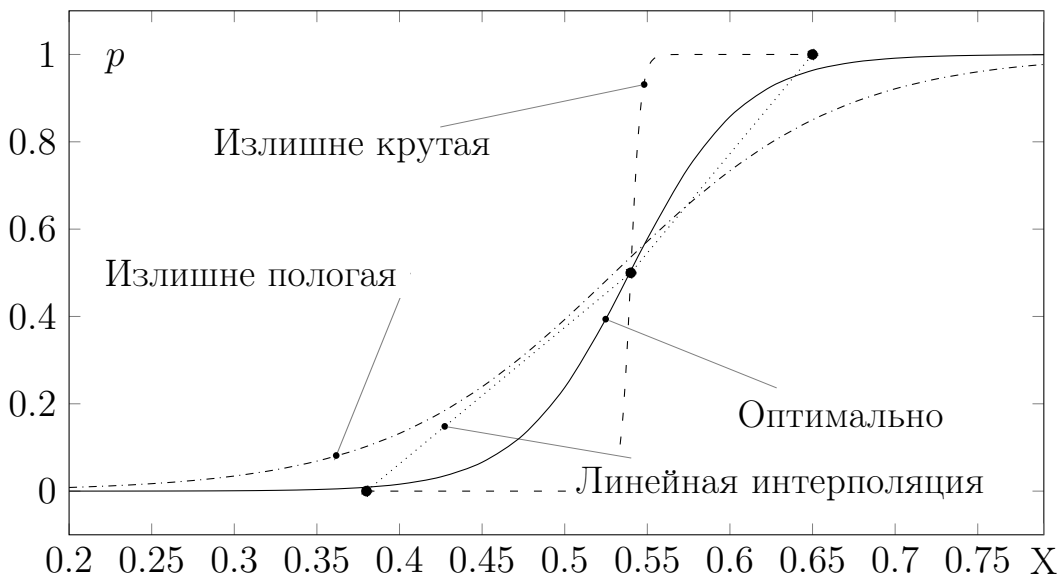


Рисунок 3 — Итоговые сигма-функции

Резюмируя содержание *второй главы*, можно выделить следующие *выводы*:

1. Теоретически обосновано, что именно на установившихся режимах холостого хода достигается наибольшая точность измерения состава отработавших газов.
2. Разработан и задействован алгоритм аппроксимации числовых данных схожего характера.
3. На базе данного алгоритма обосновано применение экспоненциального сигма-перехода для преобразования диагностических показателей в вероятностные.

В третьей главе приведены сведения о методологии экспериментальной работы, объектах исследования и задействованном оборудовании. Измерения базируются на двух приборах (рис. 4 соответственно): пятикомпонентном газоанализаторе Инфракар 5М2.01 и измерительном комплексе ИМДЦ-2.

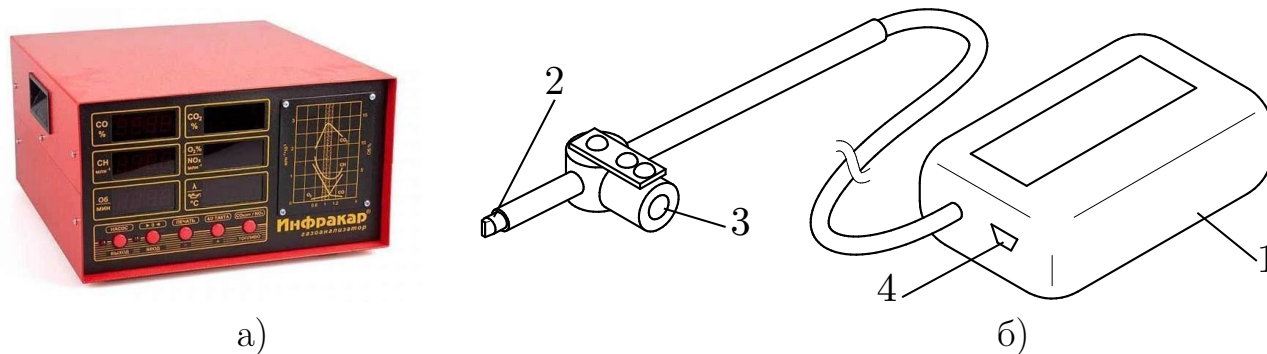


Рисунок 4 — Задействованное оборудование

а) газоанализатор Инфракар 5M2.01; б) комплекс ИМДЦ-2, где: 1 – АЦП, 2 – датчик, 3 – крепление, 4 – USB-порт

Используемый газоанализатор способен измерять концентрацию следующих компонентов: оксида углерода (угарный газ) CO , диоксида углерода CO_2 , углеводородов CH , кислорода O_2 и оксидов азота NOx .

Комплекс ИМДЦ-2 предназначен для определения динамических показателей двигателей (как поршневых, так и электрических); здесь же задействован главным образом в роли цифрового тахометра: простота установки датчика и ответной части позволяют использовать его в полевых условиях.

В качестве объектов эксперимента фигурируют:

— Для эксперимента 1 задействован дизель Д-240 1989 года выпуска со значительным износом и сниженной вследствие этого мощностью (45 кВт против номинальной 55).

Сутью эксперимента является измерение состава отработавших газов при исправных форсунках и при *внесённой неисправности*, вызывающей чрезмерную подачу топлива (что в условиях реальной эксплуатации может наблюдаться при снижении гидроплотности сопряжения игла–распылитель, подклинивании иглы, изломе пружины). Суть имитации неисправности заключается в снижении давления подъёма иглы форсунки с номинальных 18 до 10 МПа.

— Эксперимент 2 использует дросселирование воздуха на впуске в двигатель как диагностический тест, при этом все остальные системы двигателя отрегулированы, и на результат измерений влияет только их фактическое состояние. Дросселирование воздуха позволяет усилить влияние неисправностей на состав ОГ за счёт принудительного снижения коэффициента избытка воздуха.

Для точного дросселирования разработано и изготовлено устройство, представляющее собой насадку для впускной трубы воздушного фильтра дизеля Д-240 с восемью сегментными отверстиями 200 мм^2 и восемью 50 мм^2 , за-

крываемыми заглушками. Наиболее оптимальный режим дросселирования достигается при сечении 600 мм^2 .

Прототип дросселирующего устройства не слишком удобен для постоянного применения, поэтому предлагается использовать вариант, представленный на рис. 5, с отверстием диаметром 28 мм.

Задействованы двигатели Д-240: "А" с незначительным износом, "Б" с большой наработкой и низкими показателями работы ТНВД; также в качестве источника дополнительных данных использован дизель Д-145Т трактора Агромаш-85ТК, для которого дросселирование не проводилось.

Методология экспериментов наследует классический алгоритм и заключается в измерении состава отработавших газов в установившемся режиме на хаотично выбираемых из установленной градации частотах вращения коленчатого вала. Эксперимент продолжается до тех пор, пока не будет достигнуто заданное число повторностей для каждой градации.

Аппроксимация экспериментальных данных, необходимая для дальнейшей обработки, производится при помощи расширенной версии задействованного ранее скрипта.

Итогом *третьей главы* является представленная методика для дальнейших экспериментов.

В четвёртой главе приведены результаты экспериментальных исследований и их анализ.

Эксперимент 1 показал (рис. 6), что неисправность даже одной форсунки приводит к кратному росту показателей NOx : порядка 3х (с 60 до 240 ppm) при низкой частоте вращения вала и 1.5х (со 150 до 230 ppm) при высокой. Остальные компоненты не проявили значительных изменений.

Результаты эксперимента 2 следующие.

Для менее изношенного дизеля показатели NOx при дросселировании снижаются (с 80 до 30 ppm при $n_d = 1800$) (рис. 7), а у двигателя с большой наработкой — возрастают (со 150 до 300 ppm при $n_d = 1800$) (рис. 8) по мере роста n_d ; при этом характеристика для нового двигателя является убывающей, а для изношенного — восходящей.

Концентрация CO , напротив, является возрастающей (рис. 9) у нового двигателя против убывающей (рис. 10) у изношенного. При этом дросселирование воздуха на впуске приводит к значительно большему увеличению показателей при высоких n_d , чем у изношенного двигателя.

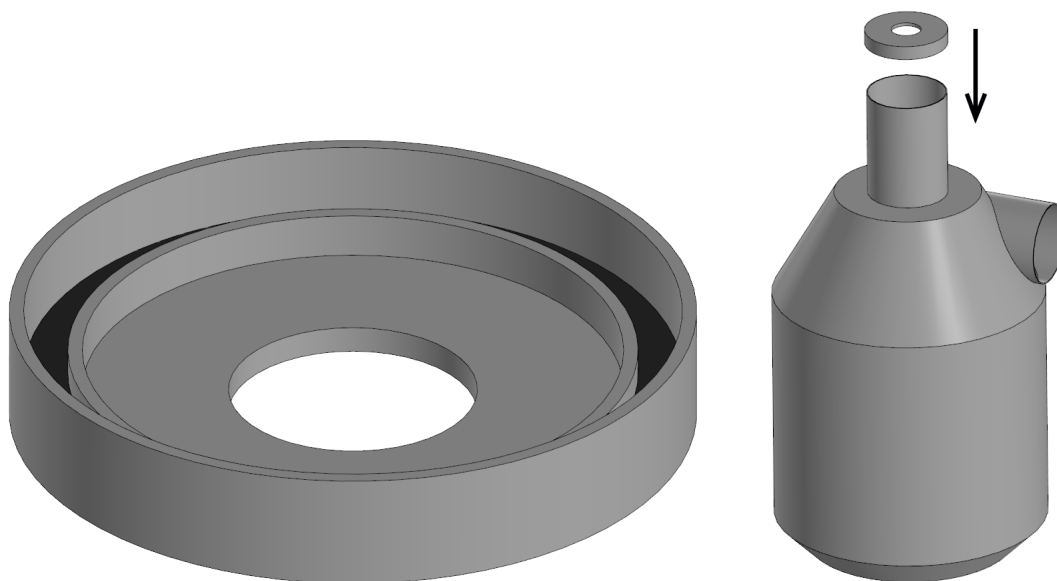


Рисунок 5 — Дросселирующее устройство и его установка

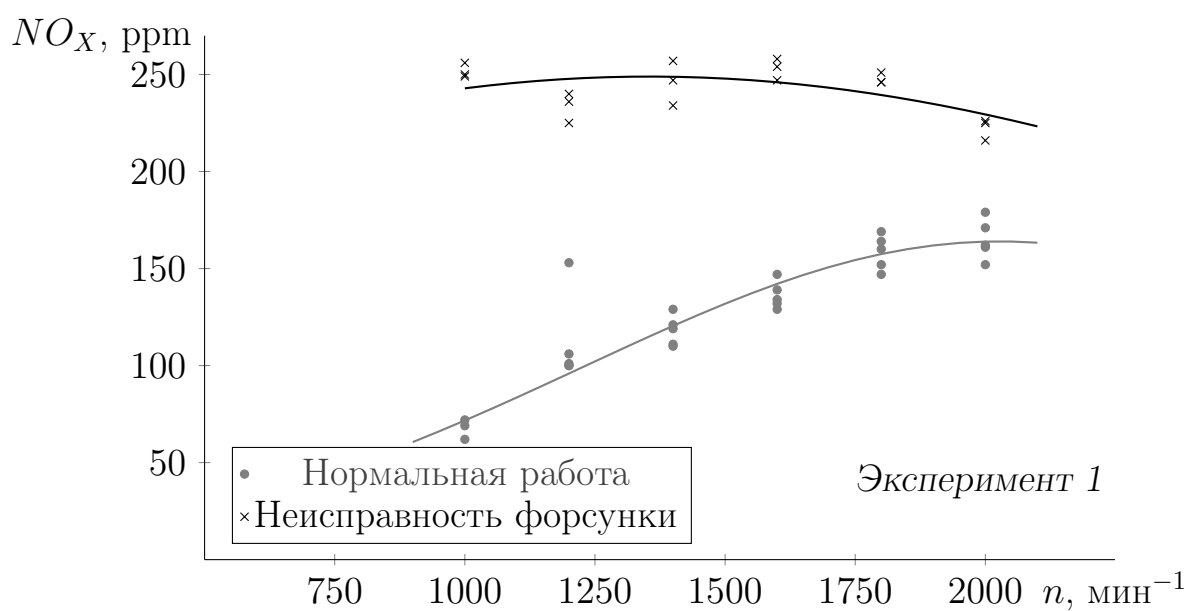


Рисунок 6 — Влияние переизбытка топлива на концентрацию NO_x

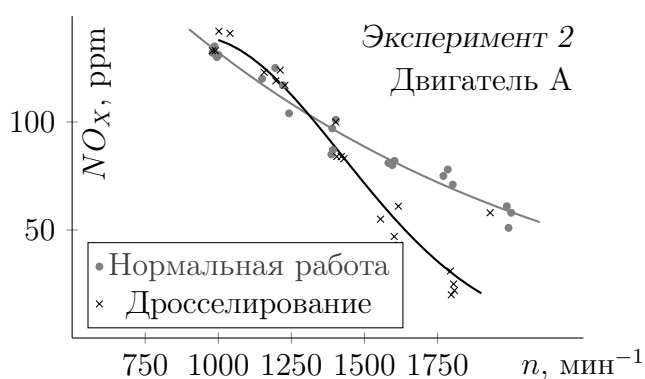


Рисунок 7 — Влияние дросселирования на концентрацию NO_x , неизношенный двигатель

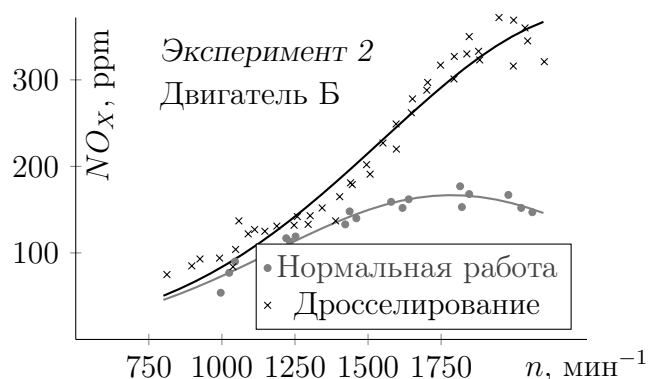


Рисунок 8 — Влияние дросселирования на концентрацию NO_x , двигатель с износом

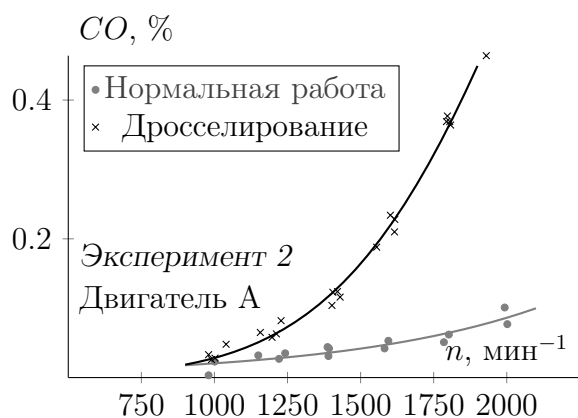


Рисунок 9 — Влияние дросселирования на концентрацию CO , неизношенный двигатель

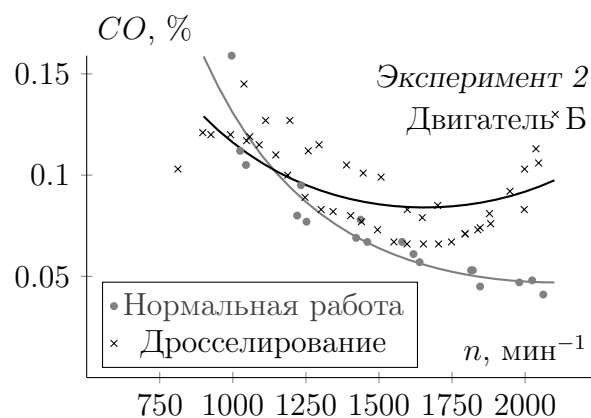


Рисунок 10 — Влияние дросселирования на концентрацию CO , двигатель с износом

Дополнительные измерения на дизеле трактора Агромаш-85ТК, находящегося в процессе обкатки (наработка на момент измерений 14 мото-ч) отразили следующие характеристики:

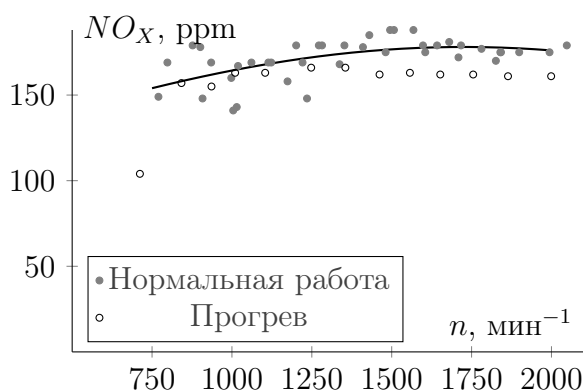


Рисунок 11 — Характеристика NO_x , Агромаш 85ТК

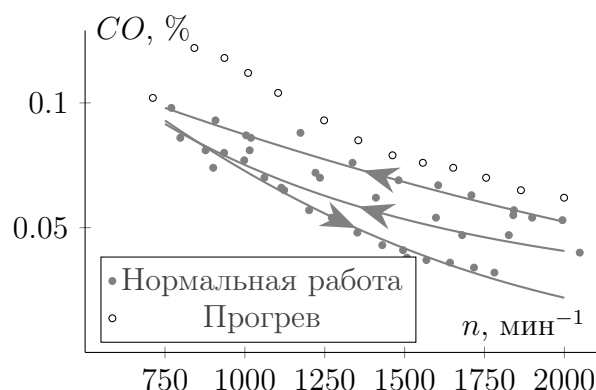


Рисунок 12 — Характеристика CO , Агромаш 85ТК

Характеристика NO_x (рис. 11) является практически горизонтальной, принимая промежуточные значения между двумя предыдущими испытанными двигателями. При этом необходимо понимать, что её отличия могут быть обоснованы чисто конструктивными показателями, поскольку она получена на другой модели двигателя, имеющей мало общего с Д-240.

В целом зависимость CO оказалась ближе по поведению к таковой для изношенного Д-240, что, опять же, может быть вызвано ещё не полностью произошедшей обкаткой, а также конструктивными отличиями.

Выводы по четвёртой главе, фактически, отражены в п. 4 заключения диссертации. Также в данной главе были представлены алгоритмы расшифровки результатов диагностирования (слишком велики для отражения в автореферате).

В пятой главе диссертации рассматриваются вопросы практического применения разработок.

С учётом опыта экспериментальной работы был разработан эскизный проект *мобильного рабочего места* (стенда) (рис. 13), предназначенного для работы на открытом воздухе. Стенд обеспечивает удобную работу с газоанализатором, защищая прибор и оператора от ветра, солнца и осадков.

Стенд обеспечивает работу газоанализатора как от аккумулятора, так и от сети 220 В.

На основе предложенной конструкции стенда разработан *технологический процесс* работы с ним, в том числе определена примерная *трудоёмкость* основных технологических операций.

Полученные величины учитываются в разделе 5.2, где приведено *экономическое обоснование* применяемой технологии. На примере расчётного усреднённого трактора выполнено математическое моделирование издержек базовой технологии и двух вариантов применения предлагаемой. На рис. 14 показана годовая экономия средств с предлагаемой технологией в зависимости от количества тракторов на предприятии. Расчётная схема предполагает рандомизацию входных данных, поэтому графики представлены усреднённо.

Табл. 1 показывает итоговую сводку экономического эффекта.

Следует отметить, что показанные данные получены из расчёта заведомо заниженной экономии топлива и заведомо завышенных трудозатрат, поэтому при реальном применении экономический эффект способен проявиться в более полной мере.

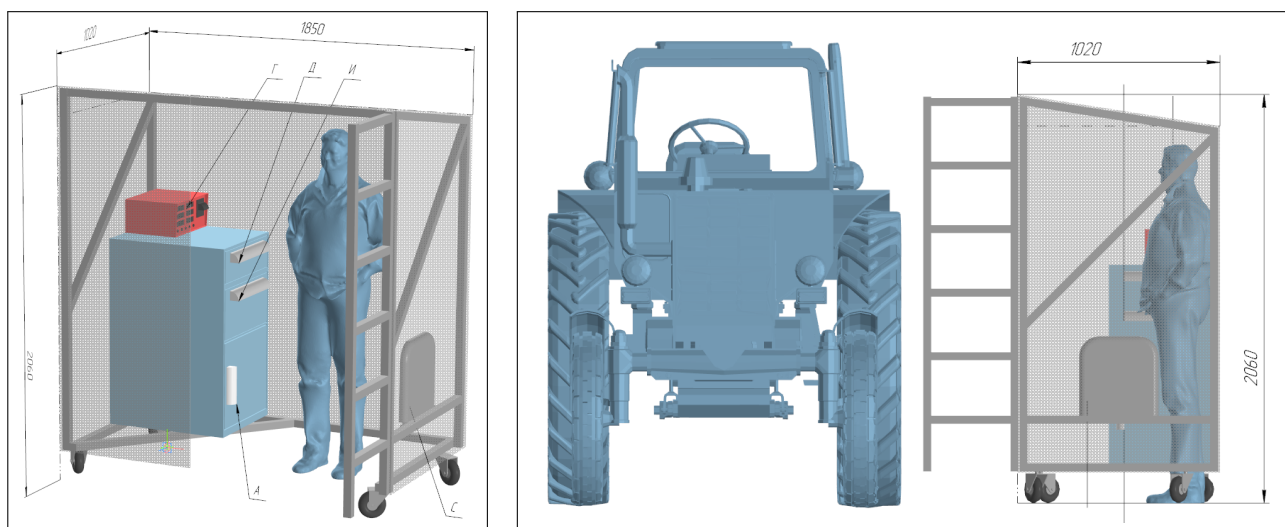


Рисунок 13 — Мобильное рабочее место диагноста
Обшивка показана полупрозрачной

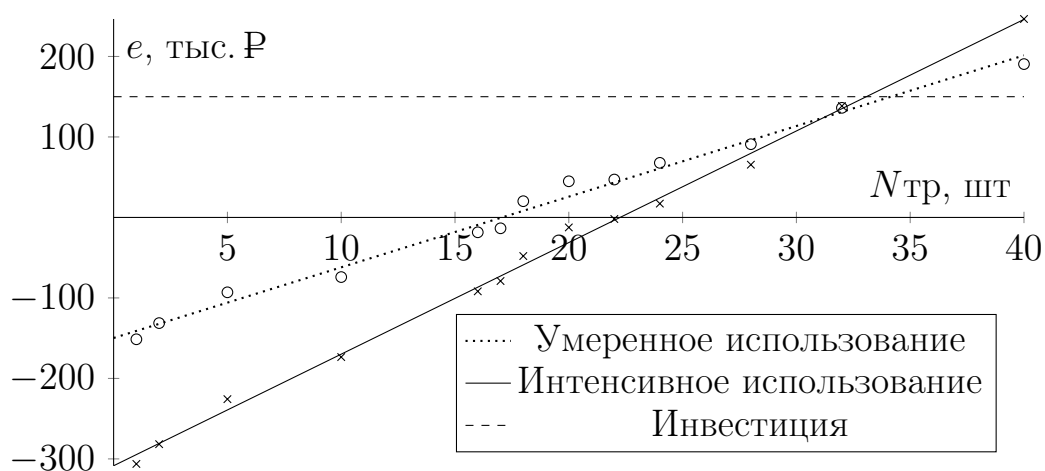


Рисунок 14 — Годовая экономия средств в зависимости от числа тракторов

Таблица 1: Данные экономического эффекта

	Умеренное использование	Интенсивное использование
Число тракторов в парке для достижения безубыточности:		
	17	23
То же для годового срока окупаемости		
	34	34
Срок окупаемости, лет, для парка тракторов, шт:		
20	6,5	6,5
35	0,77	1,1
50	0,41	0,6

Резюмируя содержание *пятой главы*, выделим следующие основные положения:

1. Разработано мобильное рабочее место, предназначенное для удобной работы с газоанализатором на открытом воздухе; защиты оператора и оборудования от атмосферных явлений; безопасной установки пробоотборника в выхлопную трубу трактора.
2. Предлагаемая технология применима в первую очередь для крупных эксплуатирующих предприятий: при оценке по наименее благоприятным вводным данным годовой срок окупаемости достигается при размере парка в 35 тракторов.

Заключение

Исследования, произведённые в ходе работы над диссертацией, позволили сделать следующие выводы по работе:

1. Проведённый комплексный анализ показал, что диагностирование по составу отработавших газов полностью применимо к дизельным двига-

телям. Оперативность и чувствительность данного метода позволяют утверждать, что он имеет хорошие перспективы. Помимо того, актуальность исследования подтверждается малым количеством публикаций в данной области.

2. Наибольшая точность диагностирования по составу отработавших газов ДВС достигается при измерении на различных установившихся режимах холостого хода, в то время как измерение на переходных режимах чревато погрешностями (от 12% при задержке управления подачей топлива на 1 сек).
3. Разработанная методология реализует оптимум точности и оперативности (8...13 минут на один трактор) диагностирования, а алгоритм преобразования полученных данных позволяет использовать результаты диагностирования в системах с искусственным интеллектом. Сконструировано мобильное рабочее место и требуемая оснастка (дросселирующее устройство).
4. Экспериментальные исследования показали следующие результаты:
 - 4.1. Неисправности топливной аппаратуры, ведущие к искажению нормальной подачи топлива (т.н. эффект льющей форсунки), приводят к росту концентрации NOx при малых значениях n_d холостого хода приблизительно в 4 раза (+238% по данным экспериментов), и в 1.4 раза (+40%) — при высоких n_d ; при этом значения других показателей неизменны. Таким образом, мониторинг показателей NOx позволяет проводить не прямое оперативное диагностирование форсунок.
 - 4.2. Дросселирование воздуха на впуске позволяет оценить состояние двигателя, а именно:
 - а) Для менее изношенного дизеля показатели NOx при дросселировании снижаются ($k \approx -0,12 \cdot 10^{-3}$), а у двигателя с большой наработкой — возрастают ($k \approx 0,25 \cdot 10^{-3}$) по мере роста n_d ; при этом характеристика для нового двигателя является убывающей, а для изношенного — восходящей.
 - б) Концентрация CO , напротив, является возрастающей ($k \approx 0,47 \cdot 10^{-3}$) у нового двигателя против убывающей ($k \approx -0,02 \cdot 10^{-3}$) у изношенного. При этом дросселирование воздуха на впуске приводит к значительно большему увеличению показателей при высоких n_d , чем у изношенного двигателя.

Из этого следует, что отслеживание показателей CO , в дополнение к NOx , позволяет дать интегральную оценку изношенности двигателя. При этом количественные показатели и инструментарий для дросселирования не так важны, поскольку рассматривается именно изменение наблюдаемой характеристики.

Для удобного и единообразного дросселирования разработана насадка на впускную трубу воздушного фильтра, имеющая отверстие 600 мм².

Для диагностических признаков, описанных в двух предыдущих подпунктах, представлены алгоритмы преобразования данных в вероятностный формат.

5. Расчёт экономической эффективности показал, что применение предлагаемой технологии актуально для крупных эксплуатирующих предприятий, располагающих парком более 35 тракторов (срок окупаемости 2 года для парка 27 тракторов, 1 для 37 и 0.5 для 50). Применение в менее крупных хозяйствах возможно при изменении технологии.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

Публикации в изданиях, рекомендуемых ВАК РФ

1. Ал-Жавхар Али Еззат Махди. Выявление неисправности топливной аппаратуры тракторного дизеля путём анализа состава выхлопных газов / Ал-Жавхар Али Еззат Махди, В.В. Егоров, В.А. Луханин // Международный техни-ческий журнал. – 2025. – № 3(97). – С. 118-127. – DOI 10.34286/2949-4176-2025-97-3-7-16. – EDN JQIVLY.

2. Ал-Жавхар Али Еззат Махди. Получение и анализ характеристик состава отработавших газов дизеля на различных режимах холостого хода / Ал-Жавхар Али Еззат Махди, Н.А. Майстренко, В.В. Егоров // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. – 2025. – Т. 69, № 3(72). – С. 58-68. – DOI 10.22314/2658-4859-2025-72-3-12-19. – EDN FFRGBJ.

3. Хуссейн Ибрагим Адил Хуссейн. Повышение эффективности сбора урожая и хранения на элеваторах / Хуссейн Ибрагим Адил Хуссейн, Алшабеби Альхаттаб Нихад Муса, Ал-Жавхар Али Еззат Махди // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета имени П. А. Костычева. - Т.17, № 3. - С. 156-162. - <https://doi.org/10.36508/RSATU.2025.73.63.001>.

Публикации в иных научных изданиях

4. Егоров, В. В. Анализ влияния давления подъёма иглы форсунки на состав выхлопных газов дизеля / В. В. Егоров, А. Е. М. Ал-Жавхар // Чтения академика В. Н. Болтинского : Сборник статей научно-практической конференции, посвященный 90-летию Шарова Николая Михайловича, Москва, 23-24 октября 2024 года. - Москва: ООО «Сам Полиграфист», 2024. - С. 155-159 . - EDN EACUMJ.

5. Ал-Жавхар Али Еззат Махди. Использование биогаза как топлива / А. Е. Ал-Жавхар // Материалы Международной научной конференции молодых учёных и специалистов, посвящённой 150-летию со дня рождения А.Я.Миловича: Сборник статей, Москва, 03-05 июня 2024 года. – Москва: Российский государственный аграрный университет - МСХА имени К.А. Тимирязева, 2024. – С. 550-553 . — EDNIZFSFQ;