

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ – МСХА
ИМЕНИ К.А.ТИМИРЯЗЕВА»**

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

Диссертация на соискание учёной степени кандидата
технических наук

Научный руководитель:
кандидат экономических наук
ДИДМАНИДЗЕ
Ремзи Назирович

Москва — 2026

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
1 Состояние вопроса и задачи исследования	9
1.1 Общая информация о выхлопных газах дизельного двигателя	9
1.2 Техническая эксплуатация тракторов	12
1.3 Научный задел выбранного направления	35
1.4 Выводы. Задачи диссертации	38
2 Теоретические основы диагностики по составу отработавших газов	39
2.1 Выбор режима работы двигателя	39
2.2 Использование данных диагностирования для экспертной системы	48
3 Методика экспериментальных исследований	69
3.1 Используемое оборудование	69
3.2 Общий план эксперимента	74
3.3 Влияние переизбытка топлива на состав ОГ	75
3.4 Дросселирование воздуха как диагностический тест	78
3.5 Алгоритм проведения эксперимента	78
4 Результаты экспериментов	80
4.1 Аппроксимация экспериментальных данных	80
4.2 Влияние неисправностей топливной аппаратуры	80
4.3 Дросселирование воздуха как диагностический тест	86
4.4 Характеристики без вмешательства	95
4.5 Выводы	97
5 Вопросы практического применения разработок	98
5.1 Реализация исследованных методов	98
5.2 Экономический эффект	106
Заключение	118
Список литературы	121
Список иллюстраций	134
Список таблиц	137
Перечень сокращений	138
Перечень обозначений	138

Перечень терминов и определений	139
А Характеристики задействованного оборудования	140
А.1 Газоанализатор Инфракар 5М2.01	140
Б Листинги задействованных программ	142
Б.1 Анализ фаззифицирующих функций	142
Б.2 Аппроксимация данных сигмной	143
Б.3 Интерполяция разгонной характеристики	144
Б.4 Имитация затухающих колебаний	146
Б.5 Аппроксимация экспериментальных данных	147
Б.6 Вычисления с диапазонами	148

ВВЕДЕНИЕ

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. Арженовский, 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 техно-

логические 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;

¹Соотв. страницы 49, 80, 100

2. Результаты экспериментов по выявлению значащих показателей состава выхлопных газов дизельного двигателя, способных дать представление о техническом состоянии двигателя;
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.

1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1 Общая информация о выхлопных газах дизельного двигателя

Появившиеся в самом конце XIX века дизельные двигатели к 1920-м годам уже находились в массовом производстве. Преимущественно это были тяжёлые двигатели для использования на железнодорожном транспорте и судах. Дальнейший рост популярности дизелей связан с тем, что для них не применяются летучие топлива, что обеспечивает более безопасную эксплуатацию. В 1940/50-х годах дизели начали применяться и на автомобилях, что вкупе с тенденциями по развитию городов привело к увеличению мобильности населения с использованием личного и общественного транспорта (в различных странах мира соотношение данных видов транспорта принимало отличающиеся значения).

Вместе с тем, увеличение количества автомобилей (вместе с другими факторами) привело к ощутимому росту загрязнения воздуха в городах, что заставило исследователей обратить внимание на экологическую составляющую эксплуатации автомобилей, главным образом — состав отработавших газов.

По данным работы [69], на транспорт и сельское хозяйство суммарно приходится 41% загрязнения атмосферы (39% на транспорт и 2% на сельское хозяйство). При этом также известно, что наиболее энергоэффективным является водный транспорт, а наименее — авиационный. Не прибегая к расчётам, нетрудно понять, что расход топлива, а следовательно, и вредные выбросы, на единицу работы прямо пропорциональны энерговооружённости транспортного средства и обратно пропорциональны производительности.

Также авторы работы [69] указывают примерный состав выпускных газов дизельного двигателя (табл. 1.1). Вместе с сажей, которая преимущественно возникает в выхлопе дизельного двигателя из-за неполного сгорания топлива, существуют и иные твёрдые частицы, которые влияют на непрозрачность дыма. Этот фактор следует отметить отдельно, поскольку большинство дымомеров ориентируются именно на него.

Таблица 1.1

Состав выхлопных газов дизельного двигателя

Вещ-во	N_2	O_2	вода	CO_2	CO	NO_x	CH_x	Альдегиды	Сажа	Бензапирен
ед.изм.	% об.								г/м ³	
min	76	2	0,5	1	0,01	0	0,09	0,001	0,01	$10 \cdot 10^{-6}$
max	78	18	4	10	0,5	0,5	0,5	0,009	1,1	

Считается, что 90% твёрдых частиц в выхлопе дизеля относятся к мелким твёрдым частицам, также имеющим обозначение PM2.5 (англ. Particulate Matter: «взвесь вещества»).

Угарный газ — CO — также образуется от недостатка кислорода при горении (широко известен пример с заслонкой дровяной печи). Являясь достаточно опасным веществом, именно угарный газ в первую очередь является причиной, вынуждающей проектировать системы отвода выхлопных газов при проектировании сервисных предприятий.

Затронем также тему биодизельного топлива, которая в настоящее время широко исследуется как в России, так и за рубежом. По данным работы [88], теплотворная способность биотоплив лишь чуть ниже, чем у дизельного топлива (данные обобщены на рис. 1.1), а возрастание удельных эксплуатационных затрат машинно-тракторного агрегата на 1 га не превышает 5%.

Также биодизельное топливо может быть получено из отходов производства (главным образом пищевого, например, отработавшее фритюрное масло).

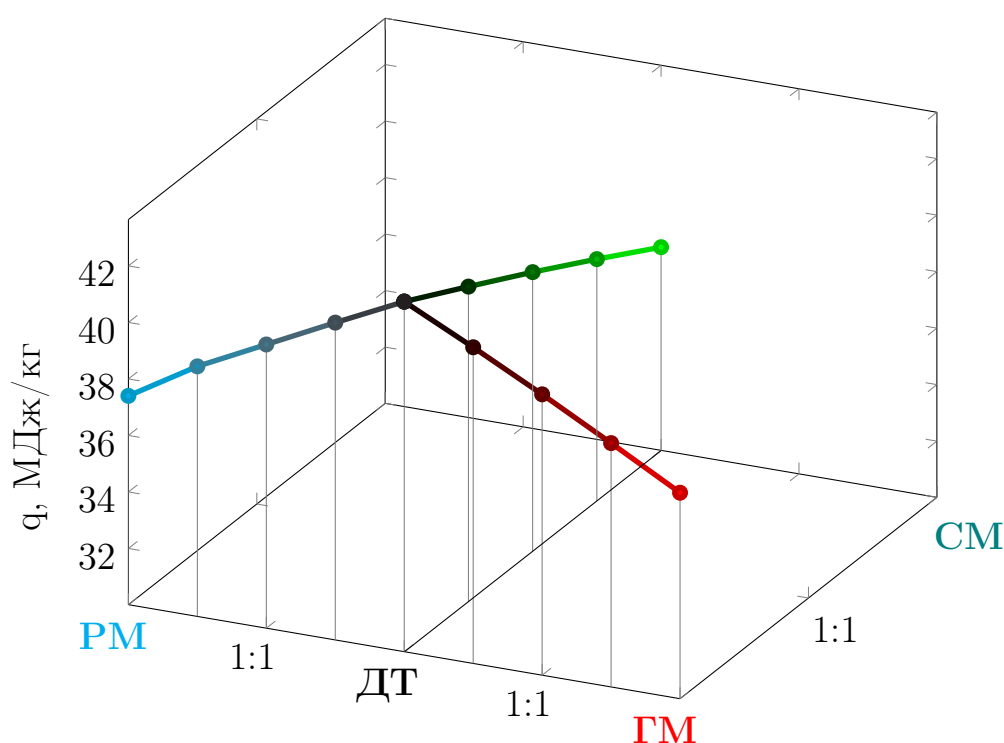


Рисунок 1.1 — Теплотворная способность различных видов топлива и их смесей
ДТ – дизельное топливо, РМ – рыжиковое масло, ГМ – горчичное масло, СМ – сурепное масло

Сгорание биодизельного топлива производит значительно больше выбросов NO_x , но остальные примеси присутствуют в меньшем по сравнению с дизельным топливом количестве: [102].

К другим видам альтернативного топлива можно отнести сжатый (компримированный) и сжиженный природный газ.

1.1.1 Система выпуска дизельных двигателей и современные её компоненты

Несмотря на широкую вариативность конструкций самих двигателей, система выпуска отработавших газов в целом имеет схожую структуру на большинстве моделей.

Чугунный выпускной коллектор, принимающий отработавшие газы из цилиндров, направляет их к турбокомпрессору (при его наличии) и далее к глушителю. В зависимости от конструктивного исполнения, перед глушителем также может быть установлен пламегаситель, предохраняющий глушитель от чрезмерного теплового износа.

Вместо или вместе с пламегасителем может устанавливаться система нейтрализации отработавших газов. Ставшие стандартом для бензиновых легковых автомобилей, подобные системы пока не слишком распространены на дизельных транспортных средствах.

Первым элементом, призванным снизить содержание многих из вредных примесей, служит **каталитический нейтрализатор** (рис. 1.2). В типовом каталитическом нейтрализаторе дизельного двигателя (DOC: Diesel Oxidation Catalyst) происходят: дожигание CO до менее вредного и перерабатываемого фотосинтезом CO_2 ; разложение пропилена C_3H_6 на углекислый газ и воду, окисление NO до NO_2 .

Следует отметить, что полноценная работа DOC реализуется только при полном прогреве двигателя: указанные процессы происходят лишь при высоких температурах, порядка 300...350°C.

Более простым в исполнении элементом является дизельный сажевый фильтр (DPF), имеющий два режима работы: фильтрация и самоочистка. Поскольку постоянная фильтрация сажи быстро приведёт к засорению фильтра с последующим снижением эффективности и фильтра, и самого двигателя, DPF требуется периодическая регенерация. Фактически, она происходит пу-

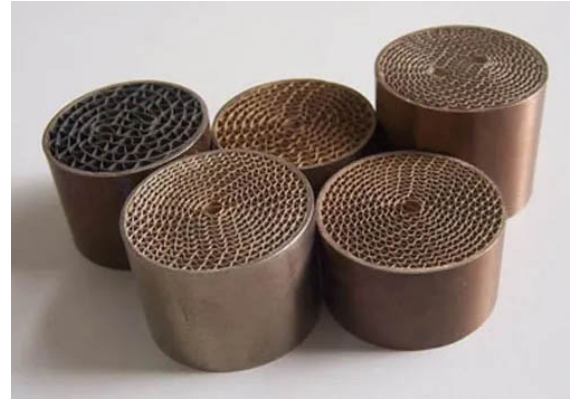


Рисунок 1.2 — Каталитический нейтрализатор дизельного двигателя и его внутренняя структура

тём сжигания осевших частиц сажи при высокой температуре, достигаемой либо при нагрузке на двигатель (пассивная регенерация), либо принудительным повышением температуры газов (активная регенерация).

Для снижения содержания оксидов азота в выхлопных газах также существует система рециркуляции выпускных газов (EGR: Exhaust Gas Recirculation). Если быть точным, EGR использует не содержимое выпускного коллектора, а картерные газы, имеющие тот же состав, что и выхлопные (без учёта DOC), но значительно меньшую температуру. В системах EGR с управляемым клапаном достигается снижение температуры в камере сгорания за счёт точного управления количеством кислорода во впускном коллекторе. Системы EGR без клапана фактически представляют собой «принудительный сапун», то есть за счёт разрежения во впускном коллекторе вытягивают из газы из картера. В таких системах снижение уровня оксидов азота не гарантируется.

1.2 Техническая эксплуатация тракторов

Главным показателем, отражающим способность техники к нормальной эксплуатации, является коэффициент готовности K_T — вероятность того, что в заданный момент времени объект окажется в работоспособном состоянии. Фактически, именно на него ориентируются при планировании сельскохозяйственных работ; очевидно, что данный показатель выгоднее поддерживать на максимально возможном уровне.

Вопросам обеспечения надёжности посвящено большое количество научных работ, и применимые для этой цели методы можно разделить на организационные и технические. В симбиозе данных групп находятся стратегии сервиса машин

(в частности, и сельскохозяйственных МЭС), которые для полного понимания вопроса следует рассмотреть более подробно.

В отечественной практике принято классифицировать стратегии технического сервиса (также известных как стратегии технического обслуживания и ремонта, ТОР) по хронологическому порядку; в настоящее время выделяют три существующих и две перспективных стратегии.

Изначально, с появлением в отечественном земледелии первых тракторов, в том числе паровых, вопросы поддержания их технического состояния никак не регламентировались, а ремонтные мероприятия производились только по факту отказа. Разумеется, ни о какой надёжности в подобных условиях не могло идти и речи: отказавший среди поля трактор в лучшем случае удавалось починить силами самого механизатора (или механизаторов), а в худшем — буксировать, в том числе конной тягой, до здания, в котором имелись бы приемлемые для ремонта условия. В таком случае ремонтом занимались сотрудники предприятия-изготовителя, которых для этого требовалось специально вызывать. Подобная стратегия (фактически, её отсутствие) получила название **заявочной**.

С увеличением парка тракторов недостатки подобного подхода стали очевидными, и для решения перечисленных проблем в Одесской области в 1928 году была создана машинно-тракторная станция (МТС), призванная централизовать процессы ТОР тракторов. Этот эксперимент оказался очень удачным, и в ближайшие годы МТС стали открываться по всему СССР.

Централизация управления машинно-тракторными станциями позволила начать разработку общих правил ТОР сельскохозяйственной техники, которые впоследствии стали ядром **регламентной** стратегии. При работе в её рамках периодичность мероприятий технического сервиса привязана к изменению наработки МЭС, главным образом моточасов.

Использование моточасов в качестве единицы измерения наработки имеет свои минусы, поскольку при таком подходе не учитывается степень нагрузки на двигатель. Поэтому были предложены и иные единицы измерения, наиболее удачной из которых является количество израсходованного топлива. Нормативы расхода топлива между различными видами сервиса приведены в таблице 1.2.

Рассмотрим основные сервисные мероприятия, применяемые к тракторам. Низшим видом технического обслуживания является **ЕТО** — ежесменное, выполняемое перед началом работы. В ЕТО входят следующие основные манипуляции:

Периодичность технического обслуживания тракторов

Марка трактора	Наработка между ТО, л топлива		
	ТО-1	ТО-2	ТО-3
К-700А, К-701(М)	4400	·4=17 600	·2=35 200
Т-150К, Т-150	2500	10 000	20 000
Т-4А	2100	8400	16 800
ДТ-75М(МВ)	1450	5800	11 600
ДТ-75МЛ	1465	5860	11 720
ДТ-75Н	2200	8800	17 600
Т-70С, Т-54	1050	4200	8400
МТЗ-80(82)			
Т-40М(АМ)	937	3750	7500
ЮМЗ-6	820	3300	6600
Т-25, Т-16	500	2000	4000

визуальный осмотр на предмет отсутствия течей эксплуатационных жидкостей (масла, топлива, теплоносителя системы охлаждения) и наличия крепёжных элементов; проверка уровней топлива, масла в картере двигателя и гидробаке, давления в шинах; ревизия других критических узлов в зависимости от модели МЭС.

Техническое обслуживание ТО-1 проводится при достижении соответствующей наработки и включает в себя (на примере трактора МТЗ-82): регулировку натяжения ремня вентилятора, угла схождения передних колёс; измерение зазоров рулевых тяг; проверку уровня смазки в редукторах переднего ведущего моста и промежуточной опоры; проверку состояния воздухоочистителя; смазку выжимного подшипника; удаление отстоя из фильтра грубой очистки топлива; очистку фильтра системы вентиляции. Операции ТО могут варьироваться в зависимости от конструктивного исполнения техники.

Каждое сервисное мероприятие предваряется операциями, входящими в нижестоящие по иерархии, показанной на рис. 1.3.

При проведении ТО-2 требуется:

- Определить радиальный люфт рулевого колеса (не более 25° при работающем двигателе), при необходимости отремонтировать рулевой механизм;
- Измерить показатели пневмосистемы: давление 6,5...8 атм, падение давления за 30 минут не более 2 атм;
- Измерить усилие включения рычага ВОМ (120...150 Н), при необходимости произвести ремонт;

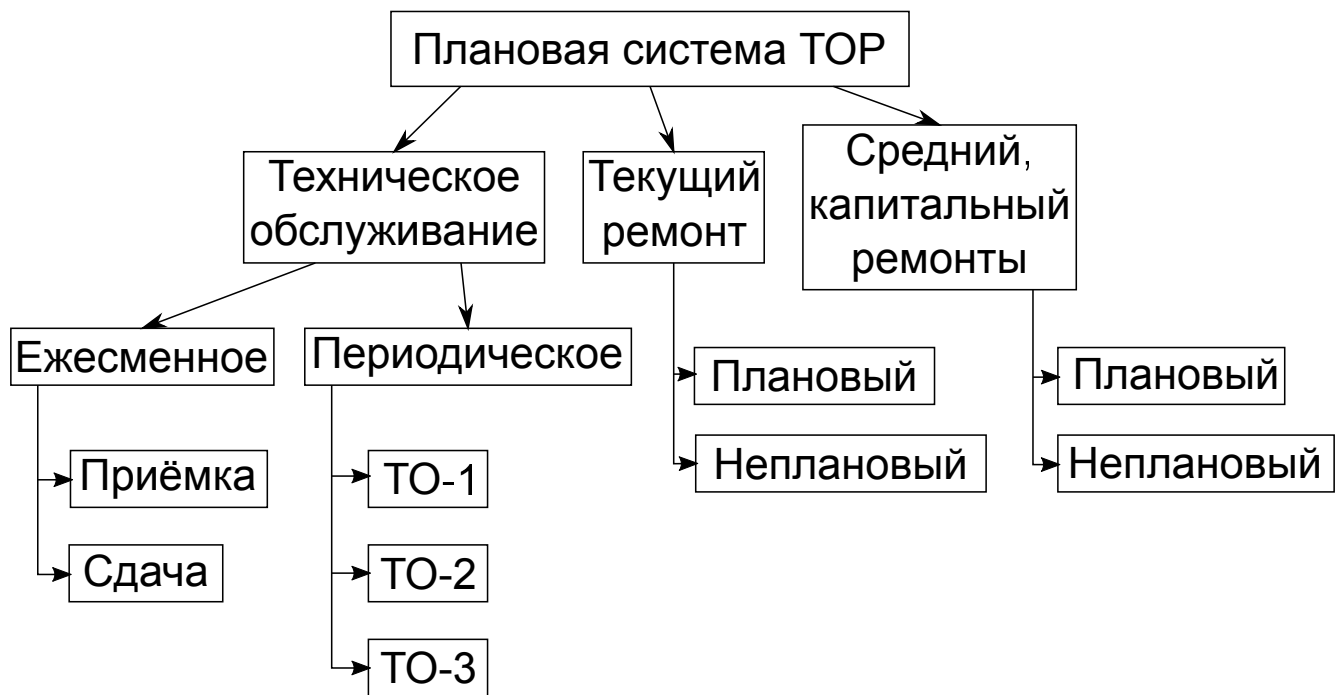


Рисунок 1.3 — Иерархическая схема регламентной стратегии ТОР

- Подшипники шкворней планетарно-цилиндрических редукторов переднего моста: усилие для поворота кулака, приложенное к фланцу крепления колеса, в пределах 60...80 Н;
- измерить момент затяжки предохранительной гайки промежуточной опоры: 400...800 Н;
- проверить уровень масла в: трансмиссии, ГУР, гидробаке;
- заменить масло в двигателе и корпусе ТНВД;
- заменить фильтрующий элемент гидросистемы;
- прошприцевать втулки поворотных цапф, шарниры гидроцилиндра ГУР, шарниры рулевой тяги;
- слить отстой из фильтра тонкой очистки и топливного бака;
- проверить затяжку резьбовых соединений;
- проверить состояние АБ, в случае, если она обслуживаемая;
- промыть: масляную центрифугу (выбег ротора должен быть 60...90 с), фильтрующий элемент пневмосистемы, сливные фильтры гидросистемы навески и ГУР;
- отрегулировать: свободный ход педалей тормоза сцепления, стояночный тормоз, тепловые зазоры ГРМ.

При ТО-3 проводят следующие операции:

- отрегулировать подшипники фланца редуктора переднего ведущего моста;
- проверить блокировку пуска при включенной передаче;
- заменить фильтрующий элемент тонкой очистки топлива;
- прошприцевать шестерню правого раскоса задней навески;
- промыть корпус и все элементы фильтров очистки воздуха, после монтажа удостовериться в герметичности;
- проверить затяжку гаек поворотных рычагов рулевого управления;
- промыть фильтры предварительной очистки масла дизеля, фильтр грубой очистки топлива, сапун и сетку маслозаливной горловины дизеля, крышку и фильтры топливного бака;
- проверить затяжку гаек головки блока цилиндров.

ТО-2 выполняется после трёх ТО-1, а ТО-3, соответственно, после трёх ТО-2, как показано на схеме рис. 1.4.

Каждое второе ТО-3 заменяется текущим ремонтом ТР, а после двух ТР производится капитальный ремонт КР. Содержание ремонтных операций намного более объёмное, поэтому здесь рассмотрено не будет.

Регламентная стратегия позволила значительно повысить показатели надёжности машинно-тракторного парка, но со временем был выявлен её недостаток — отсутствие учёта текущего состояния техники, приводящего к появлению так называемых ошибок первого и второго рода. Первой называют ошибочную отбраковку в действительности исправного элемента, второй — ошибочный допуск до эксплуатации элемента, в действительности не отвечающего требованиям нормативов и надёжности.

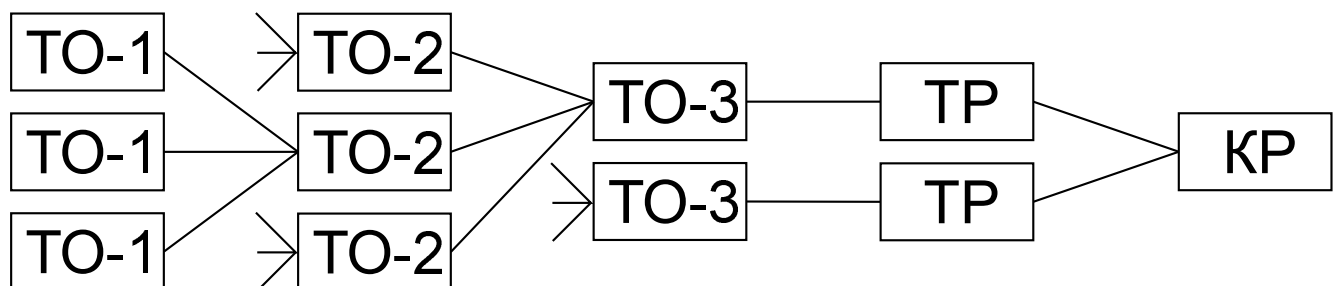


Рисунок 1.4 — Диаграмма периодичности ТО и ремонта

В связи с ростом числа ошибок преимущественно второго рода, была принята система поправочных коэффициентов, корректирующих межсервисные интервалы.

Категория условий эксплуатации учитывается с помощью коэффициента K_1 и влияет на периодичность ТО, ресурс до капитального ремонта (K_1 изменяется от 1,0 до 0,6) и трудоемкость ТР (K_1 изменяется от 1,0 до 1,5).

Модификация машин и особенности организации их работы (фронтальные погрузчики и т. п.) учитываются коэффициентом K_2 , который применяется для корректирования трудоемкости ТО и ТР ($K_2 = 1,0...1,25$) и ресурс до капитального ремонта ($K_2 = 1,0...0,75$).

Природно-климатические условия учитываются с помощью коэффициента K_3 , который соответственно изменяется: при определении периодичности — от 0,8 до 1,0; удельной трудоемкости ТР — от 0,9 до 1,3; при определении ресурсов до первого капитального ремонта соответственно от 0,7 до 1,1.

Коэффициент K_4 учитывает изменение трудоемкости ТР в зависимости от пробега с начала эксплуатации. Этот коэффициент изменяется для трудоемкости от 0,4 (для пробега, составляющего 25% и менее ресурса до капитального ремонта) до 2 и более при пробеге, в 1,75...2 раза, превышающем ресурс до капитального ремонта.

В зависимости от пробега с начала эксплуатации до капитального ремонта изменяется и продолжительность простоев на ТО и ремонте, которое учитывается коэффициентом K'_4 , равным 0,7...1,4. При пробеге, превышающем его значение до первого капитального ремонта, величина K'_4 принимается равной 1,4.

К сожалению, даже введение поправочных коэффициентов не смогло значительно улучшить ситуацию. Во-первых, механизм их учёта не всегда удобен, а во-вторых, они не позволяют избавиться от недоиспользования ресурсов тех деталей, которые принудительно заменяются при достижении определённой наработки без учёта их действительного технического состояния. При этом недоиспользование ресурса элементов двигателя может составлять порядка 40%, как показало исследование [30] на автомобильном транспорте, который даже в меньшей степени подвержен влиянию перечисленных недостатков, чем сельскохозяйственные МЭС.

В конечном итоге, регламентная стратегия технического сервиса, при всех её достоинствах, начала показывать свою несостоятельность уже в середине 1970-

х годов. С тех пор регулярно публикуются статьи (например, [14; 84]) и учебные пособия ([89]), указывающие на её недостатки.

Аналогичная ситуация наблюдается и в смежных отраслях. К примеру, на железнодорожном транспорте также проводятся исследования, направленные на то, чтобы периодичность сервисных мероприятий имела корреляцию с состоянием техники: [80]. По информации, полученной от В. В. Егорова и В. А. Чечета, эксперимент по предремонтному диагностированию тепловозов был проведён в 2016 году в депо Бекасово Московской железной дороги, но положительные результаты одиночного эксперимента не способны оказать значительного влияния на жёстко установленную периодичность ТО и ТР локомотивов.

Все перечисленные предпосылки привели к началу разработки **стратегии сервиса по состоянию**, основные положения которой были сформулированы уже к началу 1980-х годов, и впоследствии изложены в книге [68].

Основой сервиса по состоянию является корректировка межсервисных интервалов по результатам технической диагностики, что позволяет минимизировать потери от недоиспользования ресурса и риски преждевременного выхода деталей из строя. Диагностика при этом проводится на низших видах ТО, включая ежесменное, поэтому будет важным зафиксировать требование к оперативности применяемых методов диагностирования.

Стратегия сервиса по состоянию была опробована в 1971 году в Харьковской области и показала хорошие результаты: трудоёмкость капитальных ремонтов удалось снизить на треть, а часть из них были упрощены до текущих. Увы, на тот момент, вследствие причин организационного и технического характера, более широкого распространения подобный подход не получил. Аналогичные исследования проводятся и для автотранспорта ([8]), несмотря на то, что нормы наработки до выполнения сервисных мероприятий для автомобилей являются менее жёсткими.

Переход к рыночной экономике вынудил сельхозпроизводителей более серьёзно относиться к экономическим аспектам эксплуатации и сервиса МЭС, поэтому, начиная с середины 1990-х годов, стратегия сервиса по состоянию начала внедряться на предприятиях, пусть и значительно медленнее, чем стоило бы.

В настоящее время, несмотря на то, что переход даже к стратегии сервиса по состоянию произошёл далеко не на всех предприятиях, уже существуют

предпосылки к работе по более совершенной, **предиктивной стратегии технического сервиса**, при которой горизонт планирования сервисных мероприятий сдвинут в будущее время и ориентирован на предугадывание технического состояния машин на основе текущих и прошлых данных.

Теоретическим венцом развития предиктивной стратегии является **проактивная**, предполагающая широкое внедрение искусственного интеллекта для принятия решений по назначению сервисных мероприятий на базе поступающих мониторинговых и диагностических данных. Автоматизация при этом может достигать такого уровня, при котором компьютерные ERP-системы (управление ресурсами предприятия) будут в автоматическом режиме составлять план-график закупки запасных частей и расходных материалов для минимизации логистических простоев.

Так или иначе — сервис по состоянию, предиктивная и проактивная стратегии опираются на данные, получаемые от диагностики. Рассмотрим, с чем необходимо иметь дело для того, чтобы полноценно оперировать методологией этих стратегий.

Первоначально, на первом этапе развития стратегии сервиса по состоянию, единственными организациями, способными производить диагностику тракторов в современном понимании, были МТС: [24]. Только они обладали всем требуемым функционалом, и даже после неоднократных реорганизаций сохранили за собой данный функционал. В настоящее время некоторыми исследователями поднимается вопрос организации МТС вновь, главным образом как пунктов технического сервиса и централизованной работы сотрудников Гостехнадзора.

Принципы технической диагностики тракторных двигателей, используемые в научной школе ИМЭ имени В. П. Горячкина, изложены в пособиях [92; 93].

Техническая диагностика ДВС располагает большим количеством методов, классификации которых и сейчас посвящаются научные статьи, к примеру, [13]. В то же время, научная школа ГОСНИТИ–ВИМ–ИМЭ придерживается классификации методов технической диагностики ДВС, основанной на трёх уровнях глубины поиска — органолептическим, индикаторным и углублённым методами: [91].

Органолептические методы подразумевают использование только органов чувств и штатных приборов МЭС. При этом фиксируют лишь качественные, а не количественные, диагностические признаки. К качественным признакам

лишь частично применить количественную оценку, с градацией по трём-четырёх ступеням. Кратко рассмотрим примеры подобных качественных признаков.

Нехарактерный цвет выхлопа свидетельствует о попадании в камеру сгорания или выхлопной коллектор следующих компонентов:

Белый дым: как правило, вызван испарением охлаждающей жидкости, просачивающейся в высокотемпературные полости. В большинстве случаев такая утечка может происходить через трещины в блоке дизеля, головке либо прокладке между ними; такая неисправность требует немедленного вмешательства.

Сизый дым: вызван сгоранием масла — преимущественно, попадающего в цилиндр вследствие плохого состояния поршневых колец и/или поверхности цилиндрических гильз. Также возможна утечка масла через элементы ГРМ. В некоторых случаях сизый дым может характеризовать избыток попадающего в цилиндры дизельного топлива.

Чёрный дым: возникает при неполном сгорании топлива, вызванном либо чрезмерной его подачей, либо недостатком воздуха (в том числе вследствие низкой производительности турбокомпрессора). На бензиновых двигателях переобогащённая смесь приводит к чёрно-сизому дыму, но механизм его образования одинаков в обоих случаях: недоокисленные капли топливной взвеси подвергаются условно бескислородному нагреву, превращаясь в сажу, которая и выбрасывается в выхлопной коллектор.

Чрезмерный расход масла: может быть вызван как элементарной утечкой, так и попаданием в цилиндры. Соответственно, если механизатор фиксирует по показаниям щупа постепенное снижение уровня масла, а под нагрузкой наблюдается сизый цвет выхлопных газов — совокупность данных признаков позволяет сузить область поиска неисправности до тех вариантов, при которых наблюдается угар масла.

Стук в двигателе: данный признак, наоборот, может быть вызван большим количеством причин — от износа вкладышей коленчатого вала до слишком большой цикловой подачи отдельного цилиндра. Для более точной локализации

неисправности необходим дополнительный анализ — от беглого осмотра на наличие иных органолептических признаков до задействования инструментальных методов диагностирования.

Перегрев ДВС: в зависимости от типа приводов вентилятора и насоса системы охлаждения, путь локализации неисправности может отличаться. Простейшим случаем может являться вентилятор постоянного включения, приводимый во вращение ремнём: если вентилятор не вращается при работающем двигателе, это может быть вызвано либо обрывом ремня, либо заклиниванием самого вентилятора¹. Если проверка на первую неисправность очевидна, то для обнаружения второй придётся остановить двигатель и проверить температуру ремня и шкива вентилятора: трение вызовет их нагрев. Подобная проверка относится к подкатегории *диагностических тестов*, занимающих промежуточное положение между органолептическими и индикаторными методами.

Длительный прогрев ДВС, напротив, может быть вызван лишь одной основной причиной: заеданием термостата в открытом положении, при котором охлаждающая жидкость направляется через радиатор даже при минимальной её температуре. Двигатели, имеющие жалюзи радиатора, при низкой температуре окружающего воздуха также склонны переохлаждаться, но исправный термостат минимизирует вероятность возникновения подобной ситуации.

Недостаток мощности является слишком комплексным признаком, и локализация неисправности здесь может быть произведена в основном на уровне систем двигателя: наиболее вероятно, что при наличии только этого органолептического признака проблема может наблюдаться в системе питания, в том числе с качеством топлива.

Вибрация двигателя может быть признаком его **нестабильной работы**, которая, в свою очередь, характеризует неисправности топливной системы либо ЦПГ конкретного цилиндра.

¹Вероятность того, что ремень ослаб настолько, что вентилятор не вращается хоть сколь-нибудь, минимальна

Низкое давление масла в большинстве случаев характеризует изношенность вкладышей коленчатого вала, и с меньшей вероятностью вызвано неисправностью масляного насоса или перепускного клапана в то время как **высокое** позволяет с почти полной уверенностью говорить о неисправности именно перепускного клапана или загрязнении масляных фильтров (в зависимости от конструкции масляной системы).

Автоматизация работы с органолептическими признаками требует их формализации с приведением к более-менее чёткой структуре.

Индикаторные методы реализуются преимущественно при работе двигателя с помощью датчиков и устройств, монтаж которых не трудоёмок. Именно индикаторные методы позволяют в оперативном режиме оценить состояние двигателя, не прибегая к длительным процедурам.

Классифицируют индикаторные методы в основном на базе физических процессов, используемых для снятия показаний, выделяя следующие группы:

Механические: анализ линейных перемещений элементов двигателя, а чаще — виброакустических показателей в различных его диагностических точках.

В качестве примера механических диагностических параметров можно привести тепловой зазор клапанов газораспределительного механизма (ГРМ), который, как показано в работе [35] при превышении допустимых значений отражается на виброграмме двигателя. Авторами статьи [27] показано использование виброакустических показателей для более глубокого анализа состояния ГРМ (однако, не до конца понятно, насколько трудоёмка будет адаптация для двигателей, отличных от задействованного в экспериментах).

Развитие компьютерных технологий открывает новые возможности для обработки виброакустических данных. Исследователями изучается потенциал вейвлет-преобразований для анализа осциллограмм вибрации, полученных в различных точках ДВС, с целью дальнейшей локализации неисправностей: [15]. Более простого способа анализа придерживаются авторы работы [56]: здесь используется разложение виброграммы на спектр и сравнение его с эталонным.

Диагностика по звуковым показателям применима также и к другим деталям самоходной техники: в работе [63] приведён подробный обзор источников нештатных шумов в двигателе, трансмиссии и ходовой части автомобиля.

Виброакустические методы, разумеется, включают в себя и регистрацию ультразвуковой эмиссии при работе узлов двигателя. Данный вид диагностики зачастую требует дорогостоящего оборудования, как показано в работе [17], поэтому его не всегда возможно задействовать.

К группе виброакустических методов также может быть отнесена целая ветвь исследований, посвящённых диагностике масляного фильтра: [5; 94; 95]. Исследователи в соавторстве занимаются анализом амплитудных и фазочастотных характеристик как маслоочистной центрифуги, так и фильтров с неподвижными элементами. Отличие от виброакустических методов заключается в том, что здесь рассматриваются показатели давления масла на входе и на выходе фильтра. Будет справедливо предположить, что подобный подход можно применить и для топливной системы: в диссертации В. В. Егорова описан эксперимент, закладывающий основы похожих исследований.

Пневматические и гидравлические: регистрация параметров жидких и газовых сред.

Отчасти данную группу методов можно отнести к механическим, но чаще её выделяют в отдельную категорию, поскольку здесь для измерений требуются иные приборы.

Примером может служить измерение расхода картерных газов на холостом ходу, актуальное уже в 1980-х годах (пример измерительного прибора — КИ-13671, показанный на рис. 1.5) и остающееся таковым и сейчас: в статье [33] показаны современные подходы к реализации данного метода. Необходимо отметить, что диагностика по расходу картерных газов применяется не только для сельскохозяйственных МЭС: в статье [52] описано использование данного метода для военной техники.

Помимо непосредственно расхода картерных газов, может быть получена осциллограмма их пульсации, которая до некоторого времени казалась перспективным диагностическим показателем, однако исследования, приведённые в статьях [20; 22] и результаты эксперимента (рис. 1.6) в рамках диссертации [37] В. В. Егорова показывают, что в действительности осциллограмма пульсации картерных газов не несёт в себе диагностической информации.

Электрические: регистрация процессов, происходящих в электрических подсистемах двигателя, прежде всего стартере.

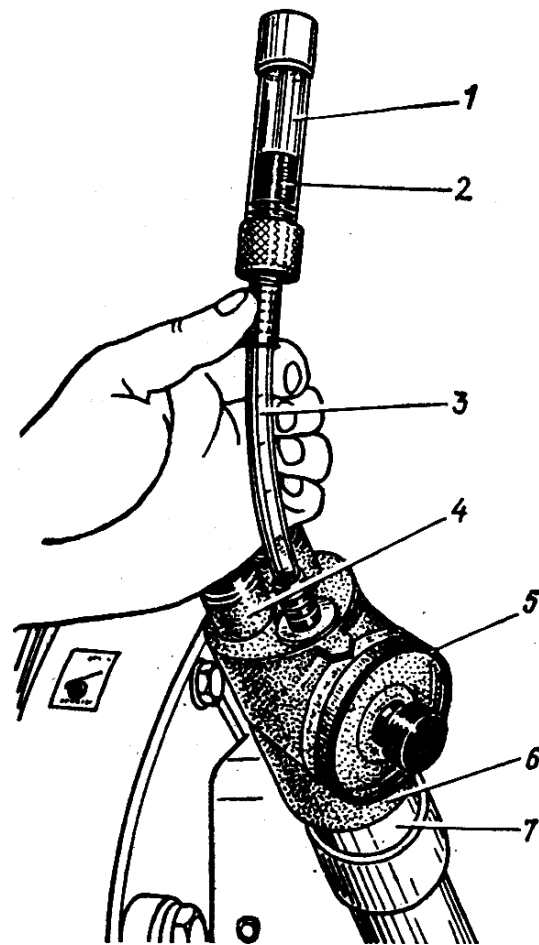


Рисунок 1.5 — Индикатор расхода газов КИ-13671

1 — трубка, 2 — сигнализатор, 3 — удлинитель, 4 — патрубки, 5 — крышка, 6 — корпус, 7 — переходник



Рисунок 1.6 — Сравнение осциллограмм пульсации картерных газов

Метод относительной компрессии ([6; 59; 81]) позволяет получить представление о развиваемом в цилиндрах давлении сжатия, но не во всех ситуациях

данный метод работает с достаточной точностью. К примеру, авторами работы [72] произведено моделирование тока, потребляемого стартером при холодной прокрутке коленчатого вала — однако на таком режиме будет увеличена доля потерь на трение из-за увеличенной вязкости масла, к тому же в работе не учтено изменение напряжения аккумуляторной батареи под нагрузкой. Более подробная математическая модель разработана для тепловозных двигателей авторами статьи [26], и показанные в ней теоретические осциллограммы в большей степени отражают реальность. Помимо того, наличие на тепловозных и судовых дизелях индикаторных кранов позволяет значительно повысить доступность двигателя для диагностики.

Тепловые: использование термопар, пирометра или тепловизора для обнаружения тепловых аномалий, являющихся диагностическими признаками. Основными источниками нагрева в двигателе являются рабочий процесс и трение.

Параметры рабочего процесса, при котором происходит сгорание топливовоздушной смеси, отражаются на температурах различных точек головки, блока двигателя, а также выпускного коллектора. Авторами работы [11] показано, как на примере тепловизионной съёмки можно выявить аномалии рабочего процесса двигателя. Обзор [105] отражает возможности применения тепловизоров для диагностики судовых дизелей (рис. 1.7).

Излишнее трение в подшипниковых узлах (как скольжения, так и качения) также может быть обнаружено при помощи тепловых методов, чему посвящено исследование [7].

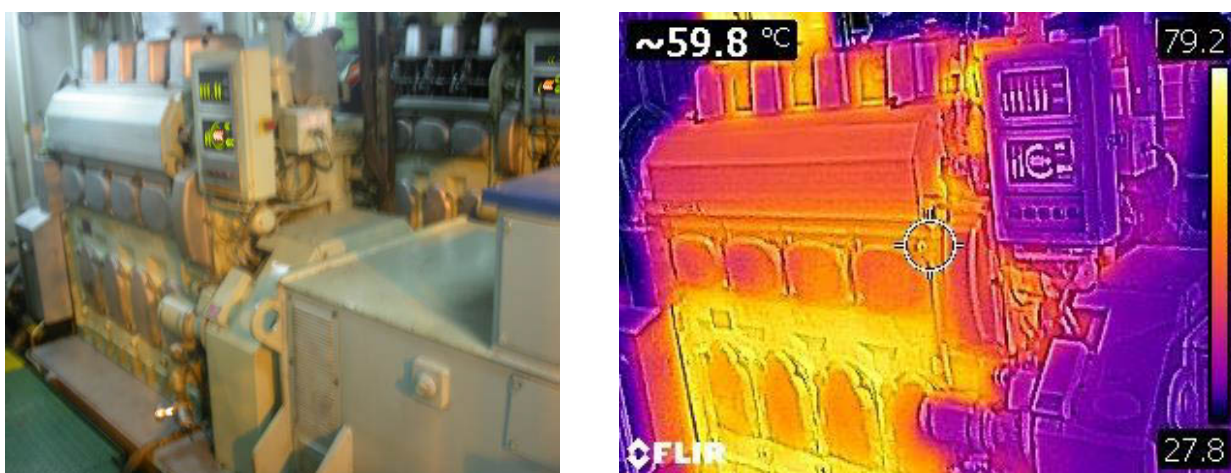


Рисунок 1.7 — Тепловизионная съёмка судового дизеля
Автор: Ян Монета, Морской университет Щецина, Польша

Динамические: анализ показателей динамики ДВС, в первую очередь — приведённых к коленчатому валу.

Данная группа методов позволяет определить рабочие показатели двигателя, основываясь на его динамических характеристиках. К примеру, в работе [32] показано, что состояние регулятора отражается на значениях углового ускорения ε коленчатого вала.

При этом необходимо помнить, что конструктивное исполнение двигателей способно внести погрешности в результаты измерений при разгоне двигателя. Автором статьи [21] показано, что для бензиновых двигателей более правильным является изменение подачи топлива при уже полностью открытой дроссельной заслонке — однако, далеко не на всех двигателях существует возможность произвести именно такую манипуляцию.

Впрочем, более важной характеристикой двигателя является его мощность, значение которой также можно определить, ориентируясь на показатели ε . Данный метод, заложенный в 1970-х годах, претерпел ряд изменений, и на текущий момент представлен комплексом ИМДЦ-2: [36]. Переход в цифровой формат позволил значительно упростить работу с прибором, пусть и за счёт некоторого снижения точности — которое, впрочем, не оказывает значительного влияния на результаты диагностики. Упрощение работы достигнуто не в последнюю очередь благодаря тому, что все настройки прибора производятся путём загрузки цифрового профиля двигателя с точными значениями коэффициентов, а не при помощи вращения ручек потенциометров, как в приборах ИМД-2М и ИМД-Ц (рис.1.8).

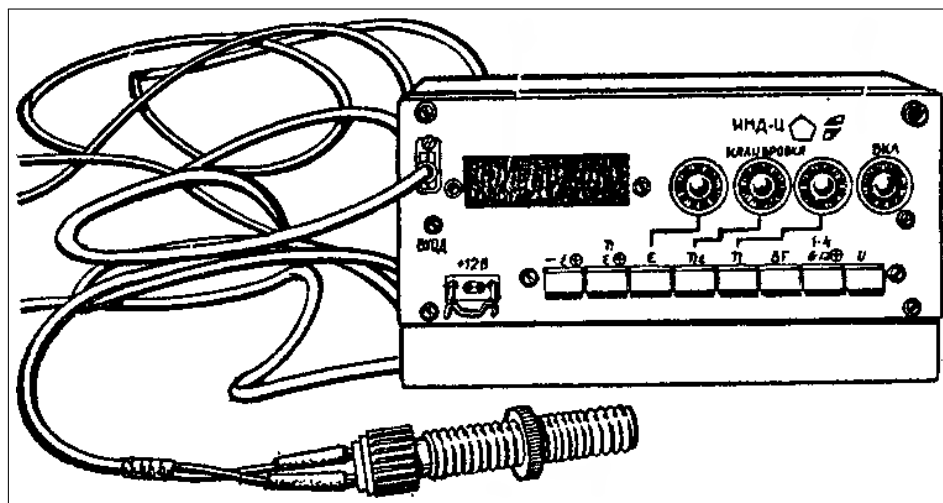


Рисунок 1.8 — Прибор ИМД-Ц

Также динамические методы позволяют определить механические потери в двигателе: [71]. Для этого используется режим выбега, а полученные данные позволяют выявить источник повышенного трения, локализовав тем самым неисправность, которая скорее всего будет связана с кривошипно-шатунным механизмом и с меньшей вероятностью — с цилиндро-поршневой группой.

Задействовав более точные технологии, возможно получить динамические характеристики двигателя с привязкой к углу поворота коленчатого вала, что, к примеру, позволило авторам работы [73] выявлять пропуски зажигания бензинового ДВС. Аналогичный результат описан в статье [65], где, помимо бензинового двигателя ВАЗ-2111 исследовался дизельный ЯМЗ-238, для которого отключение форсунки одного цилиндра приводило к снижению соответствующих ему мгновенных значений углового ускорения коленчатого вала.

Развитие цифровых и полупроводниковых технологий позволило в значительной мере снизить габаритные размеры и себестоимость диагностического оборудования, как это показано в работе [41] на примере нагрузочного стенда для тракторных двигателей. Помимо того, уход от аналоговой составляющей позволяет также повысить точность и, что немаловажно, показатели надёжности самих диагностических приборов.

Цифровые: возможно, было бы не совсем правильно выделять данные методы в отдельную группу, но в рамках обзора важнее именно принцип получения информации от двигателя.

Развитие компьютерных технологий поспособствовало упрощению передачи мониторинговых данных от цифровизованной техники, на которых не в последнюю очередь основывается предиктивная стратегия сервиса: [43; 48; 97]. Помимо того, наличие электронных интерфейсов способно помочь при диагностировании по классическим индикаторным показателям: [39]. Авторы работы [4] придерживаются мнения, что мониторинговые данные способны нести информацию, достаточную для корректировки интервалов сервисных мероприятий.

К примеру, подобным мониторинговым показателем может служить давление в масляной системе. Известна логическая цепочка: износ вкладышей смазываемых подшипников скольжения ведёт к уменьшению их гидравлического сопротивления, а следовательно, уменьшению давления масла перед ними.

Авторами статьи [61] предложена установка датчика давления в данной диагностической точке с последующим непрерывным мониторингом.

При наличии развитого бортового электронного оборудования возможно спроектировать систему самодиагностики машины — в первую очередь, самого энергетического оборудования, а не только датчиков и управляющих элементов. Более сложные технические системы, такие, как локомотивы, изначально имеют развитую сеть датчиков, и при наличии полноценного бортового компьютера анализ исправности может производиться отдельной установленной на нём программой, как это предлагают авторы работы [49]. В статье [82] описывается подход к диагностике двигателя в мониторинговом режиме путём анализа его КПД на основе данных обратной связи от топливной системы Common Rail.

В то же время, авторы работы [98] подчёркивают, что удалённая диагностика МЭС должна производиться без вмешательства в конструкцию — в противном случае подобный подход может либо привести к нежелательным правовым последствиям, либо потребовать дополнительных мероприятий по сертификации.

Однако, необходимо помнить, что увеличение числа электронных устройств на двигателе, в особенности — с применением электронного блока управления (ЭБУ), снижает общую надёжность и переносит часть отказов на сами электронные компоненты. В свою очередь, как показано в статье [34], коды ошибок ЭБУ в лучшем случае в четверти случаев способны дать хоть какое-то представление о неисправностях механической части двигателя.

Тем не менее, данные от ЭБУ в некоторых случаях способны повысить информативность диагностики. Как показано в источнике [23], подключение сканера позволяет локализовать некоторые неисправности топливной системы Common Rail. Более глубокая диагностика пьезоэлектрических форсунок данной разновидности топливных систем реализуется при помощи анализа электрических показателей также без снятия с двигателя, например, по алгоритмам, показанных в статьях [42; 54]. Также всеобъемлющий обзор различных неисправностей электрических форсунок приведён в работе [64].

Химические: как и в случае с цифровыми методами, может быть не совсем корректным выделение данного подмножества методов в отдельную группу. Так или иначе, к химическим методам можно отнести те, в рамках которых анализируется химический состав продуктов работы двигателя.

Очевидно, тематику настоящей диссертации можно отнести к данной группе методов — однако, как будет показано далее, использование состава выхлопных газов как диагностического показателя рассмотрено в исчезающе малом количестве работ, что подчёркивает актуальность выбранной задачи.

Полноценный анализ выхлопных газов требует наличия многокомпонентного газоанализатора, а в случае с дизельным двигателем, как правило, используют ещё и дымомер, определяющий оптическую плотность выхлопных газов (впрочем, некоторые исследователи ограничиваются лишь дымомером, что крайне сильно сужает спектр получаемых данных).

Ещё более сложное оборудование применяется при анализе масла двигателя (краткий обзор приведён в работе [9]). Подобный метод позволяет с высокой точностью определить, какие детали двигателя подвержены наибольшему износу: к примеру, повышенное содержание свинца в масле свидетельствует об износе подшипников скольжения.

Также анализ масла двигателя с применением физико-химических методов подробно описан в статье [51]. Показано, что относительная диэлектрическая проницаемость может выступать в качестве комплексного показателя, характеризующего состояние масла. Авторы работы [70] приводят зависимости изменения диэлектрических характеристик моторного масла в процессе эксплуатации: разница показателей составляет от 5.9% до 16.7%.

Похожий принцип задействован авторами работы [76] для анализа дизельного топлива, неудовлетворительное качество которого способно спровоцировать повышенный износ деталей топливной системы.

Углублённые методы требуют демонтажа каких-либо элементов двигателя, поэтому не могут быть реализованы в оперативном режиме — но получаемая от них информация намного более конкретизирована. В целом их можно также классифицировать на базе физических процессов, но поскольку данная группа методов не относится к тематике работы, ограничимся обзором нескольких примеров.

Известным средством диагностики состояния цилиндро-поршневой группы (ЦПГ) является пневмотестер, позволяющий оценить утечки через неплотности ЦПГ конкретного цилиндра при подаче воздуха извне. Авторами работы [55]

проводится модернизация данного метода, направленная на повышение достоверности результатов диагностирования.

Также к углублённым методам можно отнести большинство видов дефектоскопии. Наиболее распространена ультразвуковая дефектоскопия, современные возможности которой показаны в статье [101].

В данной работе будет задействовано изменение параметров топливной системы высокого давления. Как правило, настройка форсунок производится на стационарных стендах либо их переносных (наподобие показанного в работе [12] и на рис. 1.9) аналогах. Недостатком стендовой диагностики является то, что она требует демонтажа форсунки (а вместе с этим — и части топливной системы), что требует дополнительных затрат труда и расходных материалов (по крайней мере, медных колец, уплотняющих форсунку: стоимость единичного кольца невелика, но их массовая замена станет ощутимой тратой).



Рисунок 1.9 — Переносной стенд для диагностики форсунок механического впрыска

Решение было представлено ещё в советское время специалистами ГОСНИТИ, разработавшими прибор КИ-16301М, вариант исполнения кото-

рого впоследствии получил название «механотестер топливной аппаратуры» МТА-2: [87]. Следует отметить, что несмотря на более высокие эксплуатационные характеристики и возможность модификации, МТА-2 несколько менее удобен в эксплуатации из-за того, что имеет только одну рукоятку, против двух у КИ-16301. В любом случае, функционал обоих приборов идентичен, поэтому под механотестером далее будет иметься в виду подобный класс устройств в целом.

Основной задачей механотестера является проверка механических форсунок без снятия их с двигателя, что позволяет ускорить процесс диагностирования и настройки за счёт незначительного снижения информативности: качество распыливания топлива оценивается лишь на слух, а не визуально, как на стенде.

Более подробно устройство механотестера и принцип работы с ним будет рассмотрено в разделе 3.1, стр. 69.

В симбиозе ГОСНИТИ и МГАУ (нынешний ИМЭ) был также разработан прибор АГЦ — анализатор герметичности цилиндров, позволяющий по соотношению показателей разрежения в цилиндре на различных режимах измерения оценить состояние не только цилиндро-поршневой группы, но и клапанного механизма: [90]. Известный метод измерения давления сжатия (компрессии) даёт результат, подверженный влиянию слишком большого количества факторов — такие диагностические показатели называют интегральными. Дифференциальные же показатели, наоборот, характеризуют конкретный структурный параметр.

Получаемые разнородные данные от различных методов диагностики не всегда дают очевидную локализацию неисправности, поэтому для их анализа возможно задействовать экспертную систему. Являясь предыдущей перед нейросетевыми алгоритмами стадией развития искусственного интеллекта, экспертные системы по сравнению с ними обладают тем преимуществом, что не требуют больших вычислительных мощностей или подключения к интернету — все вычисления производятся на самом устройстве.

Оптимальным соотношением точности и производительности обладают экспертные системы, основанные на нечёткой логике (например, показанная в работе [28]). Алгоритмы нечёткой логики основаны на работе с вероятностными показателями вместо манипуляций с булевской (истина / ложь) логикой.

Использование искусственного интеллекта также возможно для проведения экспресс-тестов на основе дешёвых расходных материалов и устройства с фотокамерой. Авторами работы [18] предложен вариант реализации капельной пробы моторного масла с применением мобильного приложения.

Помимо того, алгоритмы машинного обучения, как утверждают авторы статьи [62], позволяют обнаружить корреляцию между на первый взгляд не связанными параметрами: в приведённом источнике это рассмотрено на примере зависимости давления масла двигателя от состояния цилинд्रो-поршневой группы.

В работе [74] показана нейронная сеть на базе нечёткой логики, позволяющая установить соответствие между величинами износа коленчатого вала и остаточным ресурсом двигателя. Представляется не совсем корректным использование именно этого показателя, но сам подход позволяет подтвердить или опровергнуть зависимости между структурными и диагностическими показателями, а также наработкой и остаточным ресурсом двигателя.

Сотрудниками ИМЭ В. В. Егоровым и В. А. Чечетом разработана экспертная система Exsys, авторство которой закреплено свидетельством [99]. Система также работает на базе нечёткой логики и первоначально, в версии 1.0, опиралась на базы данных в файлах *.xlsx, требуя для работы наличие MS Excel на компьютере. В версии 2.0 были полностью переработаны базы данных, теперь создаваемые в специальном редакторе. Это позволило уйти от требований наличия проприетарного ПО, а также обеспечило кроссплатформенность ядра экспертной системы.

Помимо тракторных дизелей, Exsys способна локализовать неисправности любого оборудования, для которого имеется база данных, например, тепловозных ДГУ [38] и в теории даже биологических объектов.

Опираясь на опыт применения более ранних экспертных систем, авторы Exsys отказались от алгоритма Байеса. Его использование подробно описано в статье [50] и хорошо зарекомендовало себя применительно к узлам, имеющим единственную функцию (в приведённом источнике показан пример форсунки дизеля Д-243). В то же время, более сложные объекты требуют иных подходов, поэтому разработчиками Exsys был задействован иной алгоритм, названный ими "инверсным".

Суть работы Exsys заключается в анализе матричной базы данных о соответствии неисправностей и их признаков с учётом ориентировочных вероятностей появления самих неисправностей. Фрагмент основной матрицы, включающей в себя условные вероятности P_{ij} появления признака S_j при наличии неисправности P_i , показан в табл. 1.3.

Сам алгоритм приведён в формуле 1.1:

$$P_i = 1 - \prod_j (1 - s_j \cdot P_{ij}), \quad (1.1)$$

где s_j — весовой коэффициент, учитывающий степень уверенности оператора в наличии того или иного признака, либо силу его проявления. В графическом интерфейсе программы, показанном на рис. 1.10, коэффициент s_j выбирается по четырём градациям от 0 до 0,9.

Выбранные оператором признаки подсвечиваются одним из четырёх цветов от красного до зелёного в зависимости от указанного весового коэффициента.

Таблица 1.3

Фрагмент матрицы условных вероятностей

Признаки \ Неисправности	Затруднённый пуск дизеля	Остановка дизеля сразу после пуска	Нестабильная работа на холостом режиме	Чрезмерный расход топлива	Стук в двигателе
Неправильная регулировка зазоров ГРМ	0.05	0	0.2	0.15	0.35
Сдвиг фаз газораспределения	0.3	0	0.45	0.4	0.2
Неправильная регулировка оборотов ХХ	0	0.8	0.5	0	0
Некорректное подсоединение топливопроводов	0	0	0.3	0.4	0.06
Неправильный алгоритм пуска	0.35	0	0	0	0
Неправильный тепловой режим	0	0	0	0	0

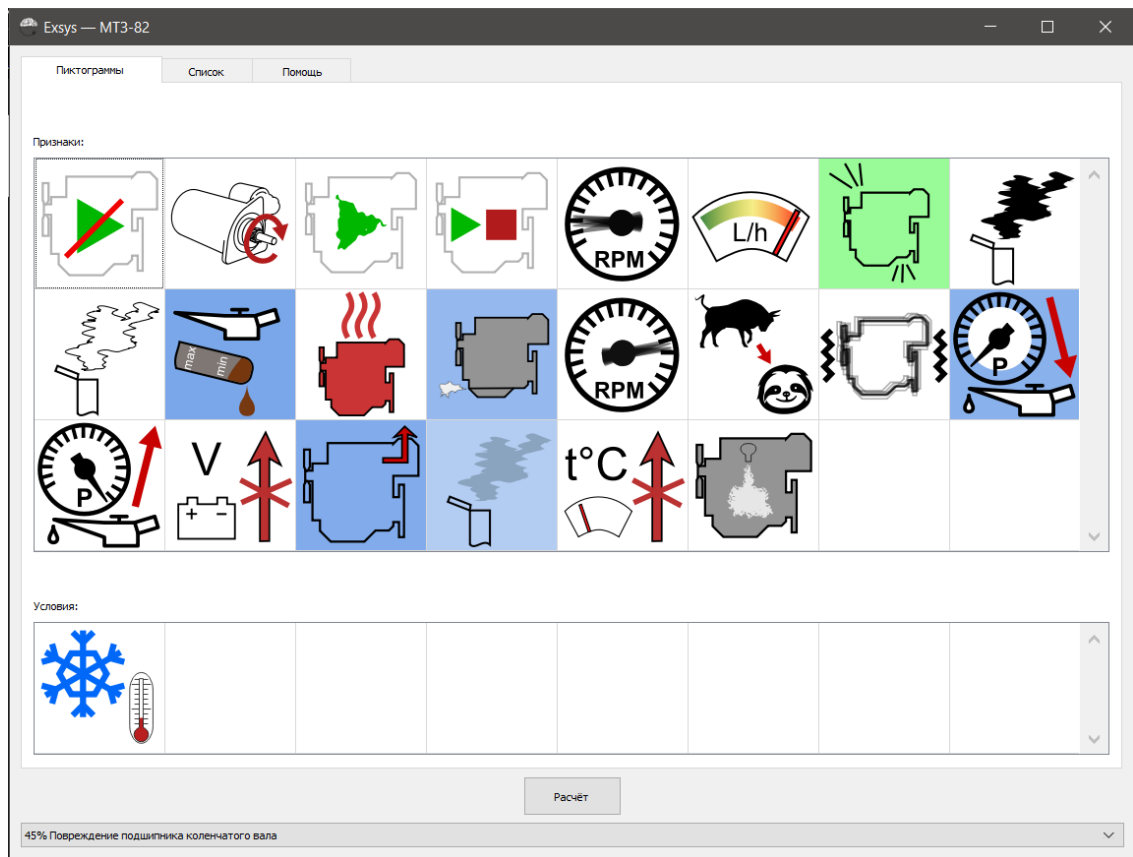


Рисунок 1.10 — Интерфейс программы Exsys

Сразу же система определяет возможные неисправности при указанном наборе признаков и отображает их в виде выпадающего списка внизу окна.

Также при расчёте определяются признаки, наиболее информативные для дальнейшей локализации неисправности, и их пиктограммы подсвечиваются различными оттенками синего — с целью того, чтобы оператор проверил объект на их наличие. Для выявления таких признаков служит алгоритм, проиллюстрированный формулой 1.2.

$$\Delta_{\max}^{\text{отн}} = P_{\max} \left(\frac{P_{\max} \cdot N}{\sum_{j=1}^N P_{ij}} - 1 \right), \quad (1.2)$$

Критерием информативности признака является величина $\Delta_{\max}^{\text{отн}}$: признак, для которого её значение максимально относительно других, подлежит проверке первым. $P_{\max}$ — максимальная условная вероятность для рассматриваемого признака, а N — количество рассматриваемых неисправностей (как правило, к расчёту принимается те, для которых определённая на предыдущем этапе вероятность превышает некоторый порог).

Для дальнейшей локализации неисправности авторами Exsys заложены основы алгоритма для вычисления условных вероятностей неисправностей на основе диагностических данных. Наиболее информативные методы для текущего набора вероятных неисправностей определяются аналогично алгоритму 1.2: фактически, каждый рассматриваемый метод диагностики эквивалентен органолептическому признаку, но имеет изменяемые в зависимости от результатов диагностирования значения P_{ij} .

В настоящей диссертации будет рассмотрено формирование математических зависимостей, позволяющих установить функциональную зависимость $P_{ij} = f(X)$, где X — значение измеренного диагностического показателя.

1.3 Научный задел выбранного направления

Снижение экологического воздействия МЭС и двигателей внутреннего сгорания в целом является актуальной на данный момент задачей, в решении которой принимают участие в том числе специалисты ИМЭ имени В. П. Горячкина РГАУ-МСХА. К примеру, авторами работ [16; 31] исследуется подача воды в цилиндры дизеля, которая успешно позволяет снизить выбросы вредных веществ до 45 % в отдельных случаях. Схожий эффект достигается при впрыске спирта ([25]), что несколько увеличивает стоимость эксплуатации, но при этом помогает избежать негативных эффектов от возможного нахождения воды в двигателе.

Многие научные работы, посвящённые выхлопным газам дизельных двигателей, направлены преимущественно на совершенствование методов нейтрализации вредных веществ, содержащихся в отработавших газах: [79]. Тем не менее, в общем инфополе данной тематики всё же удаётся найти некоторые статьи, посвящённые более детальному анализу первопричин повышения концентрации составляющих выхлопных газов.

Работа [83], как следует из названия, посвящена непосредственно диагностике двигателей по составу выхлопных газов и включает в себя некоторые выводы по локализации неисправностей бензиновых ДВС на основе анализа содержания основных регистрируемых газоанализаторами компонентов, однако приведённый в статье обзор, к сожалению, слишком поверхностен.

В статье [108] рассмотрено влияние углов начала подачи впрыска и взаимного расположения форсунок газодизельного (ДТ+метанол) двигателя на

параметры распределения и сгорания топлива. Установлено, что запаздывание подачи ДТ относительно подачи метанола позволяет уменьшить выбросы сажи.

Авторами исследования [103] осуществлялся мониторинг выбросов сажи в реальном времени при помощи датчика, установленного в выхлопной трубе автобуса. Испытания проводились зимой в районе Улан-Батора, а их научной новизной являлась именно установка датчика на транспортное средство и замер реальных показателей вместо лабораторных испытаний. Сам датчик основан на принципе фотоакустической спектроскопии, и фиксирует рассеивание света от источника (инфракрасный лазер 852 нм).

Помимо выбросов в окружающую среду, образование сажи ухудшает условия трения в самом двигателе, как показано в работе [47]. Само по себе содержание сажи и иных примесей твёрдых частиц влияет на дымность работы двигателя. Для её измерения применяют дымомеры — как, например, показано в руководстве [29]. Впрочем, дымность двигателя не имеет прямой корреляции с составом отработавших газов.

С целью понимания причин повышения выбросов CO_2 и NOx от дизельного двигателя при движении ТС вверх и вниз по уклонам авторами работы [106] разработан метод анализа данных показателей с точки зрения теории ДВС. 262 опытные поездки подтвердили устойчивое наличие данного эффекта. Наибольшие выбросы были зафиксированы при движении вверх, причём обогащение смеси повышало содержание CO_2 , а обеднение приводило к увеличению показателя NOx .

Повышение выбросов в условиях повышенной и неравномерной нагрузки подтверждается в работе [107]: на основе опытных данных авторами построена модель выбросов NOx дизеля, работающего во внедорожных условиях. В процессе исследования установлены корреляции содержания NOx с частотой вращения вала дизеля, нагрузкой на него и температурой выхлопных газов.

Как показано в пособии [3], на выбросы оксидов азота (на примере судового дизеля) оказывает влияние коэффициент избытка воздуха — таким образом, отслеживание данного показателя при работе дизеля может указать на более эффективные режимы его работы.

Влияние нагрузки двигателя на показатели выхлопных газов может быть снижено путём применения гибридных трансмиссий. Авторами работы [104] показано, что помимо снижения выбросов оксидов азота на 30% в городском

цикле, гибридная трансмиссия позволяет снизить потребление топлива на 45% в городском и на 15% в смешанном циклах, в том числе за счёт применения рекуперативного торможения с регенерацией механической энергии.

Аналогичного мнения придерживаются авторы монографии [58], где приведён краткий обзор гибридных трансмиссий. Их использование позволяет ДВС работать на режиме максимальной эффективности и экологичности. Подробно конструкция и тонкости эксплуатации гибридных трансмиссий описаны в работе [44].

Говоря о том, что гибридные трансмиссии позволяют более полно использовать мощность ДВС, необходимо упомянуть и негативный эффект от устройств нейтрализации отработавших газов: их применение приводит к некоторому снижению мощности двигателя. Минимизацией такого влияния занимаются ряд исследователей, что, например, отражено в статье [10].

Специалисты иных отраслей также занимаются вопросами контроля состава выхлопных газов: к примеру, в работе [78] представлен обзор методов и средств измерения концентрации оксидов азота в отработавших газах газотурбинного двигателя. Авторы указывают, что текущий уровень развития отечественных и зарубежных технологий пока что не позволяет осуществлять непрерывный мониторинг состава отработавших газов на каждом серийном двигателе.

В работе [75] приведена таблица наличия неисправностей в зависимости от состава отработавших газов, но, к сожалению, рассмотрены только бензиновые карбюраторные двигатели, фактически устаревшие на настоящий момент.

Более полно диагностика по составу отработавших газов раскрыта в пособиях [66; 67]; впрочем, анализ состава ОГ рассмотрен только в применении для бензиновых двигателей, для дизельных же приведена информация лишь по измерению дымности.

Наиболее близким к выбранной для настоящей диссертации тематике оказался источник [60] за авторством В. Н. Ложкина и А. И. Фомичева. Как будет показано далее, используемые в настоящей диссертации методы, пусть и используют менее нагруженные режимы работы дизеля, но значительно проще в практическом применении:

а) задействуется только газоанализатор, без применения эластичной ёмкости-пробоотборника;

б) измерения проводятся на установившемся режиме холостого хода: вариант со свободным ускорением коленчатого вала требует очень точной выдержки времени взятия пробы, что затрудняет реализацию данного подхода по сравнению с установившимся режимом, в котором газоанализатор отбирает пробу из условно стационарного потока отработавших газов.

Более подробный анализ режимов работы двигателя, требуемых для получения качественных диагностических данных, будет приведён в следующей главе.

1.4 Выводы. Задачи диссертации

Коротко резюмируем изложенное в данной главе.

Применение анализа выхлопных газов для диагностики дизельных двигателей упоминается в литературе крайне редко, большинство исследований направлены на поддержание экологической безопасности и эффективности работы ДВС. Лишь одно современное исследование имеет схожую тематику, но используемые в нём методы, предположительно, снижают качество получаемых диагностических данных. В связи с этим задачи настоящей диссертации представляются следующими:

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.

2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ДИАГНОСТИКИ ПО СОСТАВУ ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ

Исследователями теории ДВС представлено большое количество материала, позволяющего с той или иной точностью смоделировать поведение двигателя с заданными характеристиками. Однако, практика показывает, что количество влияющих факторов настолько велико, что спрогнозировать количественные характеристики состава выхлопных газов можно лишь на основе статистики.

По этой причине содержание данной главы будет посвящено решению двух практических проблем: определению режима работы двигателя, оптимального для диагностики по составу выхлопных газов; формированию алгоритма распознавания численных показателей для дальнейшего развития экспертной системы Exsys.

2.1 Выбор режима работы двигателя

Ранее, в конце предыдущей главы, была упомянута научная работа [60], авторами которой (В. Н. Ложкин, А. И. Фомичев) предлагается использовать состав выхлопных газов дизеля в качестве набора диагностических показателей. Измерение производилось на режиме свободного ускорения дизеля (полная подача топлива без нагрузки). В таком режиме нагрузкой выступают движущиеся части самого двигателя, во-первых, обладающие неким суммарным, приведённым к коленчатому валу, моментом инерции, а во-вторых, создающие силы трения в местах сопряжения движущихся деталей.

Авторами работы указывается, что для измерения состава выхлопных газов был задействован «газоаналитический модуль АСГА-Т». Поиск в открытых источниках по такой формулировке не дал сколь-нибудь значимых результатов, поэтому характеристики задействованного прибора остаются неизвестными.

Режим работы, указанный в описанном источнике, подразумевает не менее 6 свободных разгонов дизеля с промежуточной выдержкой порядка 10 секунд для стабилизации частоты вращения коленчатого вала.

Смоделируем данный режим. Для этого воспользуемся экспериментальными данными, полученными от прибора ИМДЦ-2 в процессе свободного разгона двигателя Д-240: рис. 2.1.

Показанные экспериментальные характеристики представлены в виде табличных файлов зависимостей $n_d = f(t)$, где время t измеряется в миллисекундах,

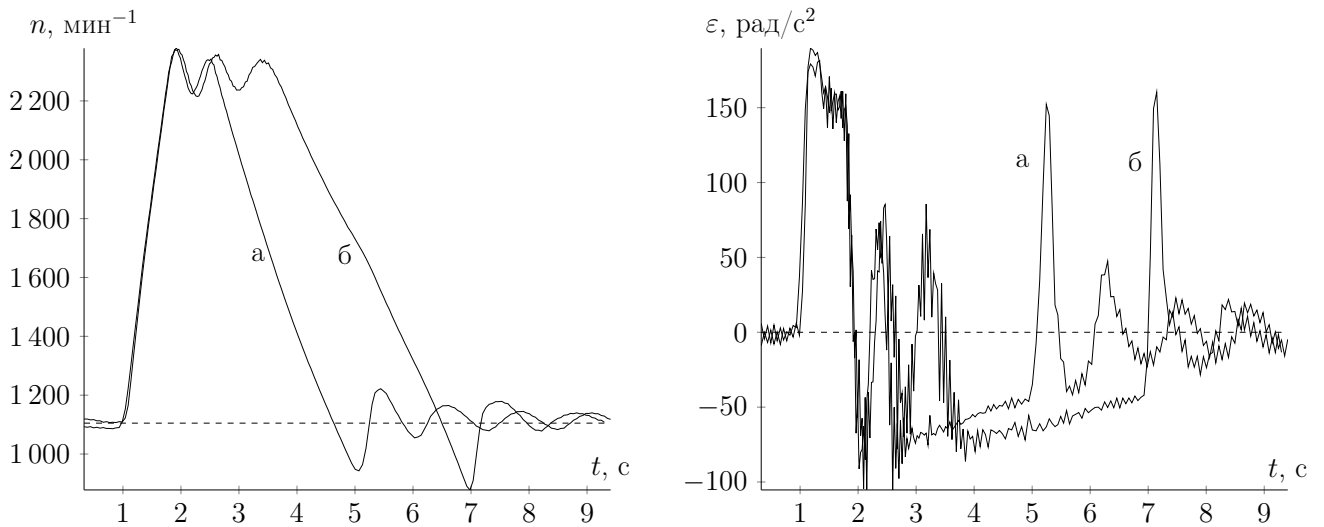


Рисунок 2.1 — Исходные данные для моделирования режима работы дизеля

а частота вращения n_d коленчатого вала — в min^{-1} . Для того, чтобы полноценно произвести моделирование, преобразуем значения с помощью линейной интерполяции так, чтобы значения t были кратны 50 мс. Для этого воспользуемся программой на Python (приложение Б.3). Для моделирования выберем характеристику А.

Результат преобразования показан на рис. 2.2. Даже без какого-либо анализа очевидно, что интерполяция данных прошла успешно.

Следующий шаг — дополнить интерполированные данные, смоделировав затухание колебательного процесса после возврата к изначальной частоте вращения коленчатого вала. Воспользуемся примитивной имитацией затухающего колебательного процесса, показанной в приложении Б.4.

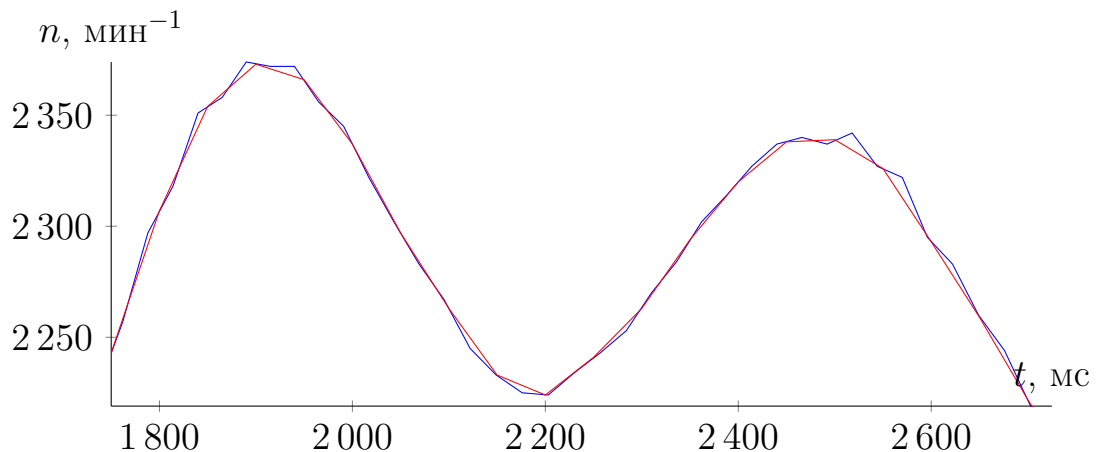


Рисунок 2.2 — Сравнение исходных и интерполированных данных
Исходные данные обозначены синим, интерполированные — красным графиком

Большая точность в данном вопросе не требуется, поэтому результат моделирования, показанный на рис. 2.3, вполне приемлем.

Аналогично источнику [60], "произведём" шесть разгонов двигателя. При этом аналитически определим приближенные значения угловых ускорений ε коленчатого вала для каждой из расчётных точек. Получившаяся модель отражена на рис. 2.4.

Следующая задача — моделирование содержания R некоего абстрактного элемента (это может быть CO , CO_2 , NOx) в выхлопных газах. Поскольку данных о возможных зависимостях $R(n_d)$ в открытом доступе обнаружить не удалось, будем основываться на допущении о том, что бóльшим значениям n_d и ε соответствуют бóльшие значения R . Итоговую зависимость представим в следующем виде:

$$R = K_{Rn} \cdot n + K_{R\varepsilon} \cdot \varepsilon, \quad (2.1)$$

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

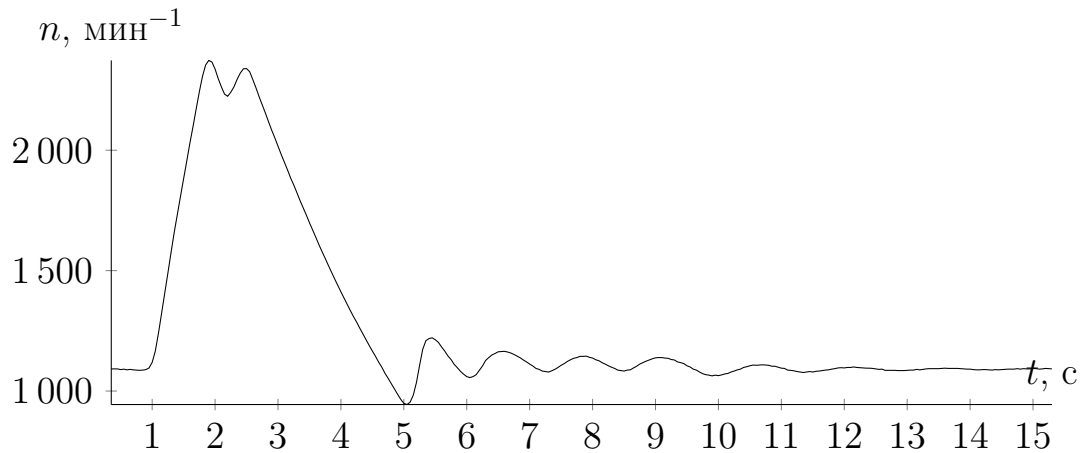


Рисунок 2.3 — Итоговая модель единичного разгона

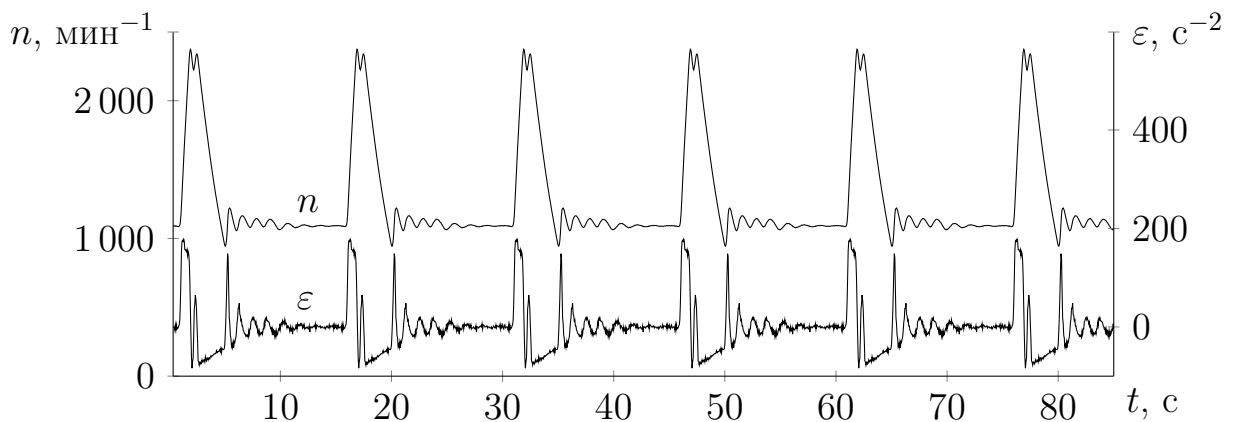


Рисунок 2.4 — Базовая модель многократного разгона

Модель мгновенного содержания R , % в выхлопных газах при $K_{Rn} = 0.001$ и $K_{Re} = 0.01$ представлена на рис. 2.5.

Конструктивные особенности газоанализаторов таковы, что измерить мгновенное значение состава отработавших газов не представляется возможным. Первым фактором является то, что проба газов поступает к блоку датчиков путём всасывания компрессором по длинной трубке, подсоединённой к пробоотборнику. Вне зависимости от режима работы двигателя, этот путь занимает порядка 5 секунд.

Данный фактор моделируется при помощи запаздывания показаний R на 5 секунд. К этому этапу данные уже экспортированы в MS Excel, по-прежнему с шагом 50 мс, поэтому задача запаздывания решается банальным смещением ссылок на ячейки.

Примерно такое же время требуется, чтобы датчики газоанализатора отреагировали на состав пробы, отобразив установившиеся значения R_s . Если бы расчёты велись в более функциональном программном комплексе, было бы целесообразно произвести подробное моделирование процесса снятия показаний датчиками, но для поставленных нами целей достаточно усреднения последних ста значений (также соответствующих 5 секундам).

Результат выполнения двух предыдущих операций с приемлемой точностью моделирует показания газоанализатора, что и показано на рис. 2.6.

Значения запаздываний и в целом закономерности реакции газоанализатора на мгновенные значения состава выхлопных газов могут отличаться от представленной модели, но сама суть происходящего отражает опыт наблюде-

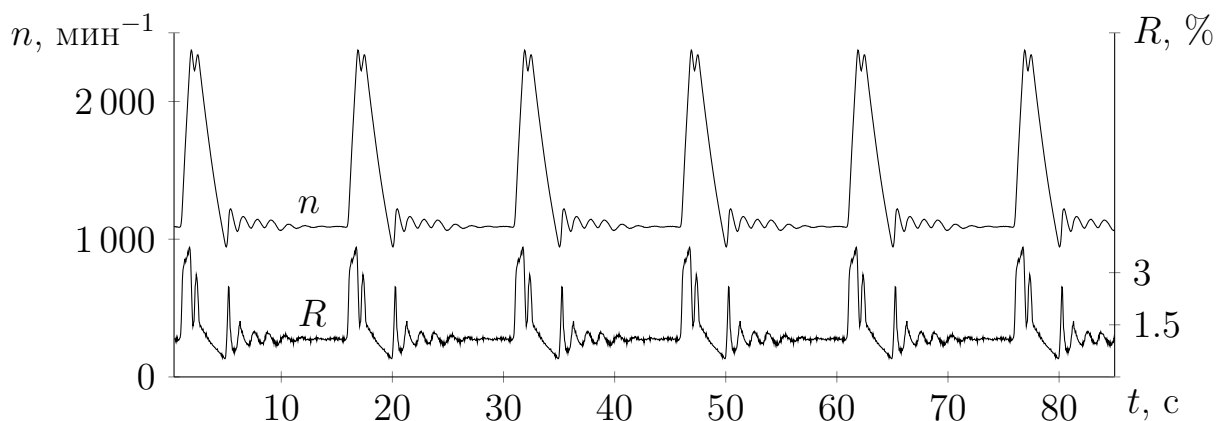


Рисунок 2.5 — Модель содержания компонента R в выхлопных газах

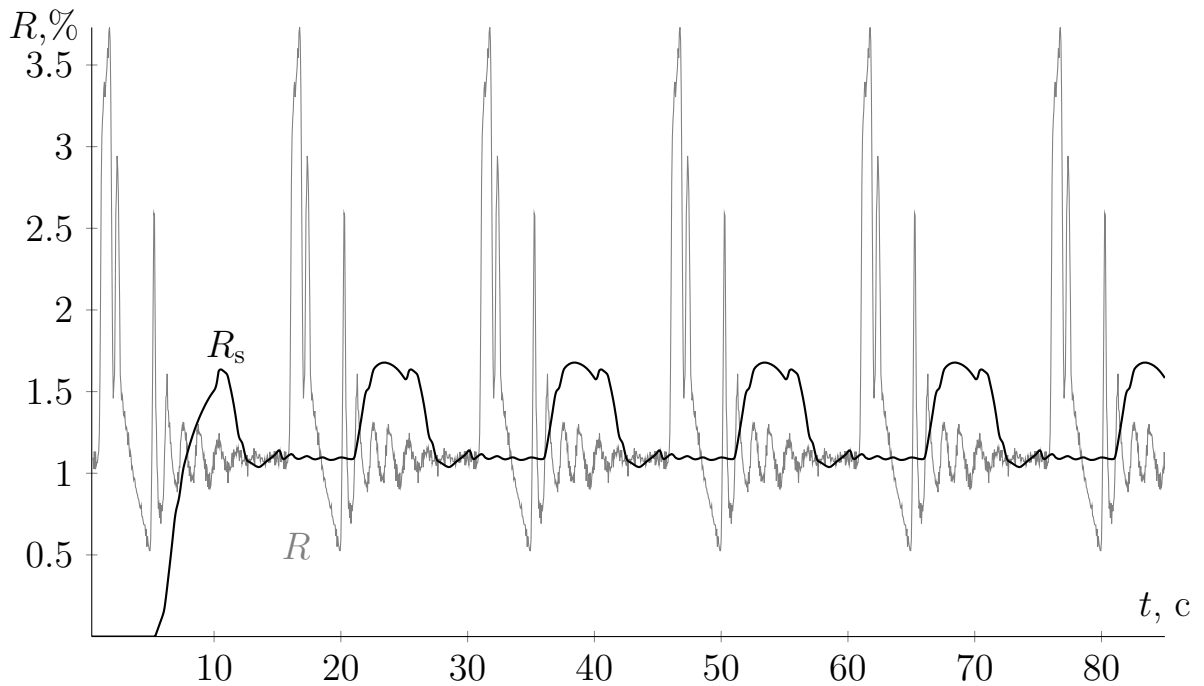


Рисунок 2.6 — Модель показаний газоанализатора по компоненту R

ний за показателями состава газов на подобном переменном режиме работы двигателя.

Более того, в зависимости от длины приёмного тракта газоанализатора и количества паразитных объёмов характеристика показателей прибора во времени может искажаться и иным образом. В характеристиках газоанализатора Инфракар 5М2.01 (приложение А.1) указано, что время установления показаний для каналов CO , CH , CO_2 может достигать 30 секунд, а каналов O_2 , NO_x — 1 минуты.

Возвращаясь к методике, описанной в приведённом источнике, смоделируем процессы, происходящие в эластичной ёмкости-проботборнике.

Поскольку объём поступающего газа в единицу времени зависит от частоты вращения коленчатого вала, необходимо учесть данный фактор. Предлагается использовать весовые коэффициенты $K_{vi} = \frac{n_{di}}{\bar{n}_d}$, рассчитанные от среднего значения $\bar{n}_d$. В таком случае, повышенным частотам будут соответствовать повышающие коэффициенты, и наоборот.

Итоговая концентрация компонента в ёмкости R_v будет представлять собой среднее значение всех элементарных расчётных точек, полученных с учётом весовых коэффициентов, что и отражено на рис. 2.7.

Представим полученную модель в виде выражения:

$$R_v(t) = t^{-1} \int_{\tau=0}^t R(\tau) \cdot \frac{n_d(\tau)}{\overline{n_d}} \cdot d\tau \quad (2.2)$$

Итоговое содержание компонента R в эластичной камере при исходном режиме испытаний равно 1.41.

Теперь изменим условия проведения испытаний. Очевидно, что при управлении подачей топлива невозможно делать выдержки времени строго одинаковыми, поэтому в изменённой модели (обозначим её буквой β) уменьшим выдержку времени между ускорениями на 1 с. Итог моделирования приведён на рис. 2.8.

Значительных изменений не наблюдается, поскольку изменилась лишь выдержка на низких значениях n_d . Итоговое значение R_v равно 1.43, то есть отличается менее, чем на 2%.

Обратимся к характеристике рис. 2.1, Б. По графику видно, что при замерах педаль подачи топлива была выдержана при максимальной n_d несколько дольше, примерно на полторы секунды. Подставим данную характеристику в нашу модель, дав ей обозначение γ . Полученные результаты показаны на рис. 2.9.

Показатель R_v для модели γ к концу измерений составил 1.581, что уже на 12% выше исходного значения. Рассмотрим наложение полученных характеристик R , R_s , R_v на рисунках соответственно 2.10, 2.11 и 2.12.

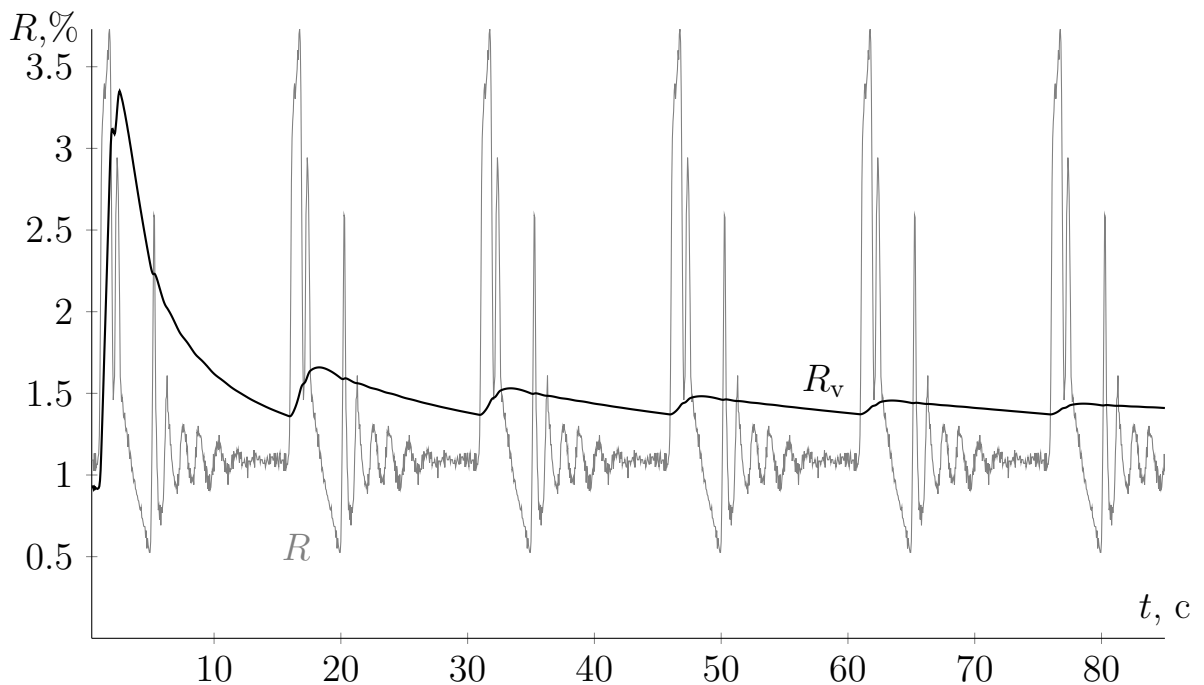


Рисунок 2.7 — Модель содержания компонента R в эластичной камере

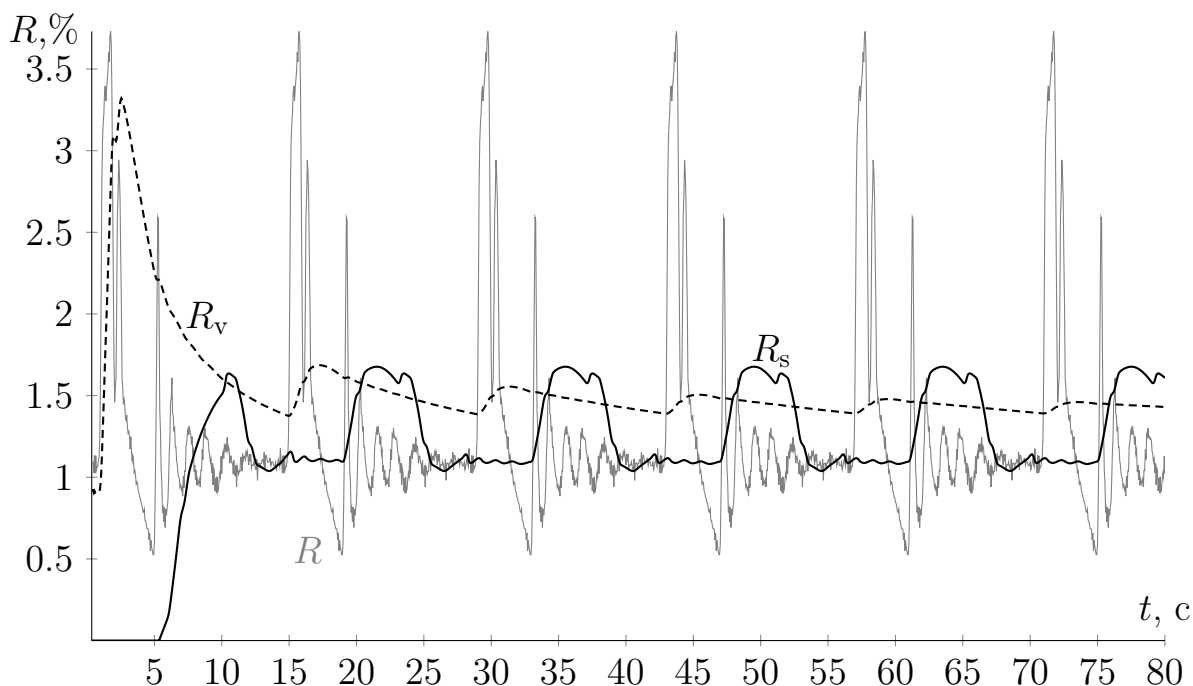


Рисунок 2.8 — Характеристики состава газов бета-модели

Несмотря на то, что эмиссия R в различных моделях очень близка по уровню (рис. 2.10), показания газоанализатора отличаются: $\max R_s^\alpha = 1.678$, $\max R_s^\beta = 1.677$ (вероятнее всего, разница вызвана исключительно погрешностью вычислений) и $\max R_s^\alpha = 2.028$, что уже на 20.9% выше, хотя единственным различием было удержание педали подачи топлива на 1.5 секунды дольше.

Разница результатов при использовании эластичной камеры, равная 12%, с одной стороны, находится в пределах погрешности, допустимой для индикаторных методов диагностики, а с другой — такое изменение состава отработавших газов лишь при запаздывании отпускания педали подачи топлива на 1.5 секунды неприемлемо для точных измерений.

Более того, сам факт использования эластичной камеры вызывает ряд вопросов, которые вряд ли возможно решить при попытке использования такого подхода для реальной диагностики:

- каким образом надеть камеру на выхлопную трубу дизеля?
- как избежать ожогов при неизбежном контакте с нагретым металлом?
- как снять камеру с выхлопной трубы и подсоединить к газоанализатору, избежав утечки?
- каков предел прочности самой камеры и каковы риски при её разрыве?

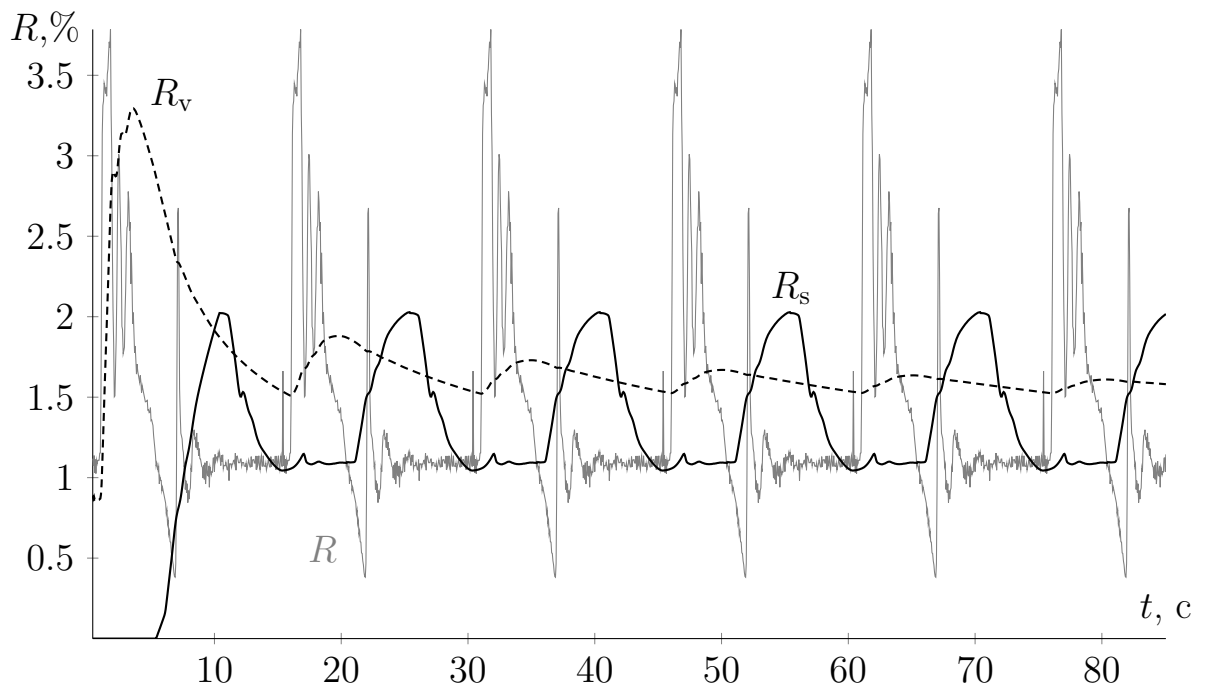


Рисунок 2.9 — Характеристики состава газов гамма-модели

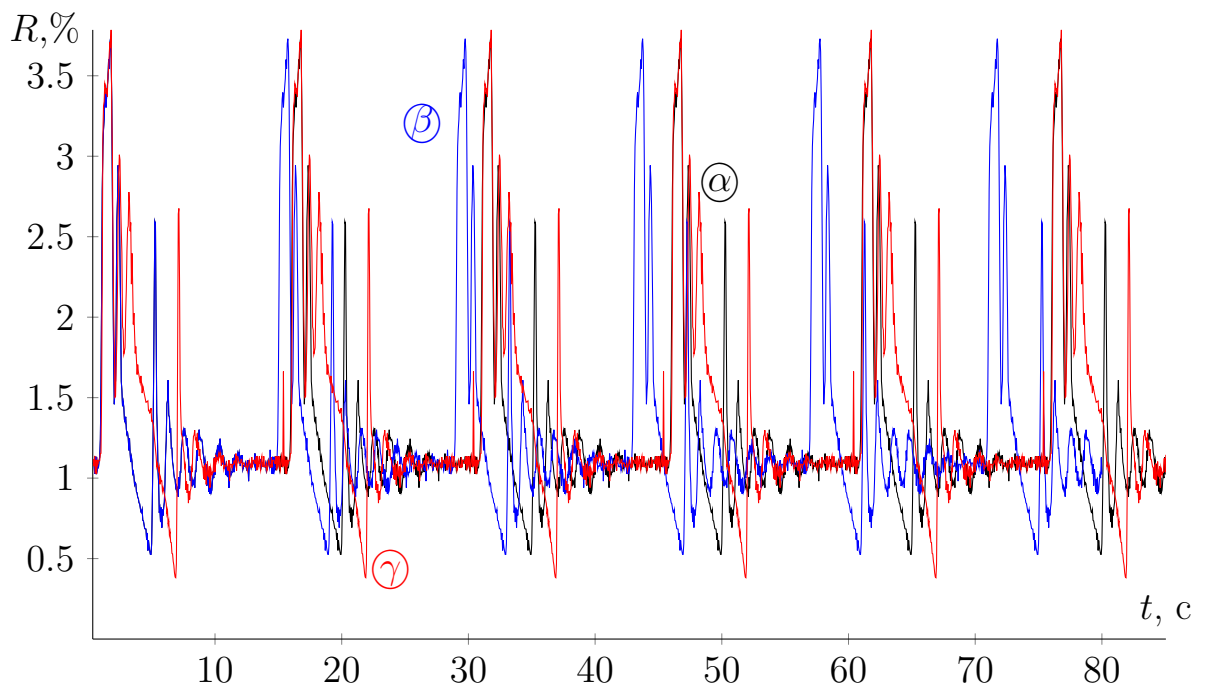


Рисунок 2.10 — Сравнение эмиссии в разных моделях

Подобные вопросы подводят к выводу о том, что использование эластичной камеры нерационально при рядовых измерениях в рамках ТО тракторов и комбайнов. Также отметим, что разница в показаниях газоанализатора без использования камеры почти вдвое больше.

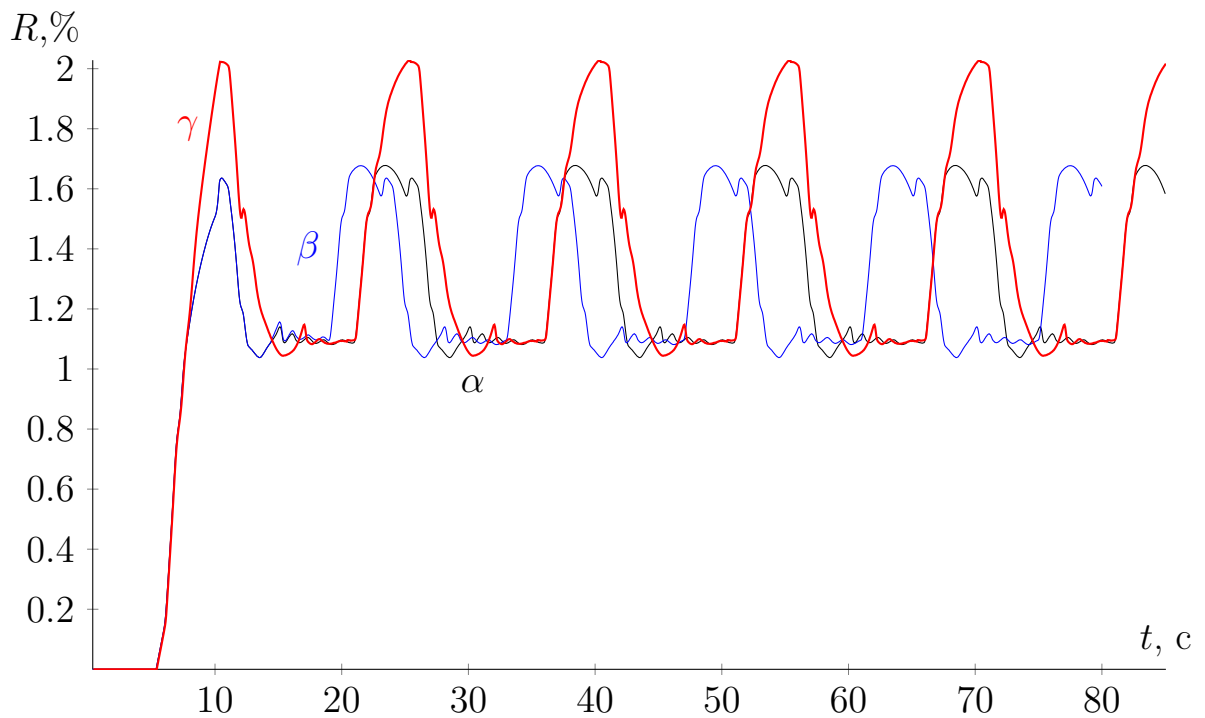


Рисунок 2.11 — Сравнение показаний газоанализатора в разных моделях

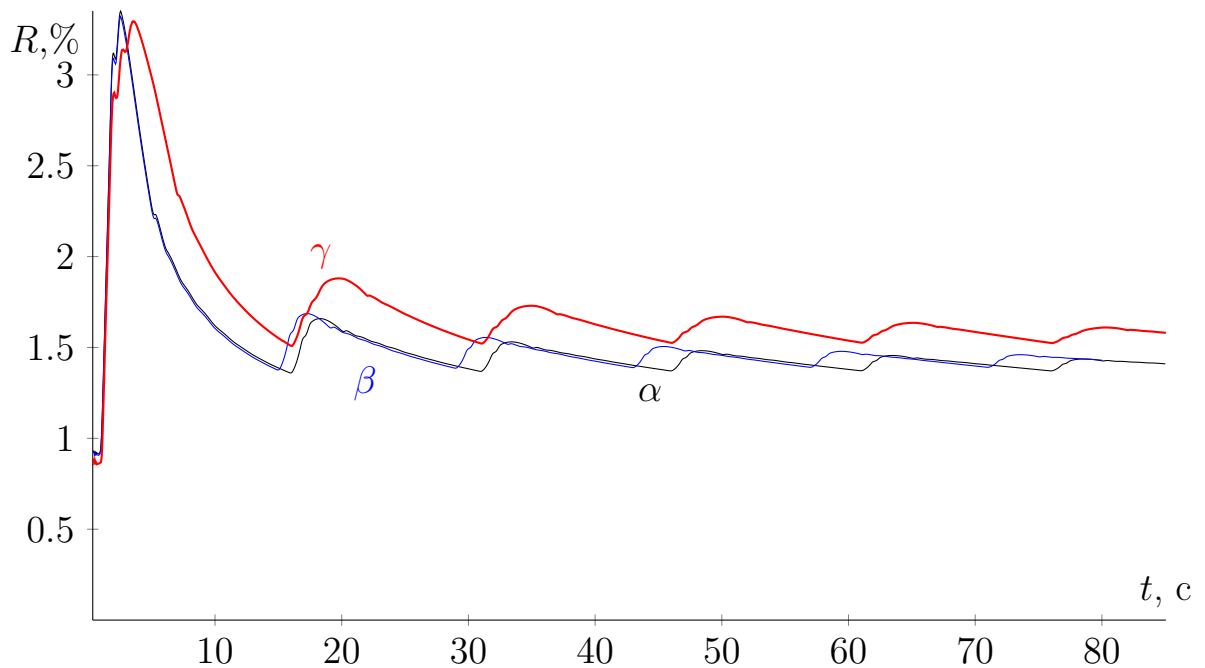


Рисунок 2.12 — Сравнение содержимого эластичной камеры в разных моделях

На основе полученных данных остаётся лишь сделать вывод о том, что единственным рациональным режимом измерения состава отработавших газов как диагностического показателя является стационарный, установившийся режим работы двигателя на холостом ходу.

Подключение нагрузки в данном случае нерационально, поскольку она является дополнительным влияющим фактором, который, к тому же, не всегда

возможно точно настроить; а подключение нагрузочного стенда требует больших трудозатрат, чем банальная установка пробоотборника в выхлопную трубу.

Очевидно, что частота вращения вала дизеля на холостом ходу будет и в действительности влиять на показатели состава отработавших газов (пусть и не по простейшей линейной характеристике, представленной в модели), поэтому предлагается использовать n_d как абсциссу для измеряемых характеристик.

2.2 Использование данных диагностирования для экспертной системы

Идея математического моделирования двигателя или его элементов для диагностических целей не нова. К примеру, в источнике [19] показан процесс создания математической модели ТНВД, а в [57] — построение и анализ графа состояний дизельного двигателя в целом.

Не менее важным является и регрессионный анализ, основанный в данном случае на определении соответствий входных и выходных параметров объекта. Как правило, подобный подход позволяет снизить сложность итоговой модели.

Аппроксимация полиномами имеет давно устоявшийся математический алгоритм, в ходе которого определяется оптимальное соотношение коэффициентов для наибольшего соответствия исходным данным. Развитие вычислительных технологий, как показано в статье [46], значительно упрощает и ускоряет процесс, но сама суть алгоритмов полиномиальной аппроксимации остаётся неизменной.

Возможности использования нейросетевых алгоритмов наряду с классическими методами аппроксимации показаны в работе [45]. Однако, следует отметить, что возможности искусственного интеллекта здесь раскрыты не полностью, поскольку набор функций для аппроксимации был ограничен тремя зависимостями — линейной, полиномиальной и гиперболической, а также их комбинациями.

Также применение нейросетей с целью аппроксимации данных показано в статье [96], авторами которой приведены примеры использования различных нейросетевых моделей.

Некоторые нейросетевые алгоритмы представлены в программном комплексе Loginom, предназначенном для анализа данных. В ходе работы над диссертацией также исследовалась данная программа, но анализ показал, что её функциональность конкретно в области аппроксимации несколько снижена, поскольку отсутствует возможность аппроксимации данных конкретной заданной

функцией. Тем не менее, необходимо отметить широкий функционал данного комплекса для решения иных задач анализа и преобразования данных, что также подчёркивается авторами работы [53].

Вопросы, подлежащие решению в данном разделе, можно отнести к двум основным группам:

1. аппроксимация экспериментальных данных для выявления закономерностей поведения диагностических показателей и приведения их к стандартизированному набору числовых данных;
2. преобразование числовых диагностических данных в вероятностные характеристики для дальнейшего анализа при помощи алгоритмов нечёткой логики.

Аппроксимация экспериментальных данных применительно к тематике диссертации рассмотрена в разделе 4.1: не имеет смысла приступать к ней во второй главе, до получения результатов экспериментов. Поэтому в текущем разделе будут проанализированы подходы к преобразованию численных показателей в вероятностные; данный процесс называется фаззификацией (англ. fuzzy logic — нечёткая логика).

Алгоритмы нечёткой логики основаны на манипуляции не с булевскими (истина-ложь), а с вероятностными показателями. Именно на такой базе основана и рассмотренная ранее (стр. 32) экспертная система Exsys, анализирующая матричные базы данных вероятностных показателей.

В кандидатской диссертации В. В. Егорова приведён ориентировочный алгоритм поиска подходящих математических зависимостей для фаззификации диагностических показателей:

1. Поиск и систематизация исходных данных. На данном этапе рекомендуется найти данные по одному и тому же показателю для возможно большего количества типов объекта диагностики.
2. Преобразование полученных данных к такому виду, при котором установлено (в табличном или графическом формате) соответствие вероятности наличия искомой неисправности значению диагностического показателя X .

3. Подбор двух различных фазсифицирующих функций: одна показывает более точное поведение, другая по возможности упрощена. Данная стадия разбивается на несколько шагов:
 - 3.1. Передача исходных данных одного объекта в программу, способную аппроксимировать функции одной или нескольких переменных математической зависимостью, заданной пользователем и/или выбранной из списка встроенных в саму программу.
 - 3.2. Аппроксимация данных всеми доступными (в том числе по областям определения и значения) функциями с получением данных о точности аппроксимации (как правило, используют коэффициент детерминации R^2).
 - 3.3. Сохранение данных о наиболее точных функциях (наивысший R^2).
 - 3.4. Повтор трёх предыдущих шагов для каждого объекта.
 - 3.5. Анализ полученной выборки данных и отбраковка функций, встречаемых не у каждого объекта (такие функции не могут быть универсальными).
 - 3.6. Поиск оптимальных по точности и простоте функций.
4. Сохранение данных о выбранных функциях по каждому объекту: общая форма зависимости и индивидуальные коэффициенты для объектов.
5. Принудительное ограничение области значений полученных функций: очевидно, что вероятностные показатели не должны выходить за пределы диапазона $(0; 1)$.

Рассмотрим подробно каждый шаг приведённого алгоритма.

1: поиск исходных данных. Наиболее трудоёмкий процесс; как правило, подобную информацию затруднительно найти в открытых источниках в силу того, что пик качественного развития технической диагностики закончился раньше эпохи широкой цифровизации, и необходимая литература существует лишь в печатном виде, нигде не проиндексированная.

Часть необходимых данных можно получить из учебных пособий, однако и в них требуемая информация представлена не всегда. Чаще всего искомые характеристики находятся в отчётах о научно-исследовательской работе.

Интерес для исследования представляют таблицы, подобные табл. 2.1, в которых представлены как минимум нормативные и предельные значения

диагностических показателей. Более подробная градация, естественно, позволит повысить точность результата.

2: преобразование данных. Критерий D_1 в таблице 2.1 соответствует изношенному состоянию кривошипно-шатунного механизма ($P = 1$), D_3 — номинальному ($P = 0$). Промежуточное значение D_2 свидетельствует о необходимости более частого проведения диагностики: на ТО-3 вместо ТР. Ориентируясь на схему рис. 1.4, можно ориентировочно установить значение P для D_2 равным 0,5, поскольку ТО-3 чередуются с ТР.

Графическое представление исходных данных показано на рис. 2.13.

3: подбор фазсифицирующих функций. Для приведённых исходных данных функция должна быть восходящей, а в самом идеальном варианте её область значений не должна выходить из диапазона 0...1.

Таблица 2.1

Допускаемые значения суммарного зазора в сопряжениях нижней и верхней головок шатуна

Марка двигателя	Суммарный зазор (не более), мм, при наработке на момент диагностирования					
	до 2000 мото-ч			до 4000 мото-ч		
	D_1	D_2	D_3	D_1	D_2	D_3
СМД-60/62, А-41	0,65	0,54	0,38	0,76	0,67	0,5
Д-240	0,61	0,5	0,35	0,71	0,62	0,46

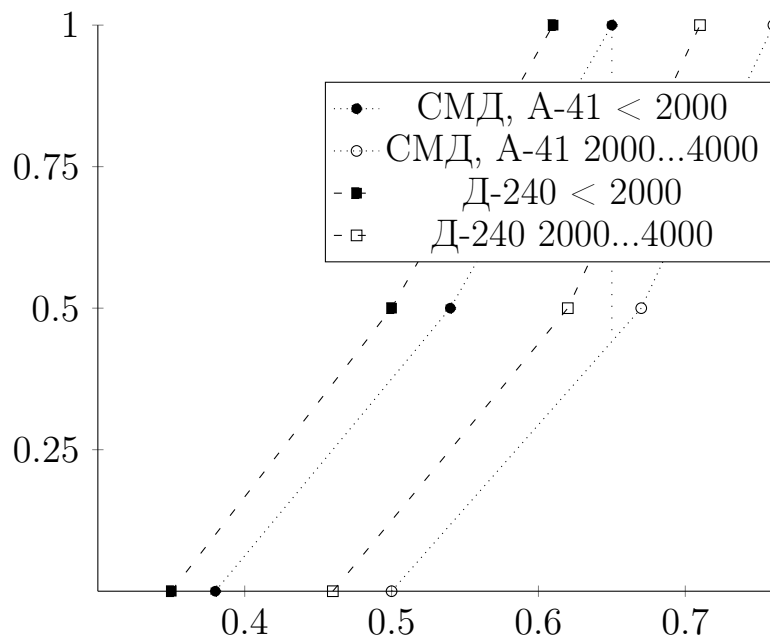


Рисунок 2.13 — Представление табличных данных в вероятностном формате

3.1. Ввод данных в программу для аппроксимации. В качестве первого варианта рассмотрим TableCurve 2D, поскольку в ней встроено огромное количество математических функций.

Для ввода данных в TC2D можно воспользоваться либо импортом из текстового файла, либо встроенным редактором, показанным на рис. 2.14. По данной иллюстрации видно, что помимо координат точек, программа позволяет указать весовые коэффициенты для них, что может быть полезно в случаях, когда определённые точки получены, к примеру, с отклонением от условий эксперимента.

После подтверждения введенных данных программа отображает кусочно-линейный график, полученный по экспериментальным точкам: рис. 2.15.

Отметим также, что полученная функция имеет переменный наклон, что будет задействовано в дальнейших рассуждениях.

3.2. Аппроксимация введённых данных.

Проводить данный шаг рациональнее, уточнив список используемых функций (Edit custom equation set) через диалоговое окно, показанное на рис. 2.16.

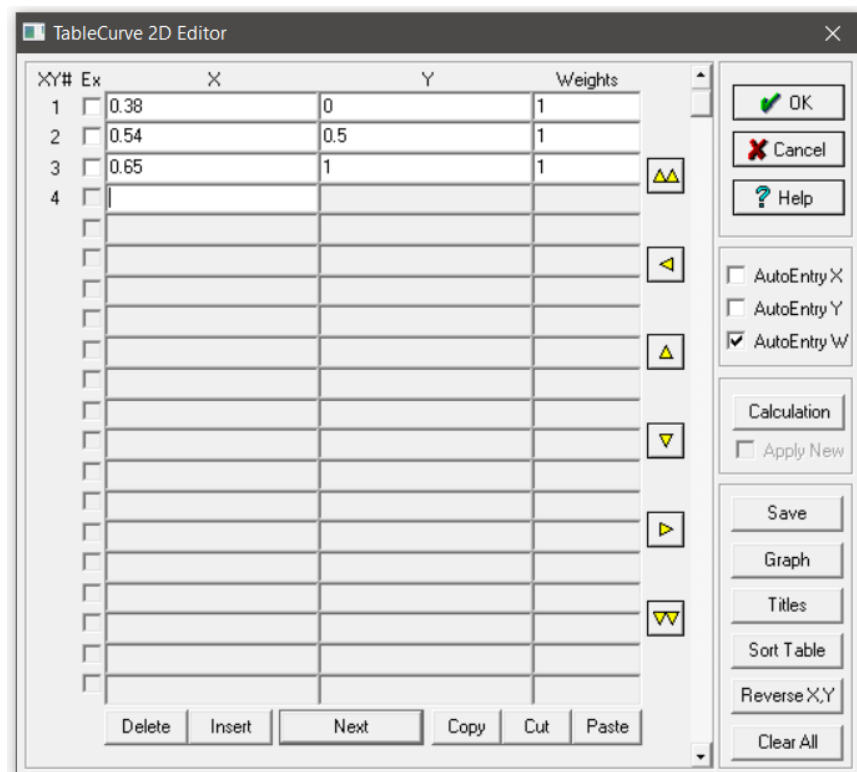


Рисунок 2.14 — Окно ввода данных в TableCurve

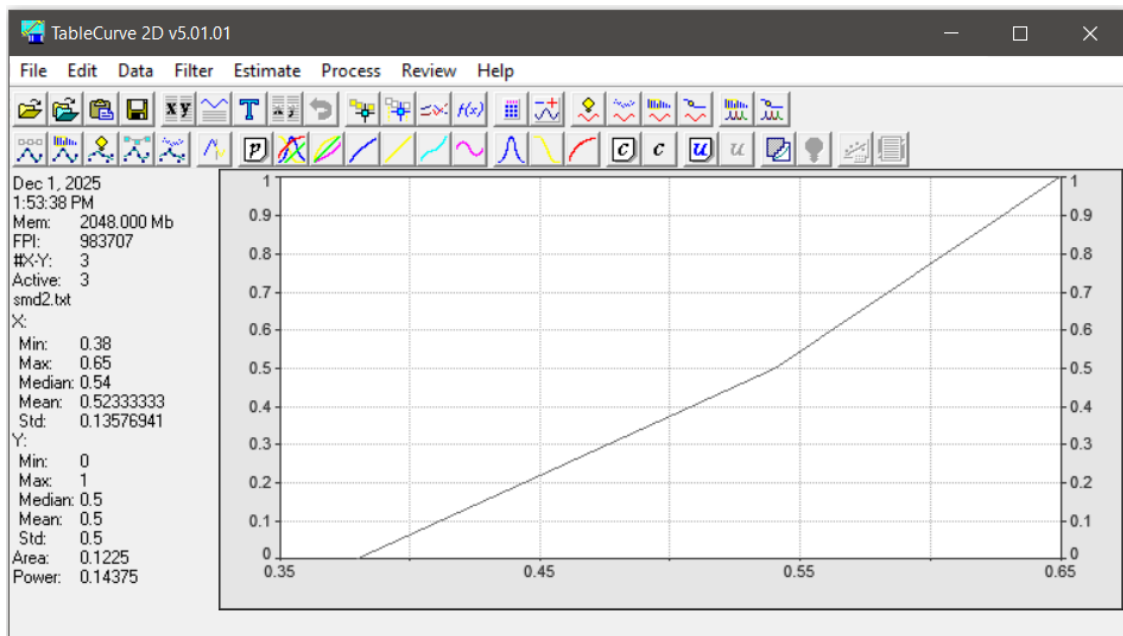


Рисунок 2.15 — Отображение введённых данных в TC2D

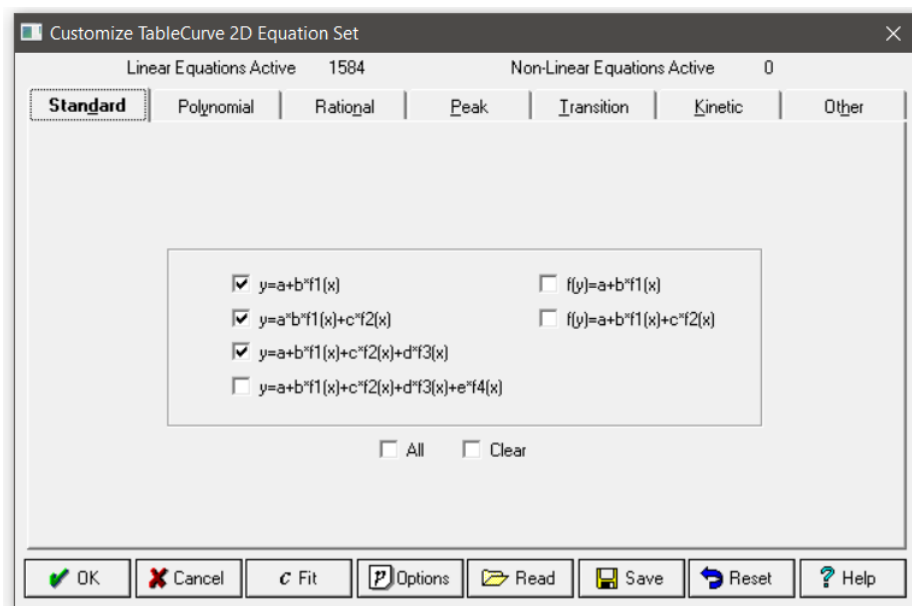


Рисунок 2.16 — Выбор используемых функций в TC2D

При выборе необходимых уравнений следует исключить из расчёта следующие:

- имеющие необоснованно сложную формулу;
- основанные на функциях комплексных аргументов, факториалах и т. д. (к примеру, гамма-функции);
- имеющие более двух экстремумов (полиномиальные сплайны)
- заведомо неподходящие по поведению.

После проведённой аппроксимации ТС2D отображает данные в формате, показанном на рис. 2.17. Полезно при анализе результатов дополнительно расширить область отображения графика, чтобы отследить поведение функции за пределами исходных значений.

Переключение функций в списке снизу (где также отображаются коэффициенты детерминации R^2) позволяет отобразить наложение выбранной функции на исходные точки, что и показано в главном окне программы.

Использование именно R^2 , а не, к примеру, среднеквадратического отклонения присуще современному подходу к аппроксимации. К преимуществам коэффициента детерминации относят следующие факторы:

- удобочитаемый диапазон показаний. При $R^2 = 1$ модель полностью соответствует данным, при $R^2 = 0$ модель по точности аналогична $y = \bar{y}$, отрицательные значения свидетельствуют о некорректном построении модели;
- в отличие от СКО, R^2 — безразмерная величина, не подвергающаяся масштабированию в зависимости от числовых значений измеряемой величины;
- R^2 позволяет адекватно сравнивать функции разной сложности: к примеру, аппроксимация параболой в любом случае позволяет добиться большей точности (и, соответственно, меньшего СКО), но не всегда усложнение модели оправданно, и разница R^2 меньшая, чем разница СКО, может указывать на возможность применения более простой модели.

3.3. Анализ точности. На основе введённых данных (суммарный зазор КШМ двигателей СМД-60/62 и А-41 до 2000 мото-ч) получены функции, приведённые в табл. 2.2.

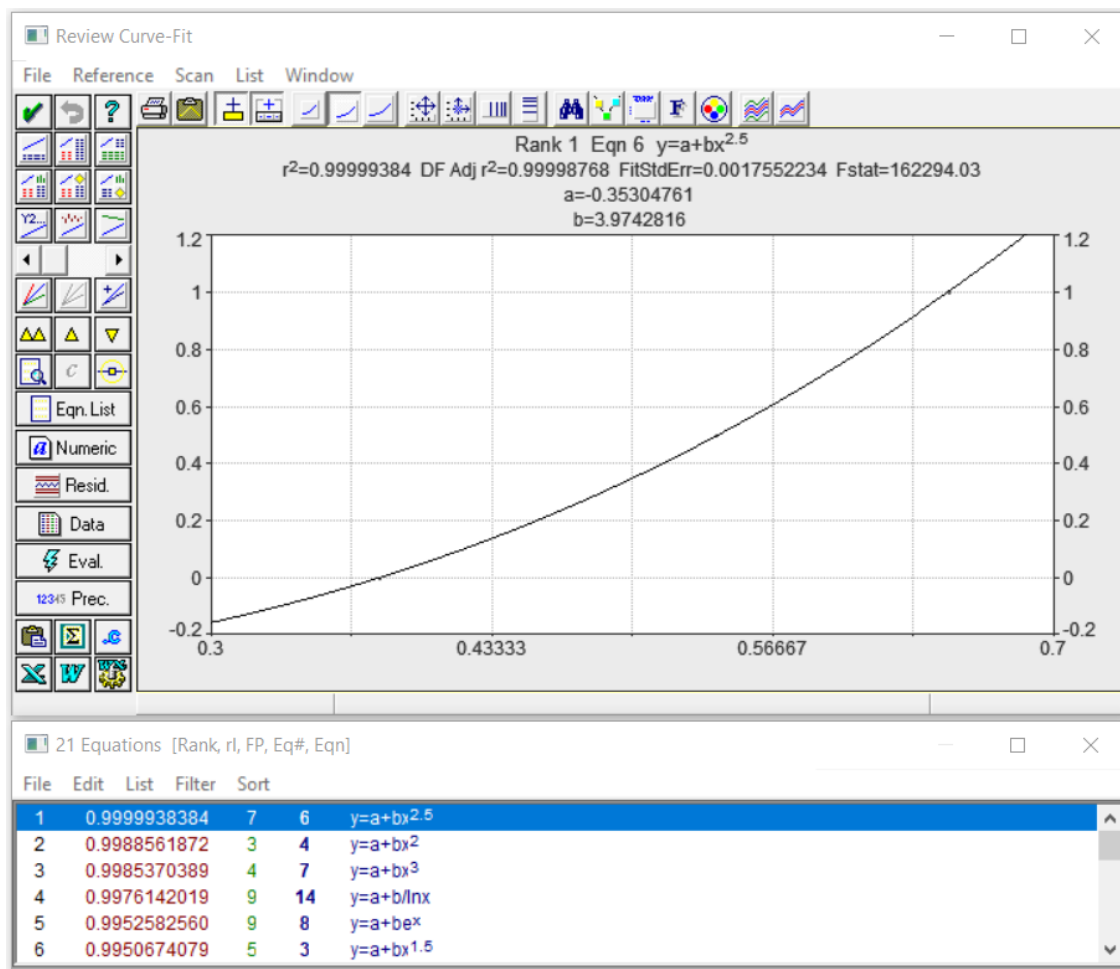


Рисунок 2.17 — Результат аппроксимации в TC2D

Функции, предложенные TableCurve2D

Функция $y =$	R^2	Функция $y =$	R^2	Функция $y =$	R^2
$a + bx^{2.5}$	0,9999	$a + bx^2$	0,9989	$a + bx^3$	0,9986
$a + b/\ln x$	0,9976	$a + be^x$	0,9953	$a + bx^{1.5}$	0,9951
$a + bx/\ln x$	0,9941	$a + b\sqrt{x} \ln x$	0,9922	$a + bx$	0,9887
$a + bx \ln x$	0,9864	$a + b\sqrt{x}$	0,9799	$a + be^{-x}$	0,9796
$a + b \ln x$	0,9691	$a + b/\sqrt{x}$	0,9565	$a + b/x$	0,9428
$a + b/x^{1.5}$	0,9282	$a + b \ln^2 x$	0,9278	$a + b \ln x/x$	0,9253
$a + b/x^2$	0,9133	$a + b \ln x/x^2$	0,888	$a + bx^2 \ln x$	0,7911

В полученном списке можно выделить три основных типа функций: степенные, логарифмические и их комбинации. Две из них имеют экстремум в диапазоне исходных значений, для таких функций R^2 вычеркнут.

Перенесём неотбракованные функции в отдельную таблицу (п. 3.5.) для дальнейшего анализа.

По аналогичному алгоритму произведём аппроксимацию для оставшихся объектов (п. 3.4.).

Наиболее точные по среднему R^2 функции ($R^2 > 0.9$) приведены в табл. 2.3.

По таблице видно, что наибольшую точность имеют достаточно простые функции. Казалось бы, на данном этапе достигнут необходимый результат (согласно исходному алгоритму), но фактически существуют несколько негативных факторов:

- количество функций, предложенных программой TC2D, достаточно мало (21), несмотря на то, что для аппроксимации было выбрано значительно больше функций;
- многие из полученных функций, хоть и не имеют экстремума в рассматриваемой области, тем не менее не являются монотонно возрастающими, что может привести к негативным последствиям в дальнейшей работе;

Таблица 2.3

Точность аппроксимации выбранными функциями

Функция $y =$	$\overline{R^2}$	Функция $y =$	$\overline{R^2}$	Функция $y =$	$\overline{R^2}$
$a + bx^{2.5}$	0,9986	$a + bx^2$	0,9969	$a + bx^3$	0,9963
$a + b/\ln x$	0,9961	$a + be^x$	0,9932	$a + bx^{1.5}$	0,9891
$a + bx/\ln x$	0,9882	$a + bx^{0.5} \ln x$	0,9844	$a + bx$	0,9840
$a + b\sqrt{x}$	0,9724	$a + be^{-x}$	0,9713	$a + b \ln x$	0,9620
$a + b/\sqrt{x}$	0,9503	$a + b/x$	0,9377	$a + b/x^{1.5}$	0,9244
$a + b \ln^2 x$	0,9211	$a + b \ln x/x$	0,9187	$a + b/x^2$	0,9109

- анализ точности аппроксимации производился вручную, что чревато лавинообразным повышением трудоёмкости при увеличении количества объектов и/или рассматриваемых функций (а также не исключает ошибки в процессе анализа)

В связи с этим последовательно предпримем следующие шаги.

В первую очередь, отключим выборочную аппроксимацию в TC2D, задействовав тем самым все возможные функции. Результатом этого для наших исходных данных является 95 различных функциональных зависимости — это значительно больше изначального количества, но не все функции записаны в адекватном формате: присутствует значительное количество выражений вида $\ln y = a + b \ln x$. Преобразование записей функций к привычному виду следует заниматься уже после анализа полученных данных, чтобы не проделывать многократно одну и ту же процедуру для каждого набора полученных функций.

Анализ такого количества функций вручную фактически невозможен, поэтому необходимо автоматизировать его при помощи скрипта на Python. TableCurve позволяет сохранить в текстовом виде информацию по точности аппроксимации для каждой функции, эти файлы и будут обработаны.

Первым этапом алгоритма является импорт данных из указанных списком текстовых файлов, в которых хранятся строки вида:

```
18  0.9945637509    11    47  y^(-1)=a+bx^2lnx
```

Для анализа необходимы только два элемента: R^2 (второй фрагмент) и само уравнение (пятый фрагмент), из строки их можно выделить встроенной функцией `split`. После этого каждое значение R^2 сохраняется во временный словарь¹ `dct` под ключом, соответствующим записи уравнения.

После обработки всего файла `dct` передаётся в общий словарь `over_dct` с ключом, соответствующим имени файла. Обработка всех файлов даёт структуру `over_dct`, показанную на рис. 2.18.

Следующим шагом является усреднение R^2 для каждого из уравнений. Для этого алгоритм последовательно перебирает все ключи словаря `filename_1` и, извлекая данные из других словарей по аналогичному ключу, усредняет показатели с занесением в отдельный словарь `comp_dct`.

¹Тип данных в Python, хранящий информацию парами ключ-значение

over_dct		
filename_1	filename_2	filename_n
y=ax: 0.985	y=aln(x): 0.991	y=ax ² +bx: 0.987
y=ax ² : 0.936	y=ae ^(-x) : 0.942	y=aln(x): 0.946
...	...	...
y=ae ^x : 0.873	y=ax ³ : 0.884	y=a/x+b: 0.872

Рисунок 2.18 — Структура словаря over_dct

В ситуациях, когда количество функций, отправленных программой TC2D в текстовые файлы, отличается, возможны сбои в работе алгоритма, которые в худшем случае будут просто занижать среднее значение R^2 . На правильность работы алгоритма подобная ситуация не повлияет: наоборот, функции, подходящие не для всех данных, будут искусственно перенесены ниже по списку.

Завершающим этапом алгоритма является перенос данных в массив (список) **result** и сортировка его по убыванию. При выводе этого списка на экран отображается рейтинг функций в порядке уменьшения их точности.

По результатам вычисления получен список из 92 функций, гистограмма точности которых показана на рис. 2.19. Программный код алгоритма приведен в приложении Б.1.

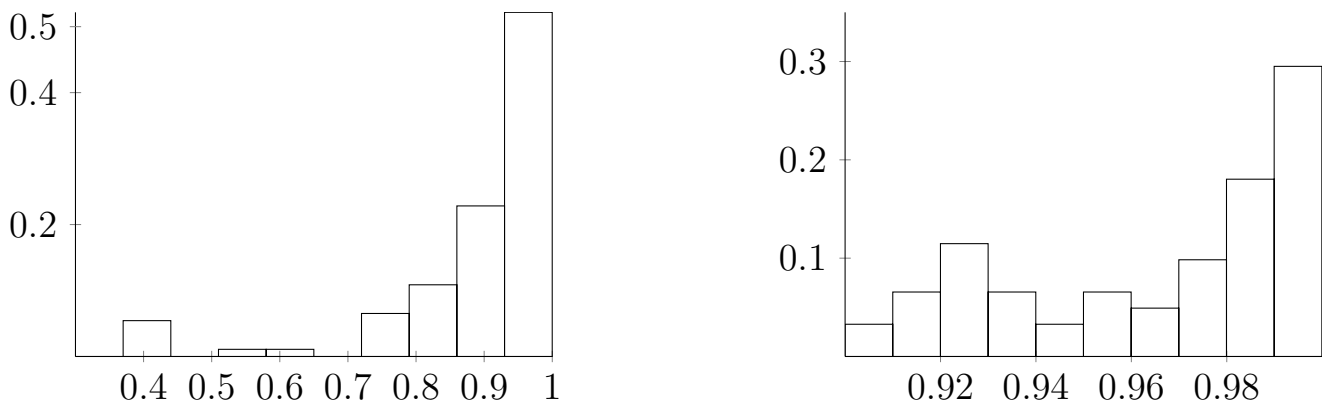


Рисунок 2.19 — Гистограммы точности аппроксимации

Проанализируем список 30 наиболее точных функций:

$y^{(0.5)}=a+b/x^{(0.5)}: 1.000$	$y=a+bx^{(2.5)}: 0.996$	$y^{(0.5)}=a+bx^{(0.5)}\ln x: 0.988$
$y^{(0.5)}=a+b/x: 1.000$	$y^{(0.5)}=a+b\ln x/x: 0.996$	$\ln y=a+b/x: 0.986$
$y^{(0.5)}=a+b\ln x: 0.999$	$\ln y=a+b/x^2: 0.995$	$y^{(0.5)}=a+b/x^2: 0.986$
$y=a+b/\ln x: 0.999$	$y=a+bx^2: 0.993$	$y^{(0.5)}=a+b(\ln x)^2: 0.985$
$\ln y=a+b\ln x/x^2: 0.999$	$\ln y=a+b(\ln x)^2: 0.993$	$y=a+bx^{(0.5)}\ln x: 0.984$
$y^{(0.5)}=a+b/x^{(1.5)}: 0.998$	$\ln y=a+b\ln x/x: 0.993$	$y=a+bx\ln x: 0.984$
$y=a+bx^3: 0.997$	$\ln y=a+b/x^{(1.5)}: 0.992$	$y^{(0.5)}=a+bx^{(1.5)}: 0.983$
$y^{(0.5)}=a+be^{(-x)}: 0.997$	$y^{(0.5)}=a+bx: 0.992$	$y^{(0.5)}=a+be^x: 0.983$
$y^{(0.5)}=a+bx^{(0.5)}: 0.997$	$y=a+be^x: 0.989$	$y=a+bx: 0.981$
$y=a+bx/\ln x: 0.996$	$y=a+bx^{(1.5)}: 0.988$	$\text{Power_}(a,b): 0.980$

Даже без преобразования из машинного формата видно, что большинство функций представляют собой вариации, составленные из четырёх-пяти основных компонентов. Поведение их, судя по большим значениям R^2 , однотипно и приближено к параболе.

При этом на значение R^2 не в последнюю очередь зависит от заданной точности самой аппроксимации. Известно, что парабола с вертикальной осью симметрии может быть проведена через любые три точки с различными абсциссами, не лежащие на одной прямой (в таком случае парабола вырождается в эту прямую). Следовательно, при ошибке аппроксимации, стремящейся к нулю, R^2 для параболы в нашем случае стремится к единице.

Иными словами, в условиях трёх исходных точек (как в рассматриваемом примере) $R^2 = 1$ будет в любом случае иметь либо парабола, либо прямая. Обратим внимание, что в приведённом списке присутствуют и та, и другая функция – но поскольку в выбранных нами данных точки не лежат на одной прямой, R^2 для функции $y = a + bx$ ниже.

Для полного понимания приведём полученные функции к читаемому виду:

$y = (a + b/\sqrt{x})^2: 1.000$	$y = (a + b\sqrt{x})^2: 0.997$	$y = \exp(a + b/x^{1.5}): 0.992$
$y = (a + b/x)^2: 1.000$	$y = a + bx/\ln x: 0.996$	$y = (a + bx)^2: 0.992$
$y = (a + b\ln x)^2: 0.999$	$y = a + bx^{2.5}: 0.996$	$y = a + be^x: 0.989$
$y = a + b/\ln x: 0.999$	$y = (a + b\ln x/x)^2: 0.996$	$y = a + bx^{1.5}: 0.988$
$y = \exp(a + b\ln x/x^2): 0.999$	$y = \exp(a + b/x^2): 0.995$	$y = (a + b\sqrt{x}\ln x)^2: 0.988$
$y = (a + b/x^{1.5})^2: 0.998$	$y = a + bx^2: 0.993$	$y = \exp(a + b/x): 0.986$
$y = a + bx^3: 0.997$	$y = \exp(a + b(\ln x)^2): 0.993$	$y = (a + b/x^2)^2: 0.986$
$y = (a + be^{-x})^2: 0.997$	$y = \exp(a + b\ln x/x): 0.993$	$y = (a + b(\ln x)^2)^2: 0.985$

$$y = a + b\sqrt{x} \ln x: 0.984$$

$$y = (a + bx^{1.5})^2: 0.983$$

$$y = a + bx: 0.981$$

$$y = a + bx \ln x: 0.984$$

$$y = (a + be^x)^2: 0.983$$

$$y = ax^b: 0.980$$

Основные компоненты показанных функций можно разбить на пять основных типов: свободный коэффициент « c », линейный тип « $k \cdot u$ », степенной « u^n », экспоненциальный « $e^u = \exp u$ » и логарифмический « $\ln u$ ». В роли u при этом может выступать как переменная x , так и выражения, составленные из перечисленных компонентов.

Диаграмма Венна, показывающая соотношение компонентов, показана на рис. 2.20. Диаграмма создана при помощи deerveenn.com — инструмента, разработанного Тимом Хулсеном (Роттердамский университет прикладных наук): [100].

Пусть в диаграмме отчасти нарушено соотношение площадей компонентов с процентными соотношениями, по ней, тем не менее, могут быть сделаны следующие выводы:

1. 10% функций ($c \cap u^n \cap e^u \cap \ln u$) неоправданно усложнены, сколь точными бы они ни были.
2. 53,3% функций оптимальны по соотношению сложность-точность и включают в себя компоненты только двух видов (а также линейную функцию $ku + c$).
3. 36,7% функций несколько усложнены, но могут быть применены в порядке исключения, если обладают поведением, близким к желаемому.

Визуализируем вторую группу функций, чтобы выяснить, подходит ли их поведение под заданные ранее критерии ($0 \leq E(f) \leq 1$, $f(x < X_{\min}) \rightarrow 0$, $f(x > X_{\max}) \rightarrow 1$). Визуализация приведена на рис. 2.21.

Как видно из графика, вторая группа функций подразделяется на три категории: совершенно неудовлетворительные; приемлемые; удовлетворительные (показаны чёрным цветом). К сожалению, в третьей подгруппе удовлетворяется лишь критерий минимизации в околонулевых абсциссах; ограничение по максимуму для них возможно лишь искусственное.

По этой причине необходимо также проверить поведение третьей группы функций (умеренно сложных). Визуализацию приведём на рис. 2.22.

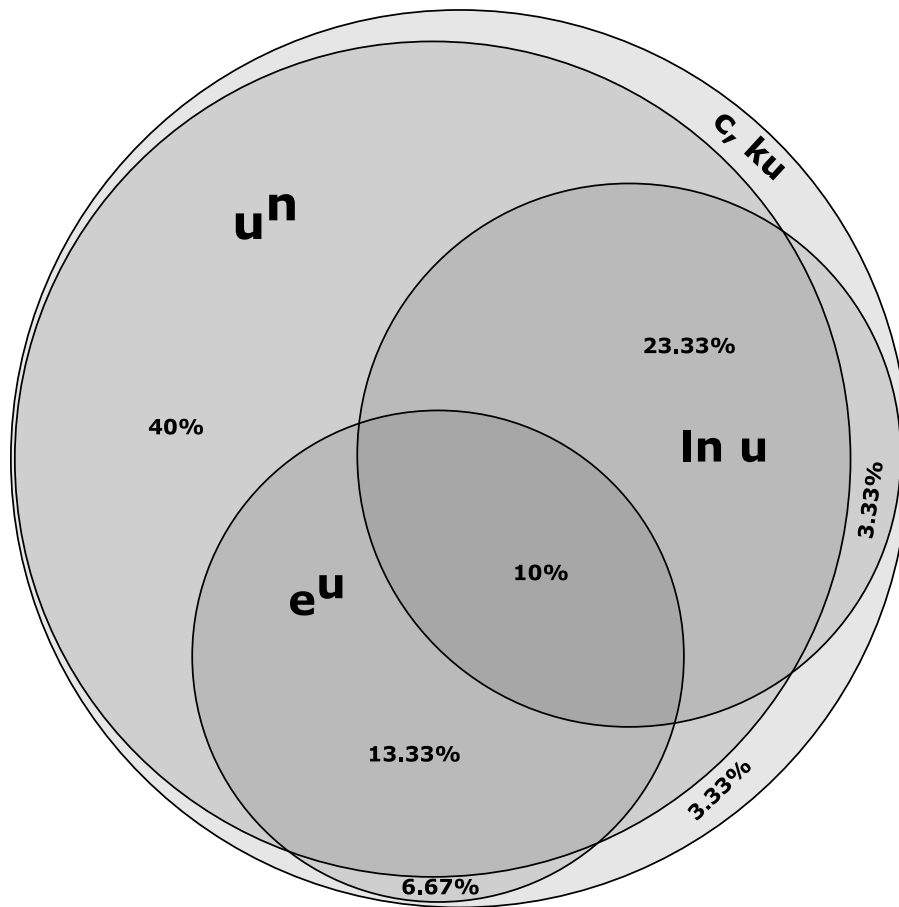


Рисунок 2.20 — Соотношение компонентов функций аппроксимации

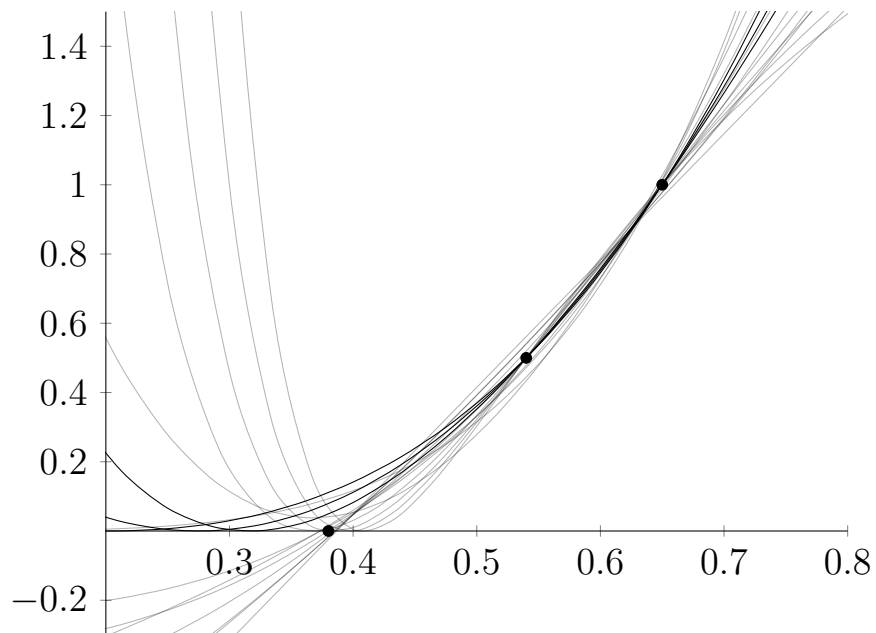


Рисунок 2.21 — Визуализация 2-й группы функций

Увы, усложнение функций не повлияло на их поведение, и ни один график так и не приблизился в правой части к требуемым пределам — следовательно, максимум функции придётся искусственно ограничивать, что, с одной стороны,

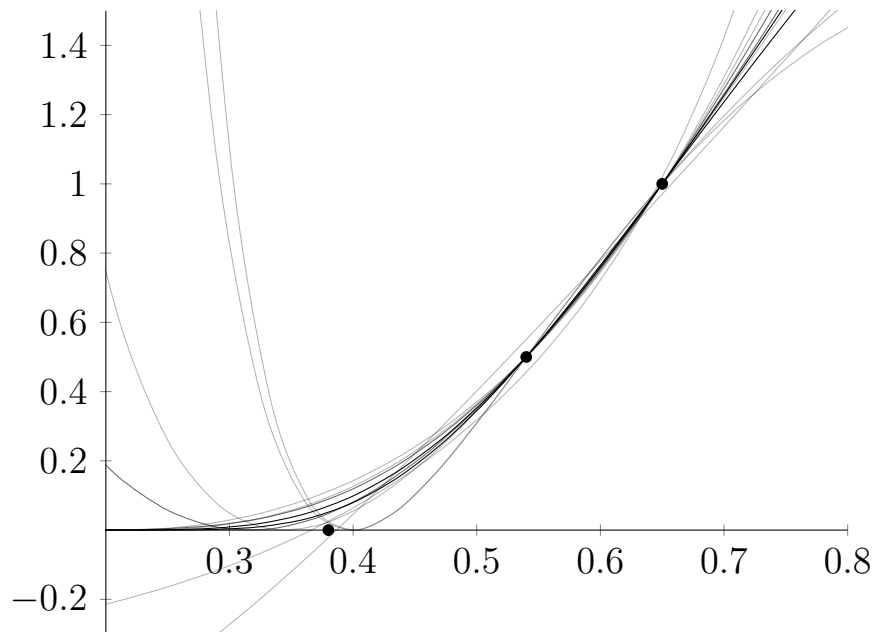


Рисунок 2.22 — Визуализация 3-й группы функций

нетрудно в практическом исполнении, но с другой – вынуждает отходить от чисто математических вычислений.

Теперь проанализируем, как наиболее подходящие из рассмотренных функций адаптируются к иным исходным данным, используя для аппроксимации оставшиеся три набора точек (рис. 2.23).

В процессе построения графиков (цифры указывают на очерёдность) было обнаружено, что некоторые функции, приемлемые для набора данных «1», не

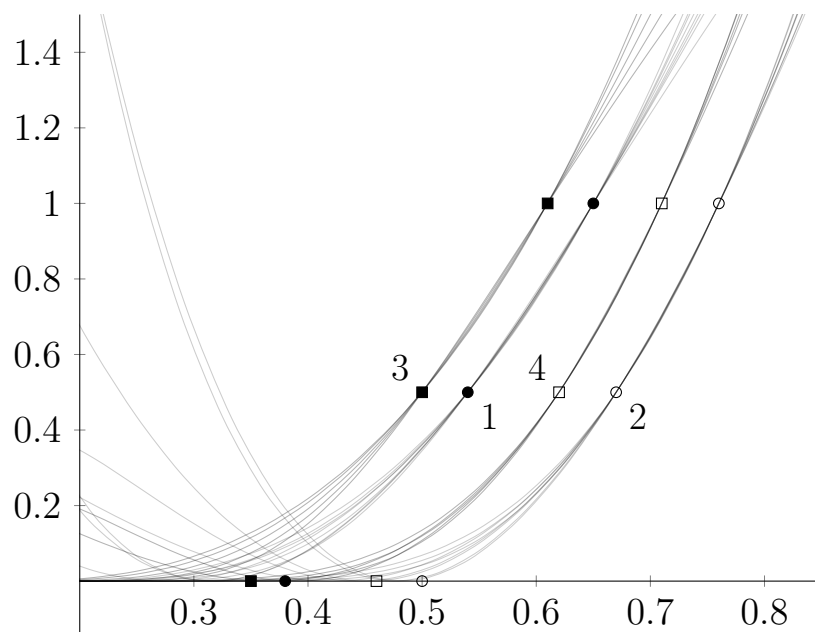


Рисунок 2.23 — Визуализация наиболее подходящих функций

подходят должным образом для набора «2». По этой причине для наборов «3» и «4» функции с некорректным поведением не были использованы.

Из пяти функций, оставшихся по результатам отсева, три имеют экспоненциальные компоненты: $y = \exp(a + b/x^2) : \overline{R^2} = 0.995$, $y = \exp(a + b/x^{1.5}) : \overline{R^2} = 0.992$, $y = \exp(a + b/x) : \overline{R^2} = 0.986$. Отметив эту особенность, следует рассмотреть возможность применения иных комбинаций экспонент, которые не присутствуют в базе данных TableCurve2D.

Процесс комбинирования фрагментов функций является достаточно трудоёмким даже с применением систем искусственного интеллекта, поэтому в первую очередь следует рассмотреть опыт других исследователей.

Именно в сфере классических нейронных сетей, до развития больших языковых моделей LLM, удалось обнаружить нужную информацию. В статье [85] приведён обзор функций активации нейронных сетей, обладающих нужным поведением. Несмотря на то, что сама концепция работы нейросетей не совсем подходит для целей данной диссертации, протестировать некоторые их элементы было бы правильным решением.

Кратко рассмотрим функции активации (соответственно нумерации рис. 2.24).

1. Ступенчатая функция (функция Хевисайда). Фактически, используется в классической логике и эквивалентна оператору сравнения $x > t$, где t — пороговое значение.
2. Линейная функция. Ранее уже рассмотрены её поведение, ограничение и точность применительно к выбранным данным.
3. Сигмоидная функция (логистическая функция). При правильном выборе коэффициентов не имеет ограничений области определения, а область

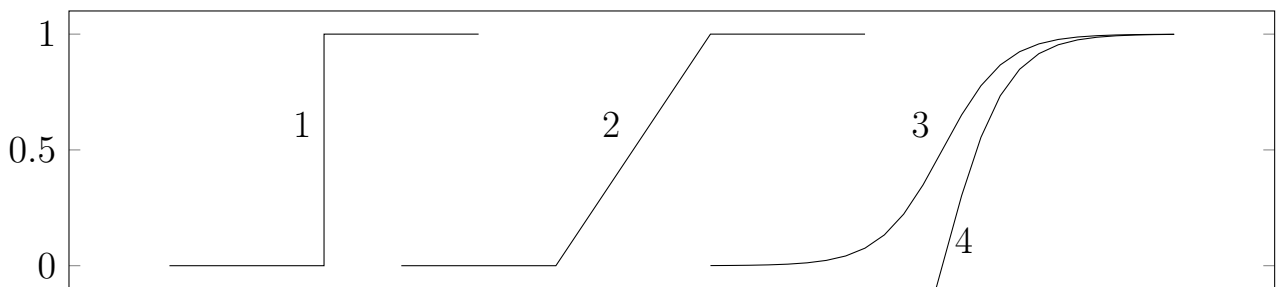


Рисунок 2.24 — Функции активации нейронных сетей

значений ограничена диапазоном $0 < E(y) < 1$, то есть функция идеально подходит под заданные нами условия. Отметим, что при выборе функций в ТС2D опция `sigmoid` была включена даже при выборочной аппроксимации, но даже при задействовании всех имеющихся функций аппроксимация сигмоидой не была произведена.

4. Гиперболический тангенс — разновидность сигмоидной функции с иными параметрами, имеющая область значений от -1 до 1.

Существуют различные вариации сигмоидной функции, но остановимся на классической интерпретации $y = 1 / (1 + \exp(-a \cdot (x - b)))$. Коэффициент a здесь определяет крутизну функции, а b — координату середины сигма-перехода ($y = 0.5$)

Воспользовавшись Python-скриптом, приведённым в приложении Б.5, выполним аппроксимацию для каждого набора данных. Получены следующие коэффициенты:

Дизель	СМД-62 до 2000	СМД-62 до 4000	Д-240 до 2000	Д-240 до 4000
$a; b$	$-331,9; 0,54$	$-398,8; 0,67$	$-331,3; 0,5$	$-396,2; 0,62$

Визуализация данных приведена на рис. 2.25. Графики наглядно показывают, что точная аппроксимация ($R^2 = 1$ для всех случаев) в данном примере не обеспечивает корректного поведения сигма-функции, близкой во всех примерах скорее к функции Хевисайда.

В связи с этим алгоритм аппроксимации логистической функцией необходимо будет переработать, обеспечив оптимальное соотношение пологости кривой и точности.

Используемая функция `curve_fit` пакета `scipy` позволяет задать начальные условия для аппроксимации, но фактически мы вынуждены принудительно задать коэффициент a , оставив в качестве варьирующегося показателя только b . В противном случае оптимизационные алгоритмы при аппроксимации в попытках достичь $R^2 = 1$ всё равно приведут функцию к виду, показанному на рис. 2.25.

В качестве принудительно заданного значения a задействуем угловой коэффициент k , равный $(y_{\max} - y_{\min}) / (x_{\max} - x_{\min})$.

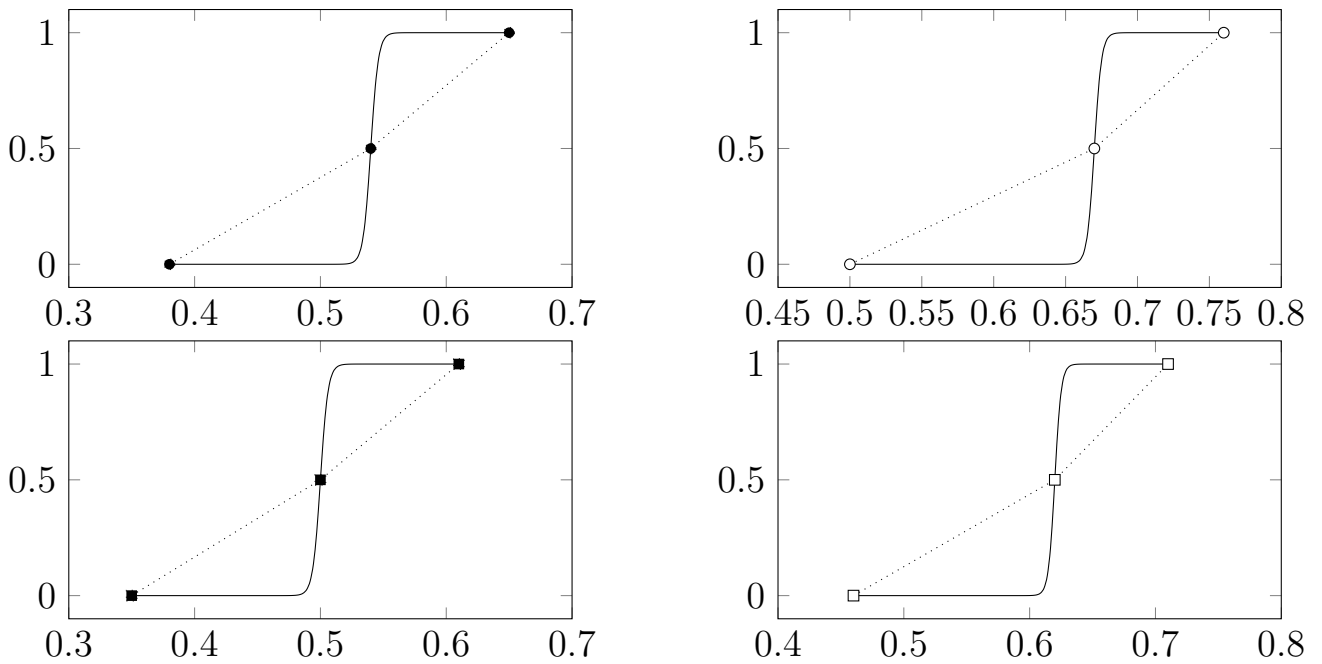


Рисунок 2.25 — Аппроксимация данных сигма-функцией

Чтобы определить соотношение коэффициентов k и b , определим производную сигмоиды в точке $x = b$:

$$\sigma'(x) = \frac{a \cdot \exp(-a[x - b])}{(1 + \exp(-a[x - b]))^2}$$

$$\sigma'(x = b) = \frac{a \cdot \exp(0)}{(1 + \exp(0))^2} = \frac{a}{4}$$

Таким образом, $a = k \cdot 4$, чем можно воспользоваться, определив k по исходным данным и принудительно задав a при аппроксимации. Программный код полученного алгоритма приведён в приложении Б.2, а полученные результаты — в таблице 2.4.

По данным таблицы видно, что коэффициент b , соответствующий значению x в средней точке сигма-перехода, незначительно отличается от усреднённого значения $\bar{x}$ абсцисс исходных точек, и чуть более — от абсциссы $x_{\text{ср}}$ точки $y = 0,5$. В целом, определение $b = \bar{x}$ было бы приемлемым по точности, но при наличии возможности целесообразнее воспользоваться аппроксимацией.

В таблице 2.3 также показаны отклонения $y_0; y_1$ полученной сигмоиды от начальных и конечных точек исходных данных. Показатели свидетельствуют о том, что не во всех случаях удаётся добиться погрешности менее 15%. Происхо-

Результаты аппроксимации сигмоидой

Жирным шрифтом показана сигмоида с увеличенным наклоном

СМД-62 до 2000		СМД-62 до 4000		Д-240 до 2000		Д-240 до 4000	
a	b	a	b	a	b	a	b
14,82	0,53	15,39	0,6536	15,39	0,492	16	0,6057
29,63	0,5394	30,77	0,6685	30,77	0,4995	32	0,6188
$\bar{x} = 0,5233$		$\bar{x} = 0,6433$		$\bar{x} = 0,4867$		$\bar{x} = 0,5967$	
$x_{cp} = 0,54$		$x_{cp} = 0,67$		$x_{cp} = 0,5$		$x_{cp} = 0,62$	
y_0	y_1	y_0	y_1	y_0	y_1	y_0	y_1
0,0977	0,8555	0,08597	0,83719	0,1012	0,8601	0,08857	0,84142
0,00822	0,9637	0,00558	0,9436	0,00994	0,9677	0,00618	0,9488
$R^2 = 0.9363$		$R^2 = 0.9243$		$R^2 = 0.9385$		$R^2 = 0.9275$	
$R^2 = 0.9972$		$R^2 = 0.9933$		$R^2 = 0.9977$		$R^2 = 0.9945$	

дит это из-за того, что вычисленный по исходным данным угловой коэффициент не обеспечивает достаточно точного соответствия.

Крайней мерой в таком случае был бы возврат к точной аппроксимации, но поскольку она не обеспечивает требуемого вида функции, прибегнем к удвоению коэффициента a , т. е. $a = k \cdot 8$. Полученные функции показаны на рис. 2.26 сплошными линиями, функции с изначальным угловым коэффициентом — штрихпунктирными, аппроксимированные по двум коэффициентам — штриховыми.

Коэффициенты модифицированных сигмоид и значения функций в опорных точках также приведены в таблице 2.4 (отмечены жирным шрифтом).

Полученные результаты показывают, что модифицированная сигмоида с коэффициентом $a = 8 \cdot (y_{\max} - y_{\min}) / (x_{\max} - x_{\min})$ обладает требуемыми показателями поведения и точности, и может применяться для фаззификации диагностических показателей наряду с рассмотренными ранее функциями.

Более того, поведение сигмоидных функций и сам факт их широкого использования в нейросетевых алгоритмах позволяют утверждать, что аппроксимация с помощью них предпочтительнее, чем функциями, рассмотренными ранее.

Не в последнюю очередь это обосновывается тем, что сигмоида имеет естественные асимптоты, и в конечных точках имеет некоторое отклонение от $y_0 = 0$ и $y_1 = 1$, что хорошо подходит под логику работы экспертной системы Exsys, в рамках алгоритмов которой в первую очередь и рассматривалась фаззификация. В данной ЭС максимальный весовой коэффициент для признака равен 0,9 —

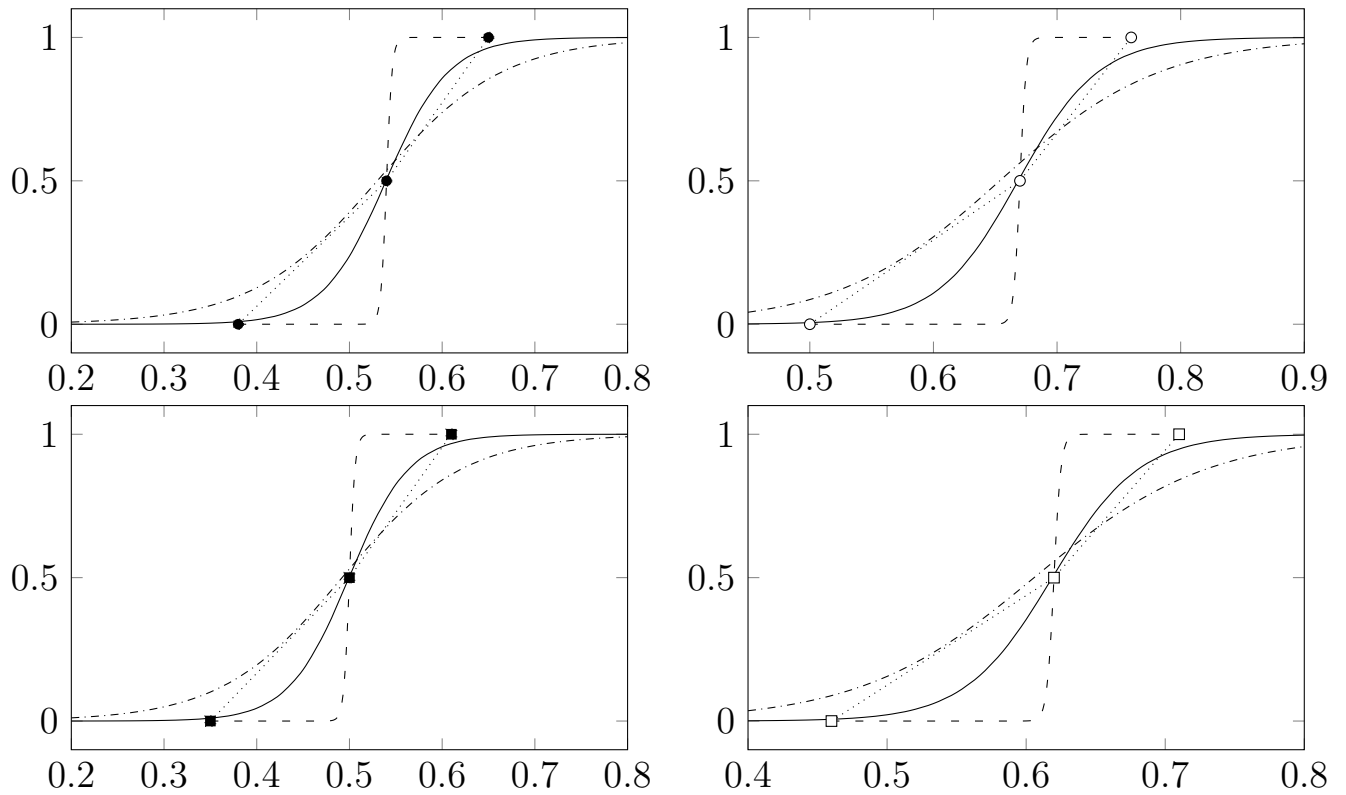


Рисунок 2.26 — Итоговые сигма-функции

это позволяет учесть «человеческий фактор» при восприятии органолептических показателей.

В рассматриваемом нами случае с индикаторными показателями также существует некоторый риск приборной ошибки, что отлично коррелирует со значениями $y_0 \approx 0,007$ и $y_1 \approx 0,95$, получаемыми при использовании сигмоиды: подобные значения позволяют учесть возможную неточность приборов или нарушение условий диагностирования.

Ещё одним фактором, позволяющим сделать выбор в пользу сигмоиды, является то, что её коэффициенты можно задать аналитически, без аппроксимации, при этом потери точности будут минимальны: отклонение коэффициента b от $\bar{x}$ в использованных наборах данных составило 1,37% для сигмоиды с $a = 4k$ и 3,33% для $a = 8k$. Такие значения сопоставимы с приборной погрешностью инструментов, применяемых для диагностирования.

2.2.1 Выводы

Исследования, проведённые во второй главе диссертации, позволяют сформулировать следующие выводы и рекомендации.

- 1.1. Определение состава отработавших газов в эластичной ёмкости с использованием серии разгонов двигателя не отвечает требованиям точности, удобства и производственной безопасности.
- 1.2. Более правильным представляется измерение состава ОГ на различных режимах холостого хода двигателя с последующим составлением характеристик в осях n_d — концентрация.
- 2.1. Разработанный предшественником алгоритм выявления наиболее точных функций аппроксимации диагностических показателей показал приемлемую работоспособность, но требует использования платного ПО, не располагающего, к тому же, достаточной вариативностью уравнений. В связи с этим разработан авторский алгоритм, основанный на общедоступном ПО.
- 2.2. Предложенное использование экспоненциального сигма-перехода для поставленной цели позволило достичь сопоставимых показателей точности при заметно большем удобстве применения, поэтому приоритетным следовало бы выбрать именно такой подход.

3 МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Экспериментальные исследования в рамках данной работы направлены на выявление компонентов состава отработавших газов дизельного двигателя, наиболее чувствительных к изменению структурных параметров.

При этом, для упрощения методики проведения экспериментов, желательно использовать такие структурные параметры, которые не слишком трудоёмки в изменении.

В качестве таких параметров нами будут приняты давление начала подъёма иглы форсунки — в первом эксперименте, и сопротивление на входе воздушного фильтра — во втором. При этом второй структурный параметр будет выступать скорее в роли возмущения для проведения диагностических тестов.

3.1 Используемое оборудование

3.1.1 Газоанализатор Инфракар 5М2.01

Главным прибором, используемым для измерений, выбран газоанализатор Инфракар 5М2.01, способный измерять концентрацию следующих компонентов: оксида углерода (угарный газ) CO , диоксида углерода CO_2 , углеводородов CH , кислорода O_2 и оксидов азота NOx .

Подробная таблица характеристик газоанализатора приведена в приложении А.1.

Бесспорно, данный газоанализатор предназначен в первую очередь для бензиновых двигателей, но из имеющегося выбора данная модель была наиболее функциональной.



Рисунок 3.1 — Газоанализатор Инфракар 5М2.01

3.1.2 Измерительный комплекс ИМДЦ-2

Аппаратно-программный комплекс ИМДЦ-2 является наследником приборов ИМД-2М и ИМД-Ц, сконструированных ещё в 1970-е годы для измерения параметров динамики ДВС, в первую очередь — ускорения свободного разгона.

Функционал ИМДЦ-2 включает в себя измерение n_d и ε на всех режимах работы, отображение их на экране компьютера в виде мгновенных значений и графика (рис. 3.2), а также запись в память. Именно при помощи ИМДЦ-2 были получены разгонные характеристики, задействованные в разделе 2.1.

ИМДЦ-2 реализован на полностью цифровой базе (контроллер Arduino Nano 368, подключаемый к ПК под управлением Windows). Аппаратная часть прибора показана на рис. 3.3. Контроллер, размещённый в корпусе 1, считывает показания с датчика Холла 2, устанавливаемого на раме трактора при помощи магнитного крепления 3, и при обнаружении магнитной метки, закрепляемой на шкиве коленчатого вала, отправляет на компьютер через разъём 4 количество микросекунд, прошедших с предыдущего срабатывания датчика.

Компьютерная программа (первая версия была написана на Delphi, современная работает на Python) интерпретирует показания, преобразуя их к виду, аналогичному рис. 3.2.

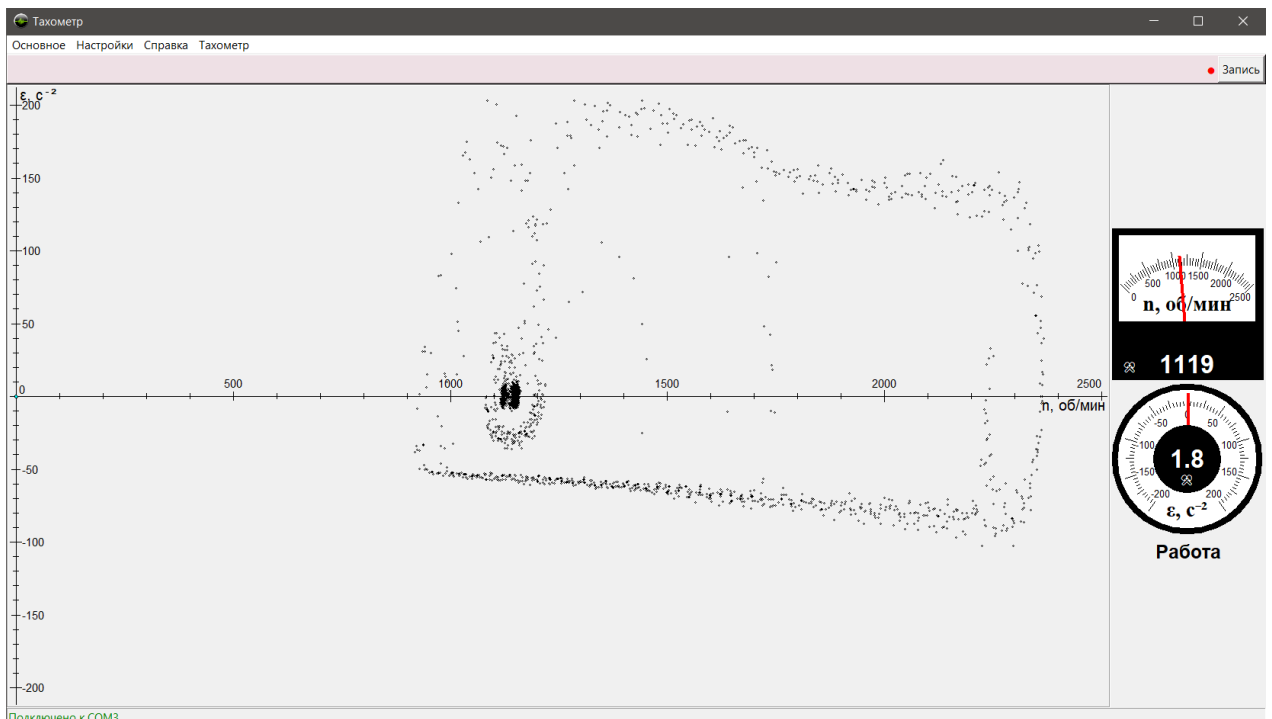


Рисунок 3.2 — Интерфейс ИМДЦ-2

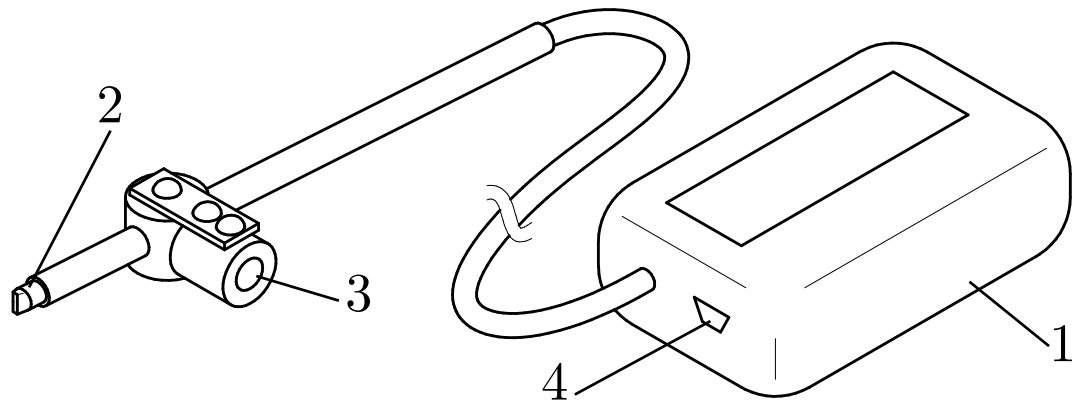


Рисунок 3.3 — Прибор ИМДЦ-2
1 – корпус, 2 – датчик, 3 – крепление, 4 – разъем

Конструкция магнитных меток подразумевает их крепление на вращающемся шкиве, и даже использование магнитов прижимной силой 8 кг не позволяет магниту удержаться при вращении. Поэтому для крепления магнитов изготавливаются (FDM 3D печатью или лазерной резкой) специальные адаптеры, показанные на рис. 3.4.

Установленные на дизель Д-145Т адаптер и датчик показаны на рис. 3.5

В рамках настоящей работы прибор ИМДЦ-2 используется для снятия точных значений частоты вращения коленчатого вала.

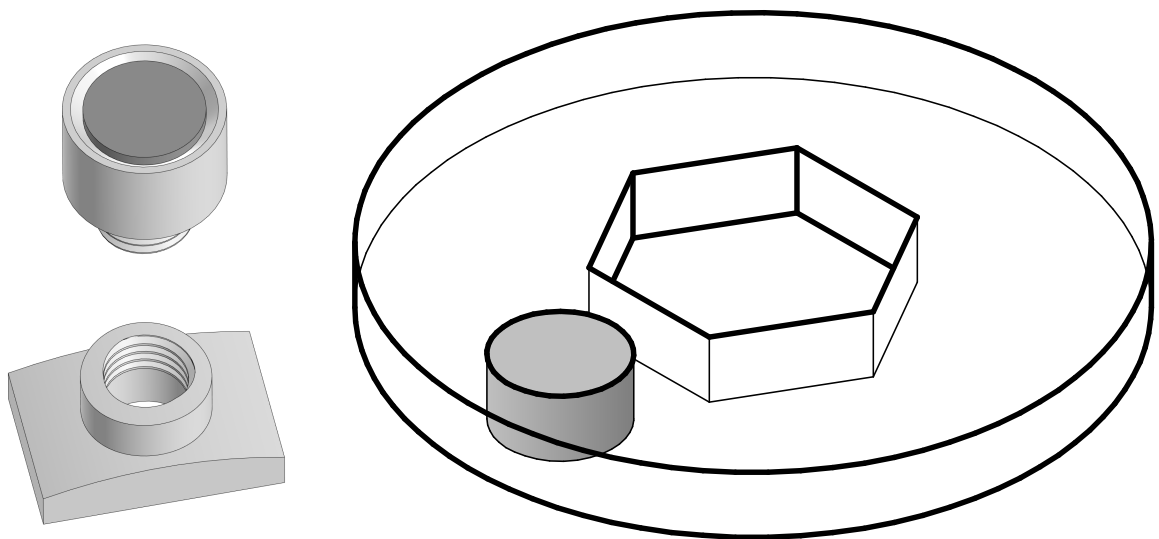


Рисунок 3.4 — Адаптеры ИМДЦ-2 для дизелей Д-145Т и Д-240



Рисунок 3.5 — Установка ИМДЦ-2 на дизель Д-145Т

3.1.3 Дросселирующее устройство

Как уже указано ранее, в качестве тестового воздействия для второго эксперимента выбрано дросселирование воздуха на впуске в двигатель.

Для более удобного и воспроизводимого дросселирования целесообразнее применить некое устройство, позволяющее задавать один и тот же режим дросселирования для всех диагностируемых двигателей одной модели.

В качестве первого прототипа регулируемого дросселя была изготовлена конструкция, показанная на рис. 3.6. Устройство изготовлено из алюмокомпозитного листа, в котором при помощи ЧПУ фрезеровки (рис. 3.7 А) прорезаны отверстия сечением 100 и 200 мм². Необходимое общее сечение устанавливается заглушками, изготовленных (рис. 3.7 Б) при помощи FDM 3D-печати.

Вследствие ряда факторов первый прототип показал неудовлетворительные результаты работы. В частности, не обеспечивалось должное уплотнение посадки, а возможная площадь сечения задействовалась нерационально.

С учётом полученного опыта был изготовлен второй прототип (рис. 3.8), имеющий по восемь отверстий 50 и 200 мм².

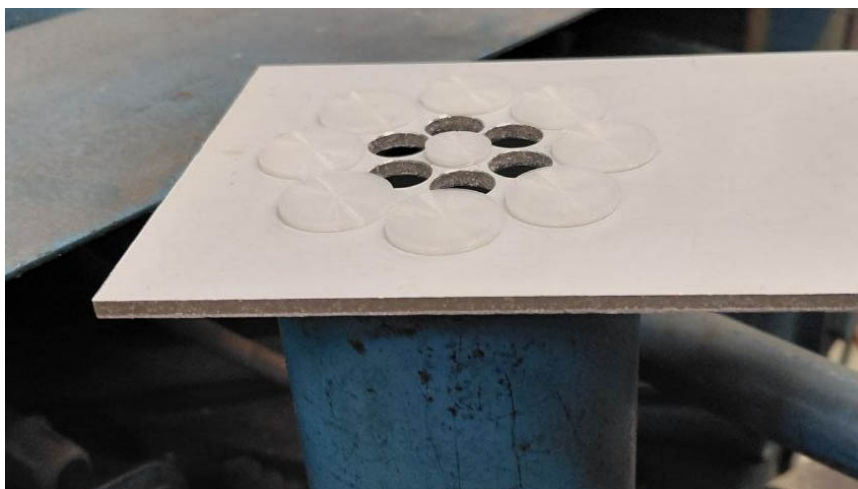


Рисунок 3.6 — Прототип дросселирующего устройства



А. фрезеровка



Б. 3D-печать

Рисунок 3.7 — Изготовление элементов дросселирующего устройства

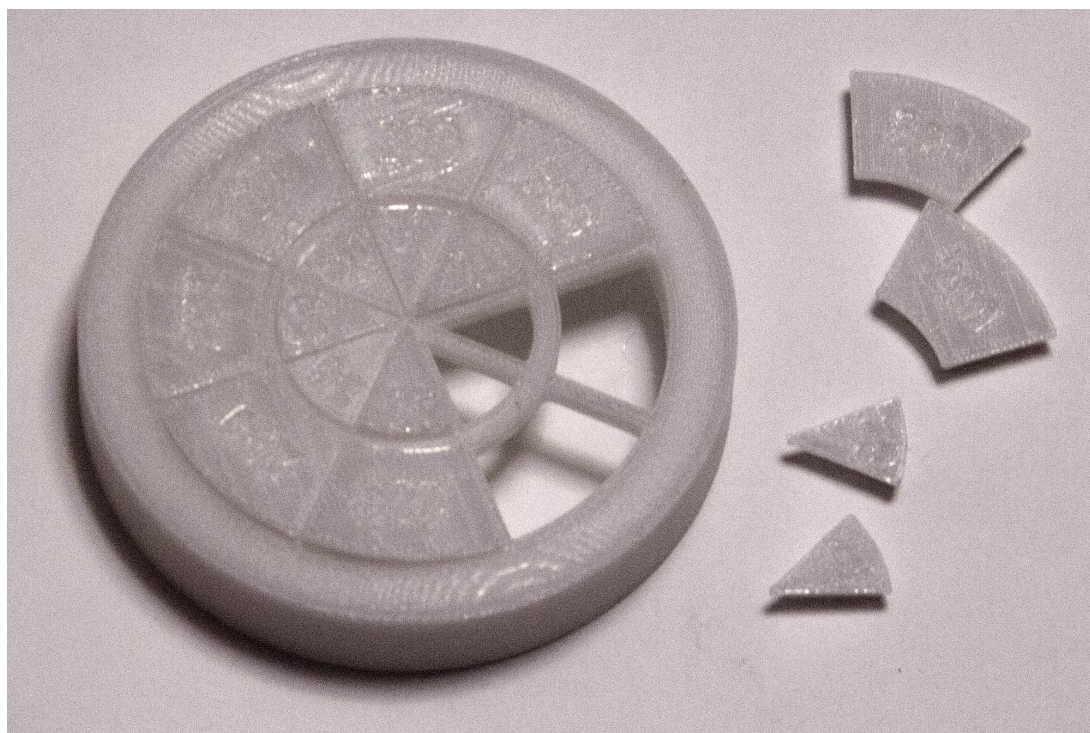


Рисунок 3.8 — Опытное дросселирующее устройство

Эмпирическим путём было установлено, что оптимальный режим дросселирования достигается при сечении дросселя, равном 600 мм^2 ; поэтому для постоянной эксплуатации было разработано дросселирующее устройство для дизеля Д-240 с таким сечением (рис. 3.9).

Дросселирующее устройство устанавливается на впускную трубу воздушного фильтра. Силиконовое кольцо обеспечивает плотное прилегание дросселя, тем самым исключая погрешности измерения.

3.2 Общий план эксперимента

Обобщённый алгоритм экспериментальной работы имеет следующий вид:

1. Проверить исправность испытуемого двигателя и при необходимости устранить неполадки.
2. Снять экспериментальную характеристику, используя полностью прогретый исправный двигатель.
3. Внести изменение исследуемого структурного параметра.
4. Снять вторую и при необходимости последующие экспериментальные характеристики при работе с внесённым изменением.
5. Обеспечить возврат к исходным значениям структурных параметров.

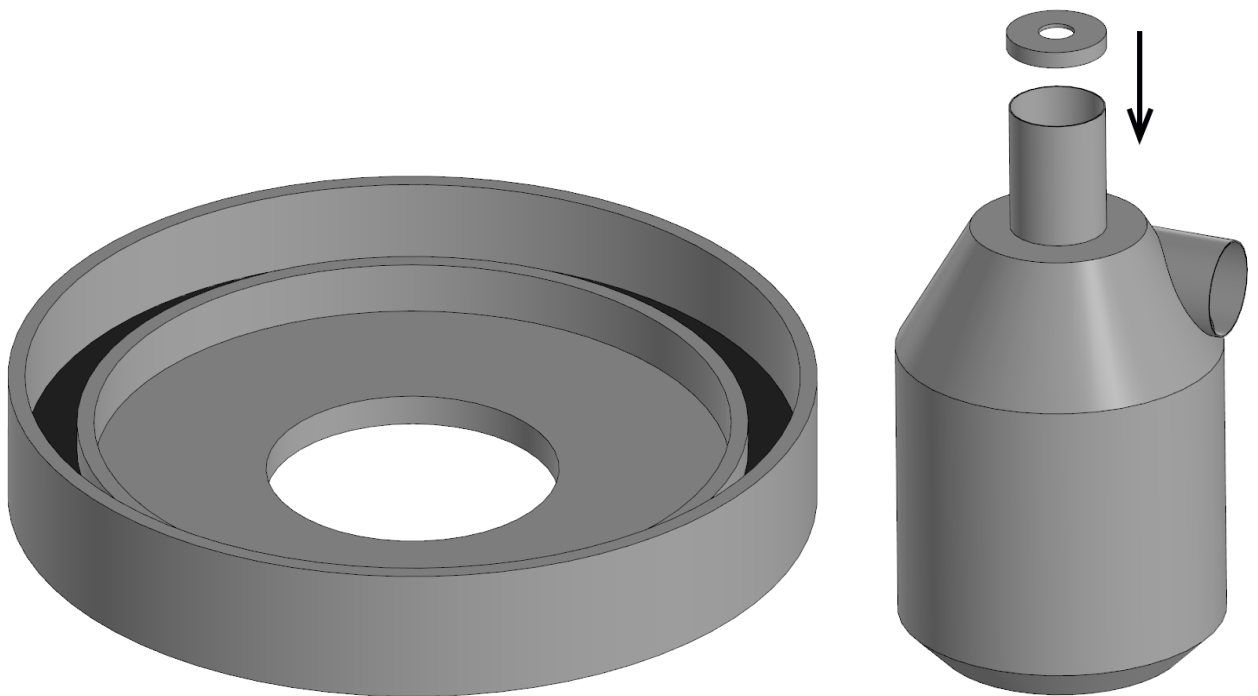


Рисунок 3.9 — Серийное дросселирующее устройство и его установка

3.3 Влияние переизбытка топлива на состав ОГ

В данном эксперименте возмущением выступает избыточная цикловая подача топлива в один цилиндр, достигаемая при помощи снижения давления впрыска с 18 до 10 МПа.

3.3.1 Экспериментальная установка

В качестве объекта измерения для первого эксперимента выбран дизель Д-240, наработка которого — 250 моточасов — невелика, но условия эксплуатации в учебной лаборатории привели к достаточно изношенному состоянию двигателя, и, как следствие, даже некоторому снижению мощности.

Состав отработавших газов измеряется газоанализатором Инфракар 5М2.01, подключенному в специально сконструированный патрубок, сваренный в трубу, сообщающуюся с атмосферой. Патрубок установлен встречно потоку газов, поэтому гарантированно принимает часть ОГ. Подключение газоанализатора к патрубку выполнено при помощи стандартного пробоотборника и силиконовой трубки с дополнительным фильтром сажи (в качестве него используется автомобильный фильтр тонкой очистки топлива).

Частота вращения коленчатого вала в данном эксперименте определялась по бортовому тахоспидометру, без использования прибора ИМДЦ-2.

Для регулировки давления подачи топлива использован механотестер КИ-16301 (рис. 3.10).

3.3.2 Алгоритм проведения эксперимента

1. Проверить исправность испытуемого двигателя:

1.1. Пустить двигатель, прогреть до рабочей температуры, остановить.

1.2. Демонтировать обратную топливную магистраль.

1.3. Проверить давление подъёма иглы форсунки каждого цилиндра:

1.3.1. Подготовить механотестер к работе, заполнив резервуар топливом и удалив воздух.

1.3.2. Подключить механотестер ко входному штуцеру испытуемой форсунки.



Рисунок 3.10 — Регулировка давления впрыска прибором КИ-16301

- 1.3.3. Выполнить несколько нажатий на рукоятку механотестера. Наблюдая за показаниями его манометра, зафиксировать максимальное показание, после которого происходит впрыск.
- 1.3.4. Если давление впрыска топлива не соответствует номинальному, отрегулировать его.
- 1.3.5. Отсоединить механотестер от испытуемой форсунки.
- 1.3.6. Повторить пп. 1.3.2...1.3.5. для каждого цилиндра двигателя.
- 1.4. Установить обратную топливную магистраль.
- 1.5. Пустив двигатель, убедиться в правильности его работы.
2. Подготовить газоанализатор к работе:
 - 2.1. Проверить правильность подключения газоанализатора к электросети и установку верного значения напряжения на настроечной панели газоанализатора.
 - 2.2. Включить переключатель питания газоанализатора, не подключая его к двигателю. Начнётся обратный отсчёт для прогрева блока датчиков (10 мин).

- 2.3. После прогрева газоанализатора, подключить к нему трубку пробоотборника и нажать кнопку "компрессор" для включения всасывающего насоса.
3. Снять характеристику нормального состава ОГ:
 - 3.1. Пустить двигатель.
 - 3.2. На минимальной n_d холостого хода прогреть двигатель, периодически фиксируя показания газоанализатора с привязкой ко времени.
 - 3.3. Дождаться стабилизации показаний и прогрева до рабочей температуры.
 - 3.4. Получить характеристики для условленного числа экспериментальных точек:
 - 3.4.1. Установить случайное значение частоты холостого хода при помощи рукоятки управления подачей топлива.
 - 3.4.2. Дождавшись стабилизации показаний газоанализатора, зафиксировать значения всех измеряемых показателей с привязкой ко времени.
 - 3.5. Остановить двигатель.
4. Внести изменение структурного параметра: по алгоритму, аналогичному пп. 1.3., установить величину давления впрыска равной 10 МПа.
5. Снять характеристику состава ОГ с неисправностью аналогично п. 3.
6. Восстановить значения структурных параметров аналогично пп.1.3.

Результатом выполнения экспериментов является числовая таблица вида:

Таблица 3.1

Образец таблицы результатов эксперимента

t, c	$n_d, \text{мин}^{-1}$	$CO\%$	$CO_2\%$	NOX, ppm	CH, ppm	$O_2\%$
157	1600	0.088	1.644	134	27	22.7
...						
4082	1000	0.117	1.283	51	18	22.26

3.4 Дросселирование воздуха как диагностический тест

Данный эксперимент проводится на исправных двигателях, возмущением выступает дросселирование воздуха на впуске при помощи частичного перекрытия входного патрубка воздушного фильтра. Главной целью является установить, каким образом изменяются характеристики двигателей с различным техническим состоянием при ухудшения питания воздухом.

3.4.1 Экспериментальная установка

В качестве объектов измерения задействованы два дизеля Д-240 тракторов МТЗ-82: А — с минимальной наработкой в лёгких условиях эксплуатации; Б — со значительным износом. Также в качестве источника дополнительных данных ("В") задействован дизель Д-145Т трактора Агромаш-85ТК, для которого дросселирование не производится.

Состав отработавших газов, как и в предыдущем эксперименте, измеряется при помощи газоанализатора Инфракар 5М2.01, подключаемого к пробоотборнику, устанавливаемому на выход выхлопной трубы.

Для измерения частоты вращения коленчатого вала используется прибор ИМДЦ-2.

3.5 Алгоритм проведения эксперимента

1. Пустить двигатель, прогреть до рабочей температуры, проверить его работоспособность.
2. Подготовить газоанализатор к работе аналогично п. 2 предыдущего эксперимента.
3. Снять характеристику "Н" нормального состава ОГ аналогично п. 3 предыдущего эксперимента.
4. Выполнить дросселирование воздуха (двигатели А и Б):

4.1. Установить среднюю n_d холостого хода.

4.2. Постепенно перекрывая проходное сечение впускного патрубка воздушного фильтра прочной перегородкой, добиться снижения частоты вращения на 20...25%.

4.3. Зафиксировать перегородку.

5. Снять характеристику "Д" отработавших газов с дросселированием впуска аналогично п.3 предыдущего эксперимента.
6. Демонтировать дросселирующую перегородку.
7. Выполнить несколько свободных разгонов двигателя для того, чтобы выгорели возможные отложения на стенках цилиндра и выпускного тракта.
8. Остановить двигатель.

Результаты эксперимента фиксируются в виде числовой таблицы, аналогичной табл. 3.1.

4 РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

4.1 Аппроксимация экспериментальных данных

Для дальнейшего анализа целесообразнее представить получаемые зависимости не только в виде облака экспериментальных точек, но и в виде математических зависимостей.

Сама аппроксимация проводилась при помощи скрипта на Python, приведённого в приложении Б.5.

В обоих экспериментах полученные данные аппроксимируются следующим уравнением:

$$y = \exp(a + b \cdot 10^{-3}n_d + c \cdot 10^{-6}n_d) \quad (4.1)$$

Использование экспоненты полинома вместо чистого полинома вызвано тем, что аппроксимированные полиномиальные зависимости зачастую не соответствуют сути поведения экспериментальной функции при выходе за пределы области определения. Задействование экспоненты позволяет в значительной мере стабилизировать поведение аппроксимированной функции.

4.2 Влияние неисправностей топливной аппаратуры

Проведённый эксперимент включил в себя следующие стадии:

1. Проверка исправности испытуемого дизеля в части соответствия номиналу давления впрыска всех форсунок.
2. Подготовка газоанализатора к работе и подключение его к двигателю (рис.4.1).
3. Снятие характеристики нормального состава отработавших газов: 30 экспериментальных точек на 6 уровнях n_d с шагом 200 мин^{-1} .
4. Внесение искусственной неисправности: для форсунки 4-го цилиндра установлено значение давления впрыска на уровне 10 МПа вместо номинальных 18.
5. Снятие характеристики состава отработавших газов со внесённой неисправностью: 18 экспериментальных точек на аналогичных уровнях n_d .
6. Восстановление исходного состояния двигателя.



Рисунок 4.1 — Подключение газоанализатора к двигателю Д-240

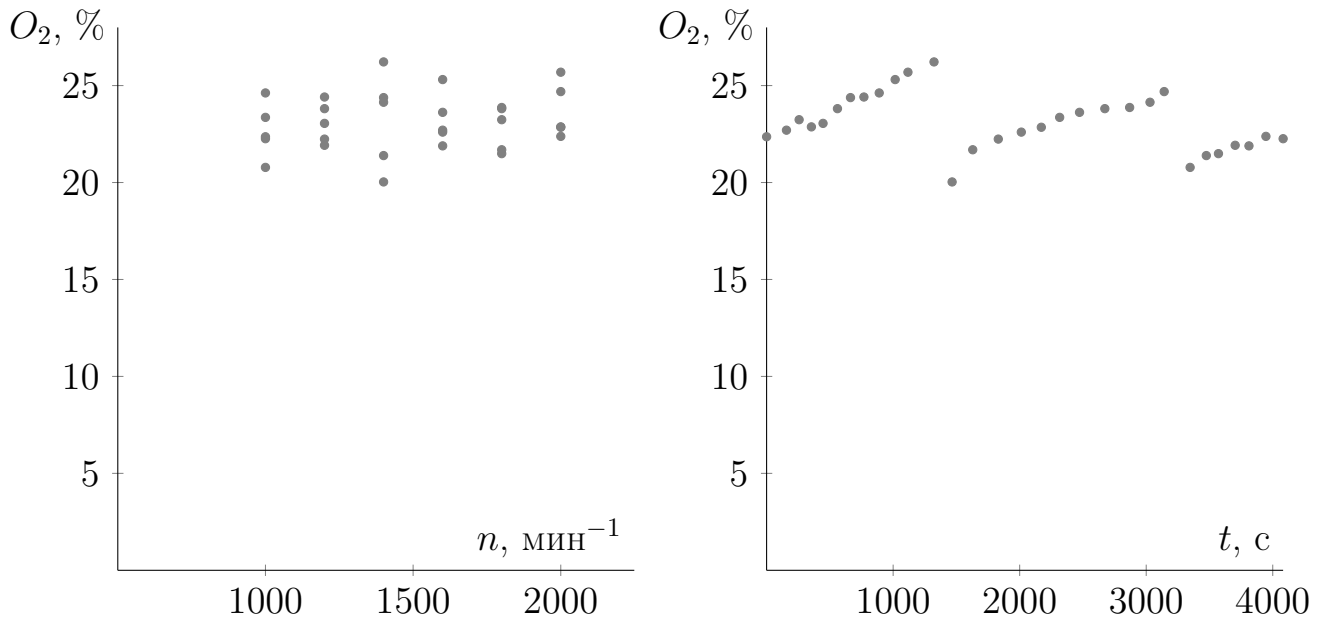
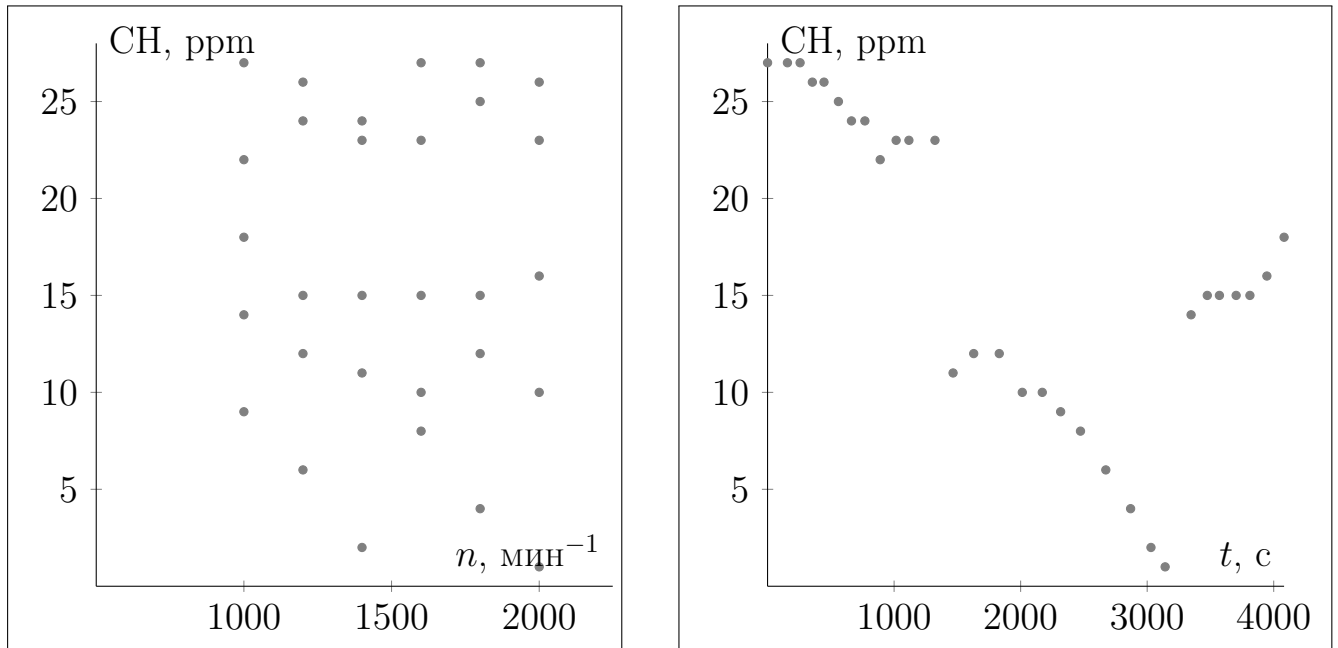
Полученные после первого замера данные были сведены в единую таблицу и визуализированы в виде графиков $R = f(n_d)$. Визуализация CO , CO_2 , NOx показала достаточно стройные зависимости, однако компоненты O_2 и CH в привязке к n_d оказались хаотичным полем точек с достаточно высоким разбросом (левые части рис. 4.2 и 4.3).

Лишь случайно принятое решение визуализировать зависимости $R = f(t)$ позволило выявить причину неадекватного поведения данных показателей: характеристики показали зависимость от времени (правая часть рис. 4.2 и 4.3) — вероятнее всего, причиной этому была неисправность датчиков по этим компонентам.

В связи с этим, в дальнейшем показатели CH и O_2 игнорировались (периодическое наблюдение за их значениями показало, что ситуация не изменилась).

После проведения второго этапа эксперимента были получены данные, показанные на рисунках 4.4, 4.5 и 4.6.

Чрезмерная подача топлива в 4 цилиндре практически не повлияла на концентрацию угарного и углекислого газов. Из графиков видно, что для CO незначительно повысилась концентрация, а само поведение экспериментальной

Рисунок 4.2 — Замеры концентрации O_2 Рисунок 4.3 — Замеры концентрации CH

функции осталось неизменным. Концентрация CO_2 , наоборот, незначительно снизилась и приняла вид линейной зависимости вместо экспоненциальной.

Концентрация оксидов азота значительно возросла при внесении неисправности: при низких значениях n_d значение превысило нормальное в 3,38 раза, при высоких — в 1,4. Подобный результат несколько отличается от показанного в работе [106], но следует отметить, что в данном источнике авторы исследуют главным образом работу под большой нагрузкой (движение грузового автомобиля в гору).

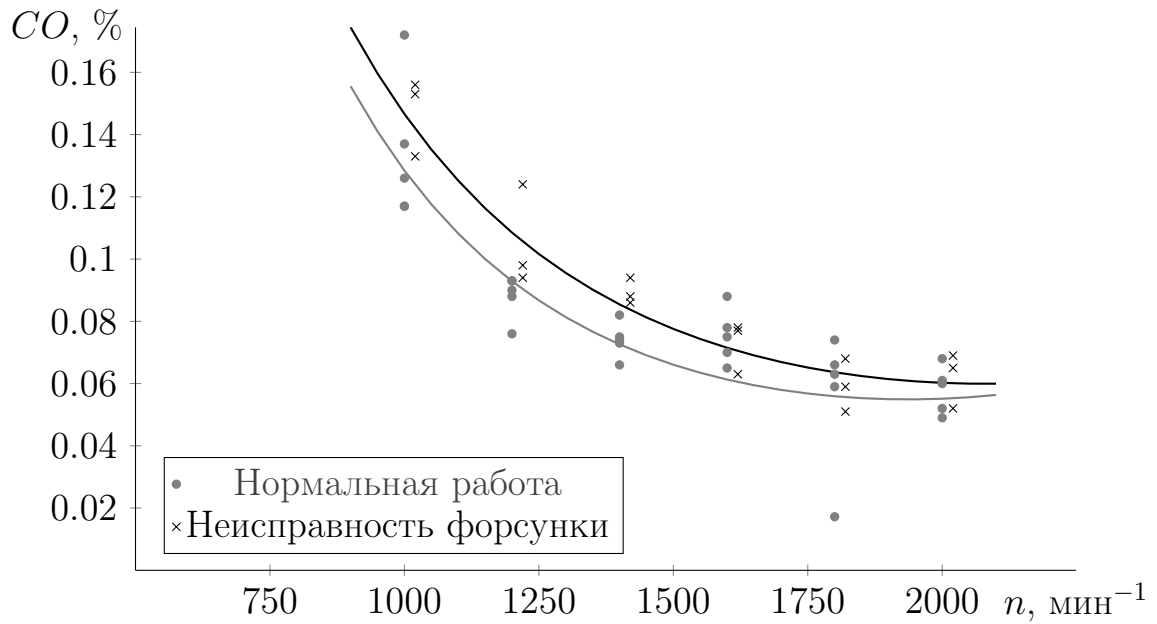


Рисунок 4.4 — Влияние переизбытка топлива на концентрацию CO
Точки смещены для наглядности

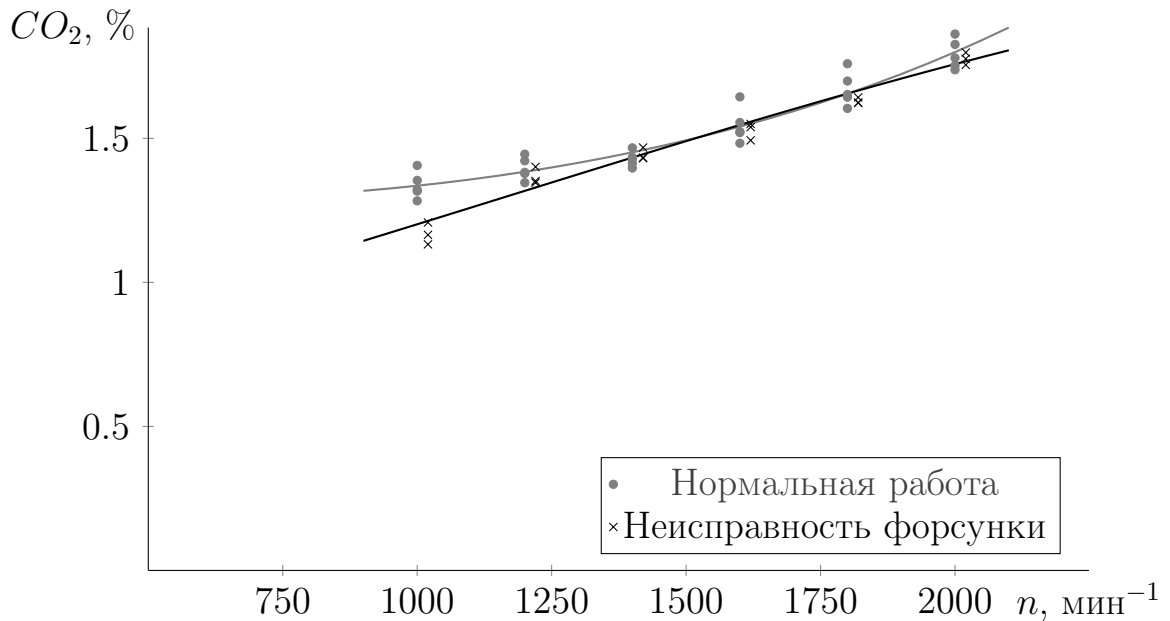


Рисунок 4.5 — Влияние переизбытка топлива на концентрацию CO₂
Точки смещены для наглядности

Поведение характеристики NOx оказалось схожим с теорией, представленной в разделе 2.1, и пусть два других компонента CO и CO_2 не показали больших изменений концентрации, описанный эксперимент следует считать результативным, поскольку он позволил выявить явную зависимость концентрации NOx в выхлопных газах дизеля при наличии неисправностей топливной аппаратуры, приводящих к чрезмерной подаче топлива.

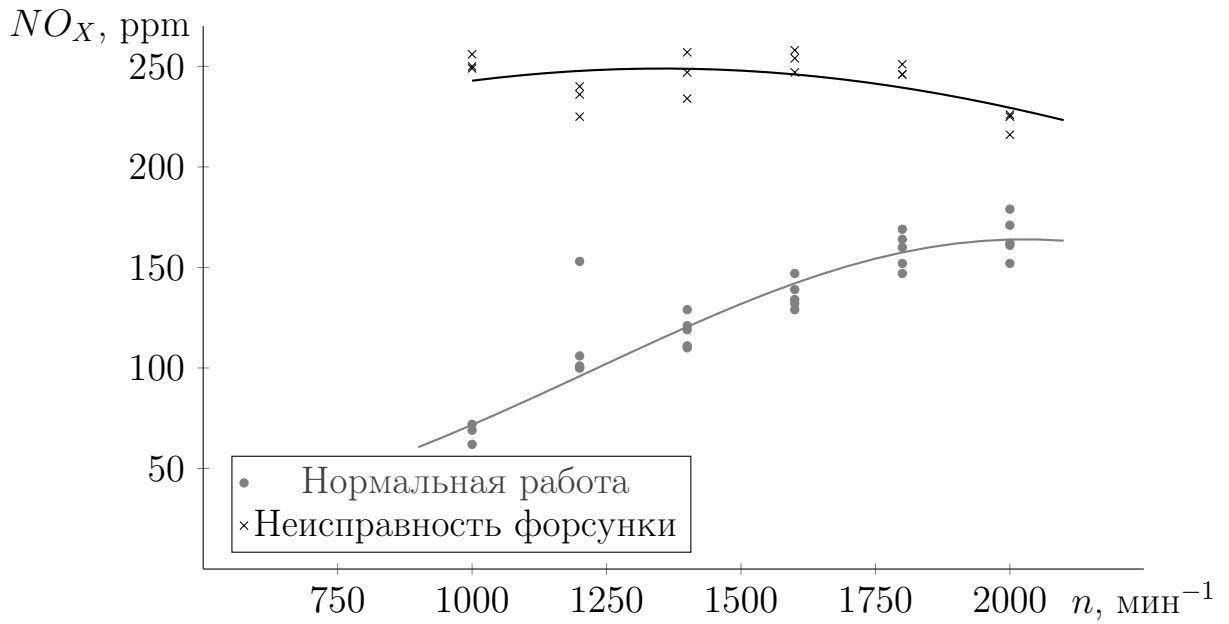


Рисунок 4.6 — Влияние переизбытка топлива на концентрацию NO_x

В табл. 4.1 показаны коэффициенты ранее приведённого уравнения для каждой из 6 функций, полученных при анализе данных текущего эксперимента, а также соответствующие коэффициенты детерминации R^2 .

Низкое значение коэффициента детерминации в последней строке вызвано некоторым уменьшением концентрации NO_x на уровне $n_d = 1200$ мин⁻¹, наблюдавшимся в ходе эксперимента. Тем не менее, общая закономерность поведения аппроксимированной функции соответствует экспериментальным данным.

4.2.1 Выявление неисправности форсунки по диагностическим данным

Полученный по результатам экспериментов итоговый алгоритм анализа данных представлен на рис. 4.7.

Таблица 4.1

Характеристики аппроксимированных уравнений

Замер	a	b	c	R^2
CO норма	0.7307	-3.751	0.9683	0.7657
CO неисправность	0.5057	-3.193	0.7678	0.9182
CO_2 норма	0.2912	-0.1519	0.15	0.9253
CO_2 неисправность	-0.4115	0.6862	-0.1007	0.9654
NO_x норма	1.88	3.176	-0.7832	0.854
NO_x неисправность	5.158	0.5306	-0.1958	0.2957

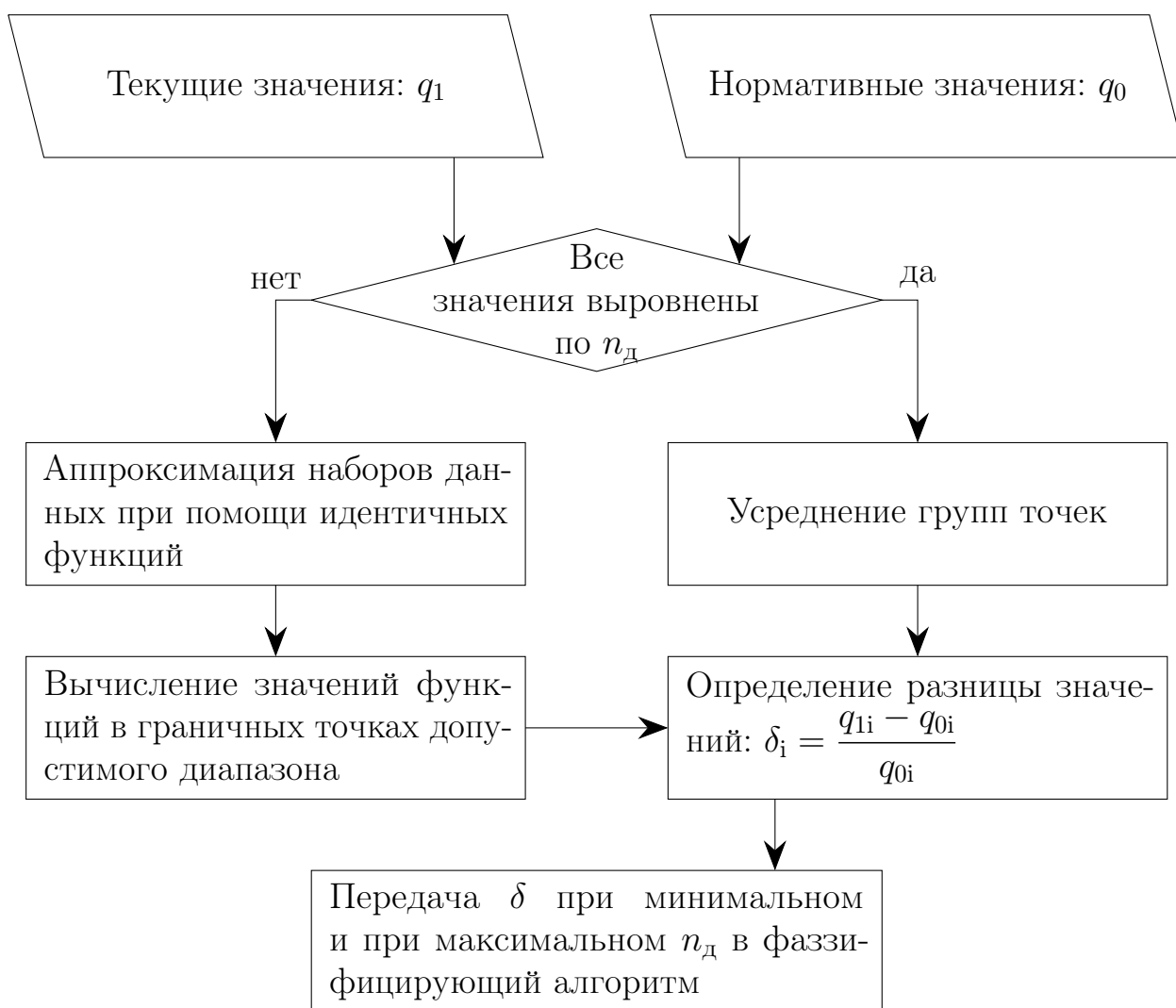


Рисунок 4.7 — Алогритм анализа данных для выявления эффекта льющей форсунки

В качестве входных данных используют две группы значений концентрации рассматриваемого компонента ОГ: текущие и нормативные. При этом желательно использовать в качестве нормативных данных характеристики, полученные непосредственно на диагностируемом двигателе ранее, когда его состояние, определённое по комплексу показателей, оценивалось как номинальное. Использование подобной характеристики от другого двигателя той же модели допустимо, но менее желательно.

Если и текущие, и нормативные данные имеют выравнивание по градациям n_d (аналогично рис. 4.4...4.6), то значения в обеих группах усредняют для минимальной и для максимальной градации.

В противном случае выполняют аппроксимацию обоих наборов данных по возможности более точной функцией (линейная – нежелательно; полином – допустимо; экспонента полинома аналогично формуле 4.1 – хорошо). Вычис-

ляют значения полученной функции в точках, соответствующих минимальной и максимальной n_d .

Полученные значения q_{1i} сравнивают с нормативными q_{0i} по следующей формуле: $\delta_i = \frac{q_{1i} - q_{0i}}{q_{0i}}$.

Оба полученных значения δ передаются в экспертную систему для дальнейшей обработки. В случае, если задействовать её невозможно, руководствуются следующим принципом: *увеличение показателей NO_x при неизменных остальных свидетельствует о неисправности по крайней мере одной форсунки.*

4.3 Дросселирование воздуха как диагностический тест

Проведённый эксперимент включил в себя следующие стадии:

1. Пуск двигателя, прогрев до рабочей температуры, проверка работоспособности.
2. Подготовка газоанализатора к работе и подключение к пробоотборнику, установленному в выхлопной трубе.
3. Снятие характеристики "Н" состава отработавших газов при нормальной работе двигателя.
4. Установка дросселирующей заслонки.
5. Снятие характеристики "Д" состава ОГ при дросселировании воздуха на впуске.
6. Демонтаж дросселирующей заслонки, возврат к нормальной работе двигателя, останов.

В ходе проведения данного эксперимента газоанализатор устанавливался в кабине трактора (рис.4.8). Отводящую трубку газоанализатора при этом необходимо вывести наружу, чтобы избежать отравления компонентами отработавших газов.

Полученные экспериментальные данные показаны на рис. 4.9...4.14.

Характеристика концентрации оксидов азота на новом двигателе (рис. 4.9) показала результат, обратный предыдущему эксперименту. Несмотря на то, что, казалось бы, в обоих случаях внесение возмущения вызывает ухудшение условий

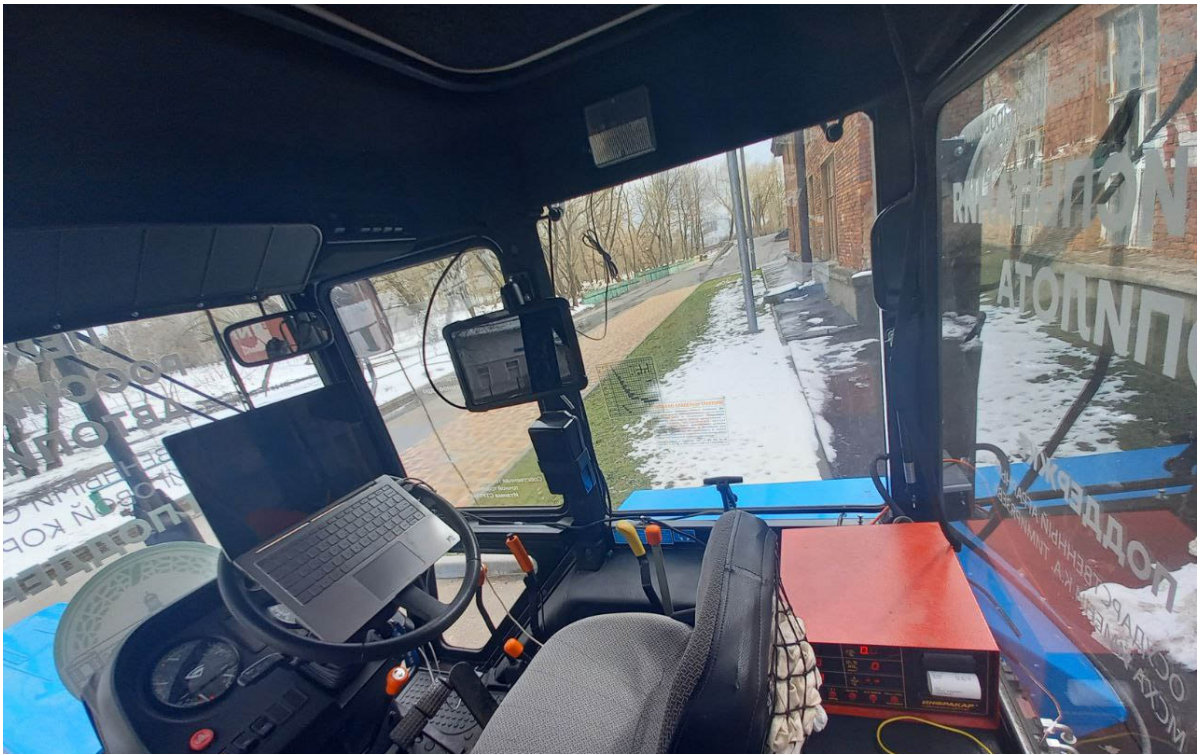


Рисунок 4.8 — Газоанализатор в кабине МТЗ-82

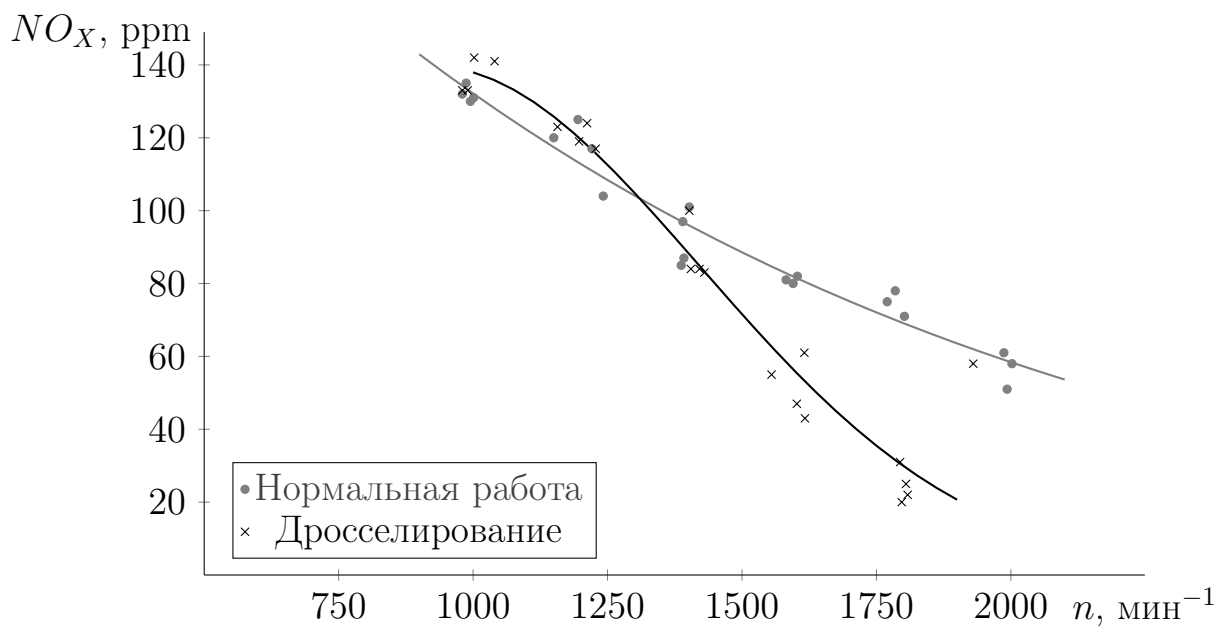


Рисунок 4.9 — Влияние дросселирования на концентрацию NO_x , неизношенный двигатель

сгорания, на менее изношенном двигателе произошло уменьшение концентрации NO_x , причём с увеличением n_d концентрация уменьшилась ещё более значительно. Впрочем, при низких n_d данный показатель был незначительно выше, чем значения при нормальной работе.

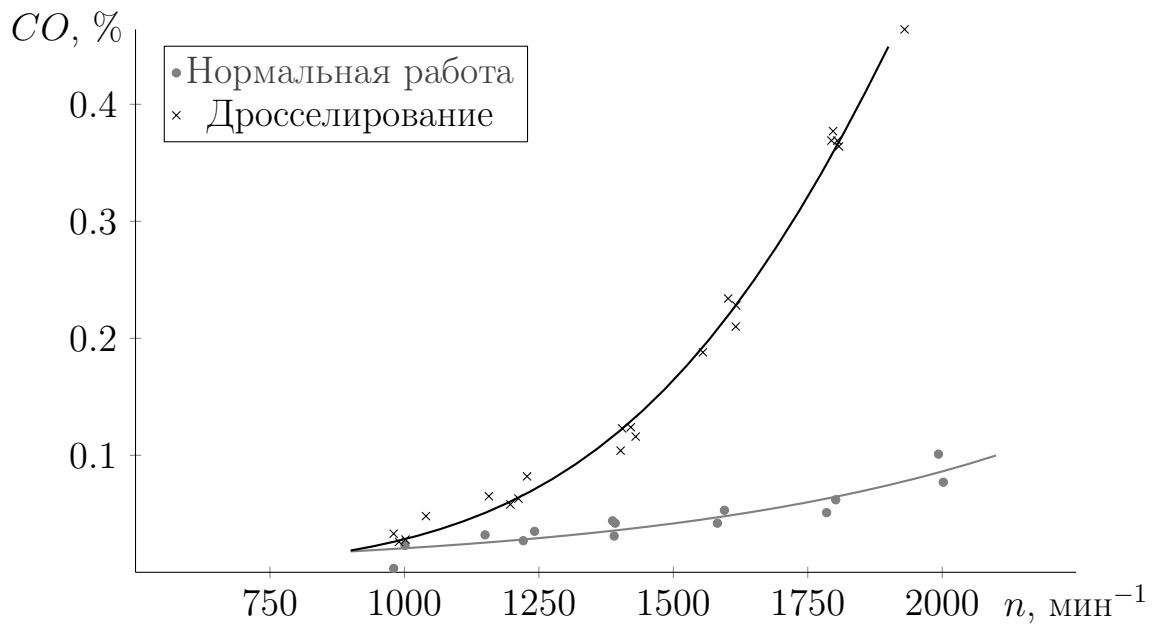


Рисунок 4.10 — Влияние дросселирования на концентрацию CO , неизношенный двигатель

Концентрация угарного газа (рис. 4.10) показала более предсказуемое поведение. Схожие при низких n_d значения проявили более чем пятикратный рост к $n_d \approx 1850$, а дальнейшее увеличение подачи топлива приводило только к увеличению концентрации CO без повышения n_d . Двигатель при этом работал неустойчиво.

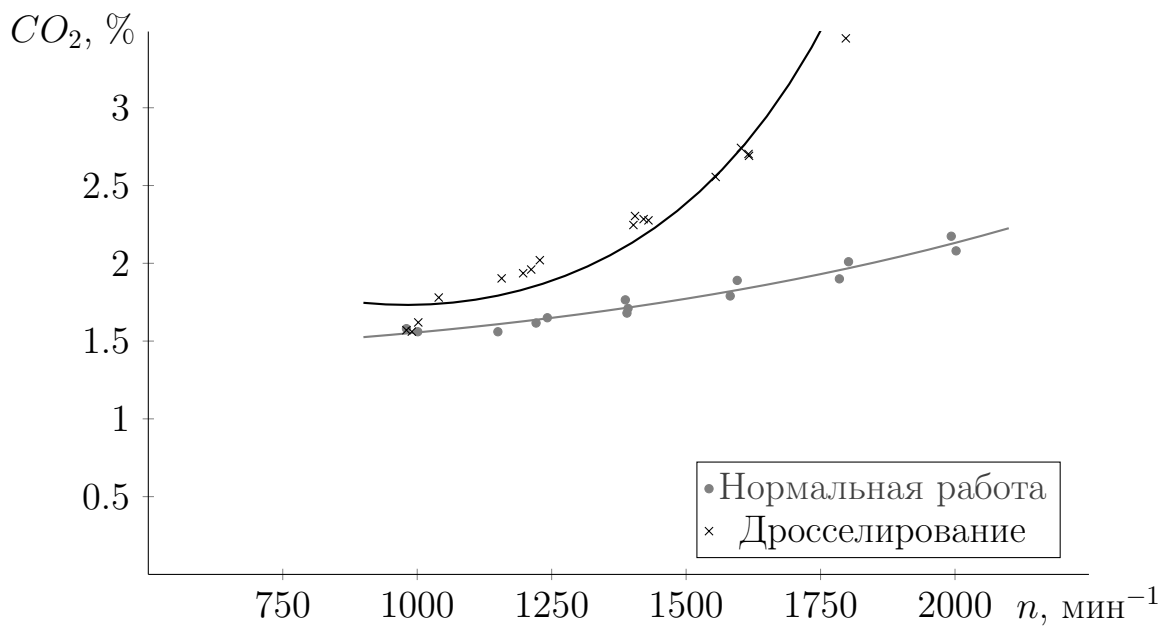


Рисунок 4.11 — Влияние дросселирования на концентрацию CO_2 , неизношенный двигатель

Аналогичное поведение было присуще и характеристике углекислого газа (рис. 4.11). Изначально схожие с фоновыми значения возрасали относительно них при увеличении n_d , но отличались на меньшую величину — максимальное отклонение составило порядка 75%.

Характеристика NO_x изношенного двигателя (рис. 4.12) имеет более предсказуемый вид. При увеличении n_d растёт разрыв с нормальными значениями, достигая двукратной разницы. Отметим, что без дросселирования воздуха рост концентрации оксидов азота почти стабилизировался после достижения $n_d = 1500$, при дросселировании же, наоборот, тенденция роста сохранилась.

Концентрация CO при дросселировании на двигателе с износом (рис.4.13) менялась по неоднозначной характеристике, несмотря на то, что значения были получены одновременно с характеристиками других компонентов. Тем не менее, общая тенденция более высоких значений сохранилась — и обратив внимание именно на экспериментальные точки, а не на аппроксимирующую кривую, можно засвидетельствовать быстрый рост данного показателя в диапазоне $n_d = 1750...2100 \text{ мин}^{-1}$.

Показатели содержания CO_2 в ОГ изношенного двигателя (рис. 4.14) подчиняются общей тенденции: возрастающая кривая показывает более уверенный рост при дросселировании. Разброс значений при этом не превышает критических

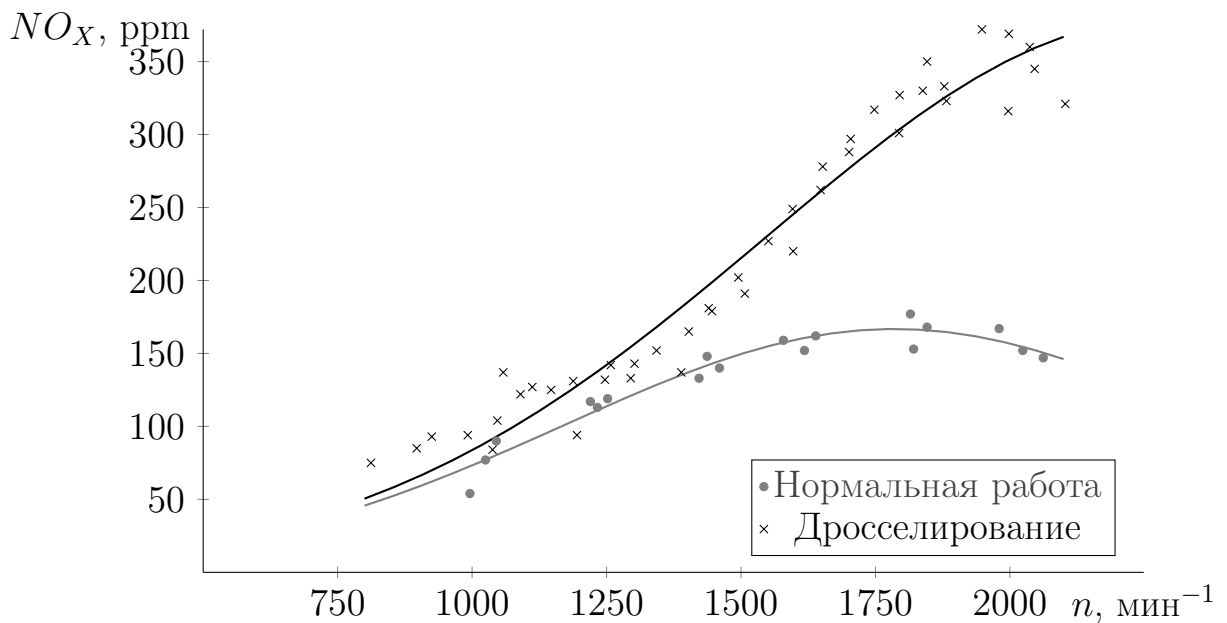


Рисунок 4.12 — Влияние дросселирования на концентрацию NO_x , двигатель с износом

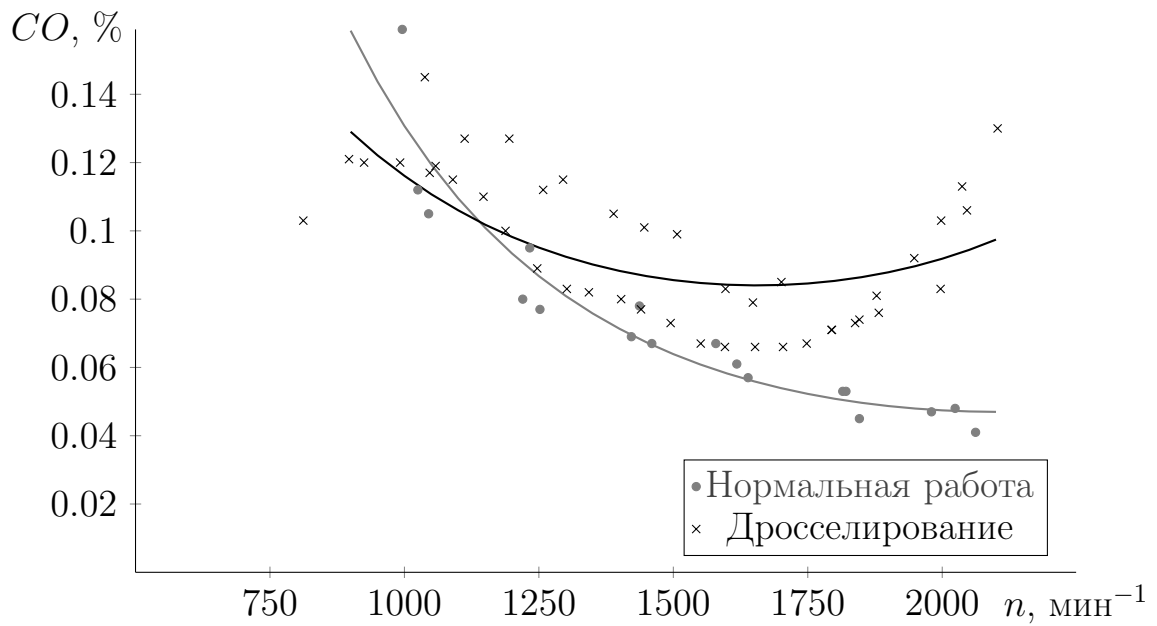


Рисунок 4.13 — Влияние дросселирования на концентрацию CO , двигатель с износом

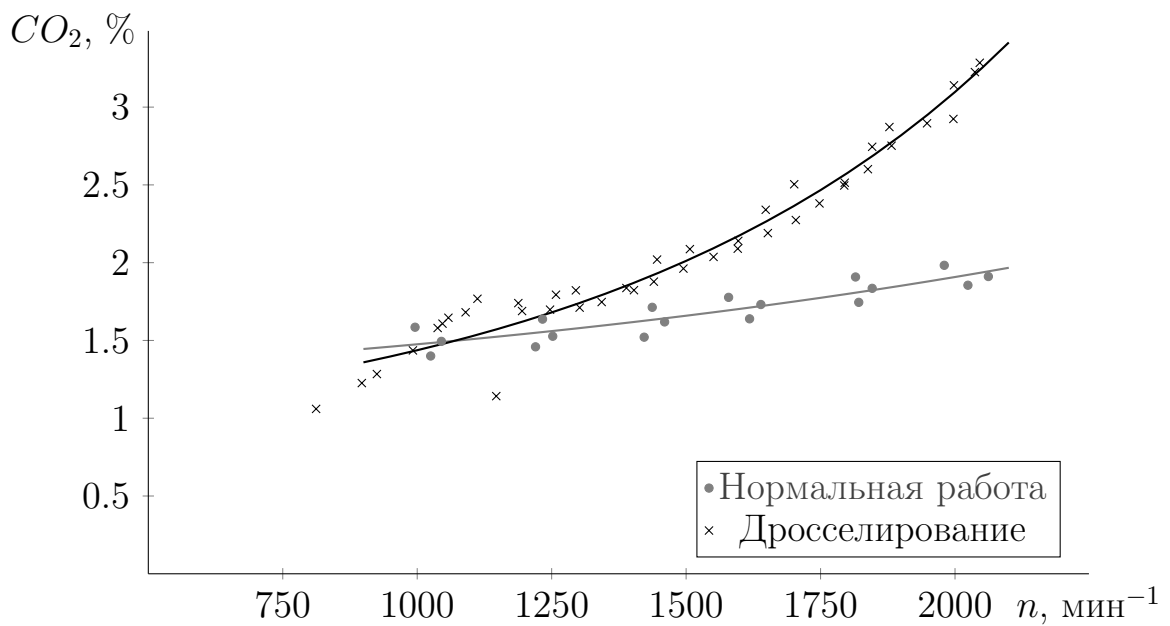


Рисунок 4.14 — Влияние дросселирования на концентрацию CO_2 , двигатель с износом

значений, а аппроксимирующая кривая с достаточной точностью соответствует экспериментальным данным.

Теперь проведём сравнительный анализ полученных характеристик (обозначенных по двигателю и режиму работы как "А.Н", "А.Д", "Б.Н" и "Б.Д").

Характеристика NOx изношенного двигателя примечательна следующими фактами (рис. 4.15):

а) является возрастающей, в отличие от характеристики нового двигателя;
 б) при меньших значениях n_d концентрация NO_x ниже, чем для изношенного двигателя;

в) при дросселировании показатели NO_x заметно возрастают при высоких n_d , в то время как у нового двигателя, наоборот, уменьшаются.

Зависимости концентрации угарного газа показали достаточно парадоксальное поведение (рис. 4.16): характеристика для изношенного двигателя при нормальном работе предсказуемо ниже, но дросселирование вызывает её значительный рост, чего не наблюдается у изношенного двигателя. Зависимость для нового дизеля является восходящей, для изношенного — убывающей.

Зависимости для CO_2 показали близкое поведение (рис. 4.17): для обоих двигателей они являются возрастающими и принимают похожие значения с расхождением не более чем на 10%. Дросселирование приводит к увеличению показателей на высоких n_d . Расхождение кривых для нового и изношенного двигателей при дросселировании, вероятнее всего, вызвано отличиями в положении дросселирующей заслонки, поскольку обеспечить её идентичное положение не предоставляется возможным.

Также подобное расхождение может быть вызвано неплотностями впускного тракта у изношенного двигателя.

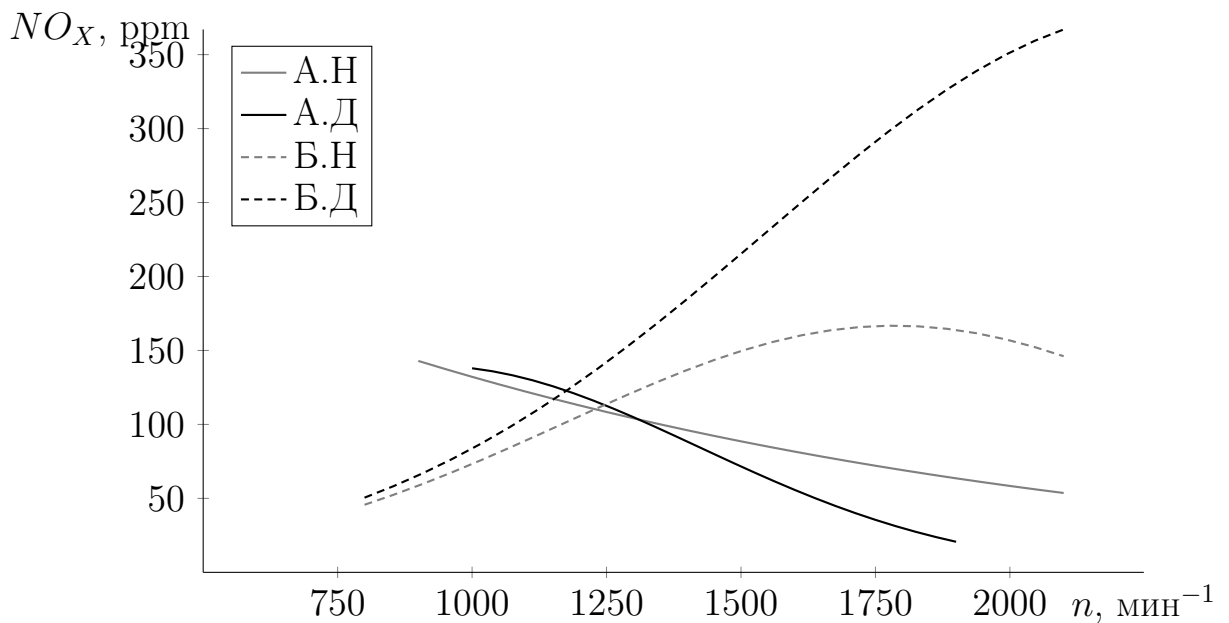


Рисунок 4.15 — Влияние дросселирования на концентрацию NO_x , сравнительный анализ

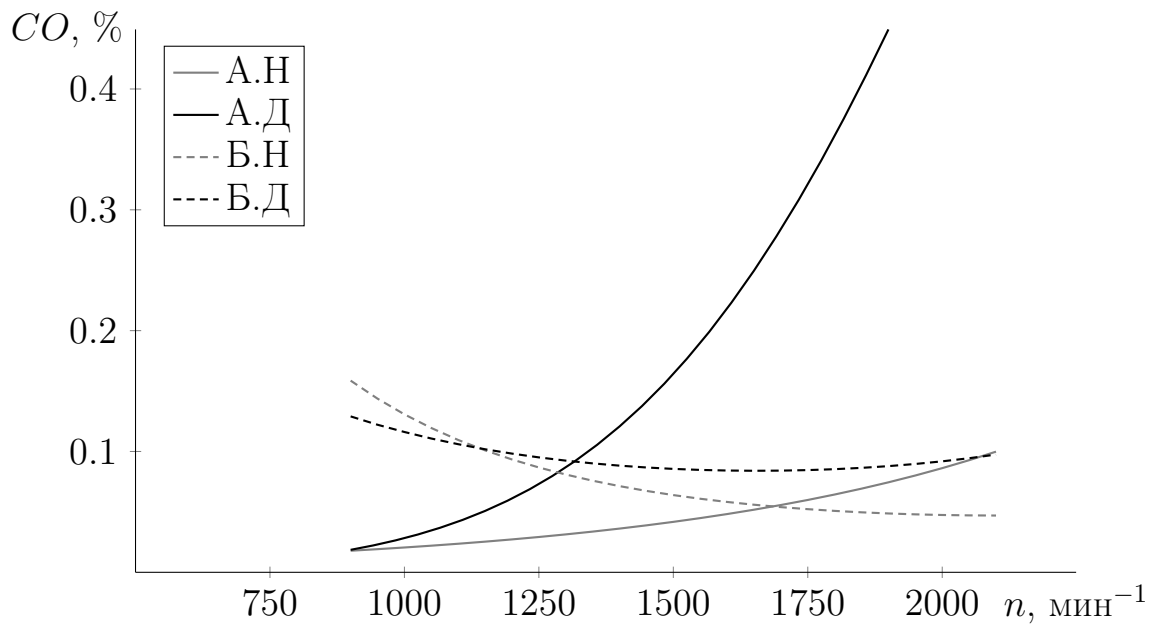


Рисунок 4.16 — Влияние дросселирования на концентрацию CO , сравнительный анализ

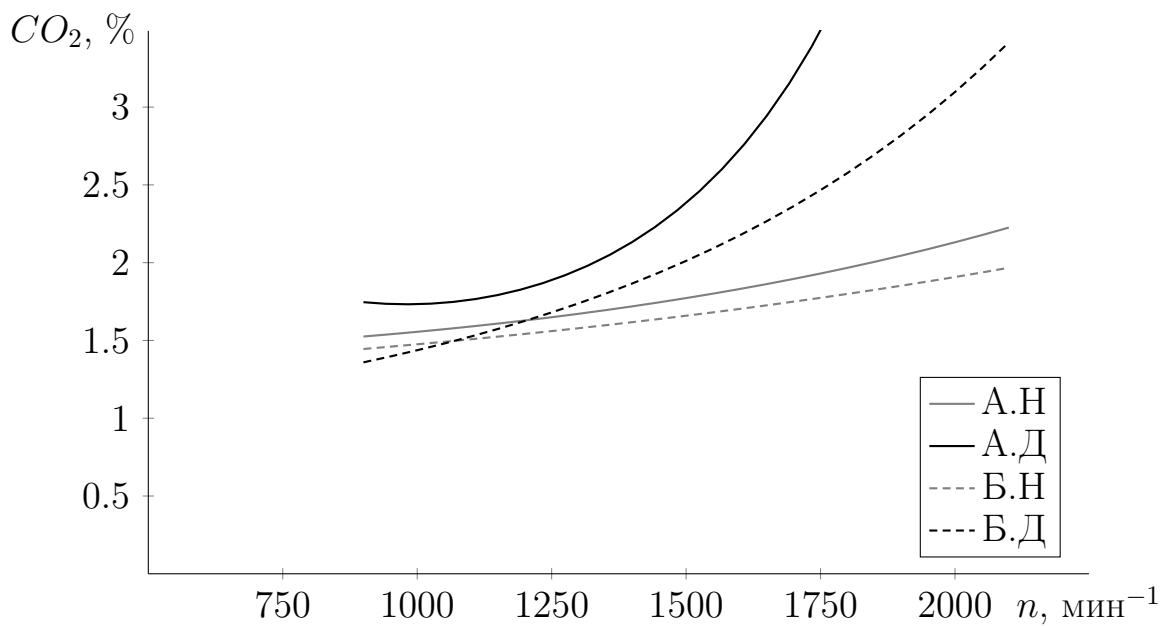


Рисунок 4.17 — Влияние дросселирования на концентрацию CO_2 , сравнительный анализ

4.3.1 Алгоритм определения общей изношенности двигателя по составу отработавших газов

Опираясь на результаты описанного эксперимента и алгоритм, выработанный в подразделе 4.2.1, сформулируем, как необходимо действовать, чтобы

определить уровень действительного комплексного износа двигателя по получаемым в ходе диагностирования характеристикам.

Обратим внимание на рис. 4.15, 4.16, 4.17. При составлении графиков на них данные были представлены аппроксимированными функциями. Этот шаг, фактически, повторяет один из пунктов алгоритма 4.2.1, поэтому воспользуемся таким подходом и здесь.

Аналогичным образом следует определить и координаты граничных точек. Далее, поскольку результаты эксперимента свидетельствуют именно о разнице в поведении функций, необходимо определить угловые коэффициенты характеристик при нормальной работе k_n и при дросселировании k_d : $k = (q_{\max} - q_{\min}) / (n_{d \max} - n_{d \min})$.

Результаты вычисления k для каждого из компонентов по результатам экспериментов показаны на рис. 4.18, 4.19 и 4.20 в виде номограмм. При этом ординате $p = 0$ соответствует номинальное состояние двигателя, $p = 1$ — критический износ.

На номограмме для CO_2 (рис. 4.20) видно, что малому изменению k_n соответствует очень большое изменение p , что подтверждает сделанное ранее предположение о том, что использовать характеристику CO_2 для диагностирования нецелесообразно.

Получив при диагностировании актуальные данные и определив коэффициенты k_n^{NOx} , k_d^{NOx} , k_n^{CO} и k_d^{CO} , по номограммам либо при помощи зависимостей, представленных в табл. 4.2, вычисляют значения соответственно p_n^{NOx} , p_d^{NOx} , p_n^{CO} и p_d^{CO} .

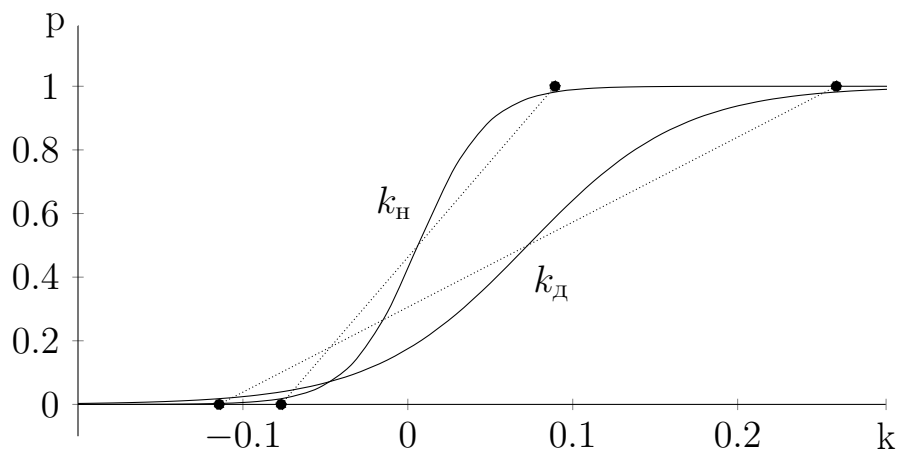


Рисунок 4.18 — Номограмма изношенности для NOx
Ось y смещена влево

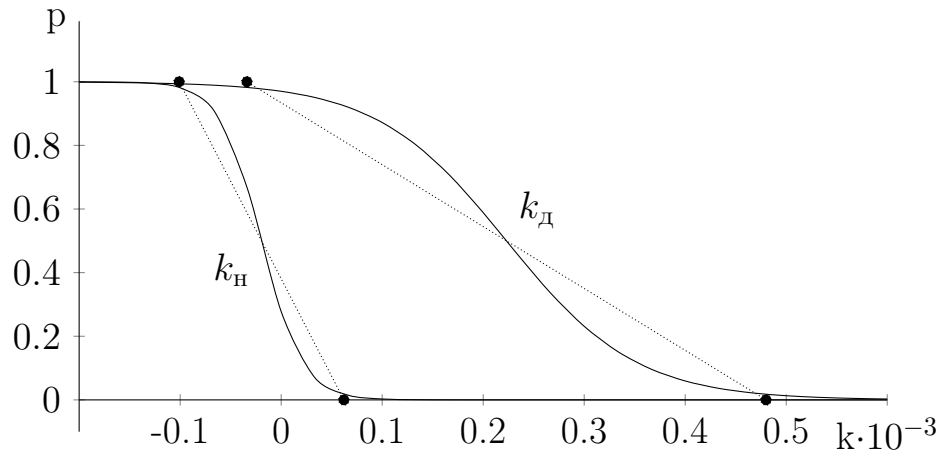


Рисунок 4.19 — Номограмма изношенности для СО
Ось y смещена влево

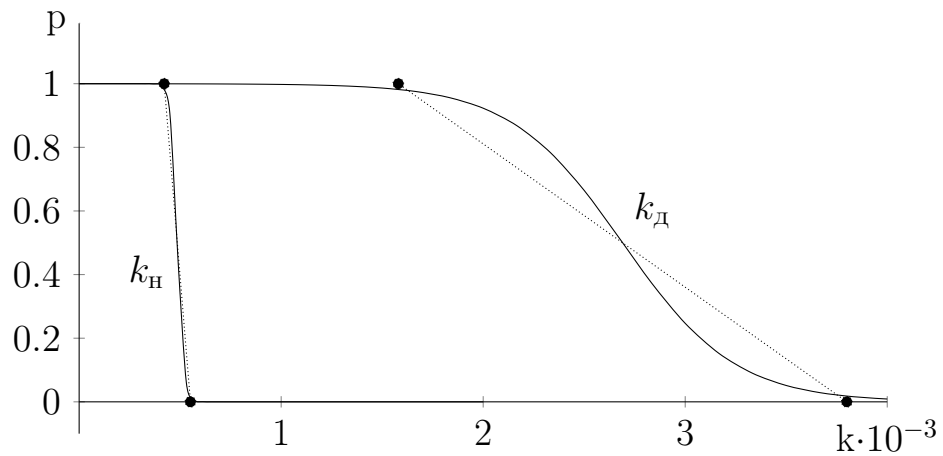


Рисунок 4.20 — Номограмма изношенности для СО₂
Ось y смещена влево

Таблица 4.2

Зависимости для вычисления степени изношенности

$p = 1 / (1 + \exp(-a \cdot (x - b)))$ $m = 10^{-3}$; $\mu = 10^{-6}$			
	a	b	
p_H^{NOx}	48,17	6,214m	p_H^{CO} -490,2μ -19,46μ
p_D^{NOx}	21,38	72,7m	p_D^{CO} -155,7μ 223,1μ

Получив значения этих коэффициентов, определяют итоговую вероятность по формуле, аналогичной 1.1, то есть:

$$P = 1 - (1 - p_H^{NOx}) \cdot (1 - p_D^{NOx}) \cdot (1 - p_H^{CO}) \cdot (1 - p_D^{CO})$$

Вычисленное значение P передаётся напрямую в экспертную систему в качестве признака.

4.4 Характеристики без вмешательства

В качестве вспомогательного эксперимента были сняты характеристики двигателя Д-145Т трактора Агромаш-85ТК, находящегося в процессе обкатки (наработка на момент начала эксперимента составила 14 моточасов).

Дросселирование и иные вмешательства при этом не проводились, поскольку в процессе обкатки двигатель и без того подвержен крайне высокому износу.

Алгоритм действий при снятии характеристик очевиден и аналогичен задействованным ранее, поэтому приведён не будет.

Характеристика NO_x (рис. 4.21) 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.

Характеристика CO_2 для Д-145Т (рис. 4.22) принимает схожие с Д-240 значения, и аналогична с ней в поведении. Основываясь на этом, можно сделать предварительный вывод о том, что значения CO_2 не так информативны для целей диагностики.

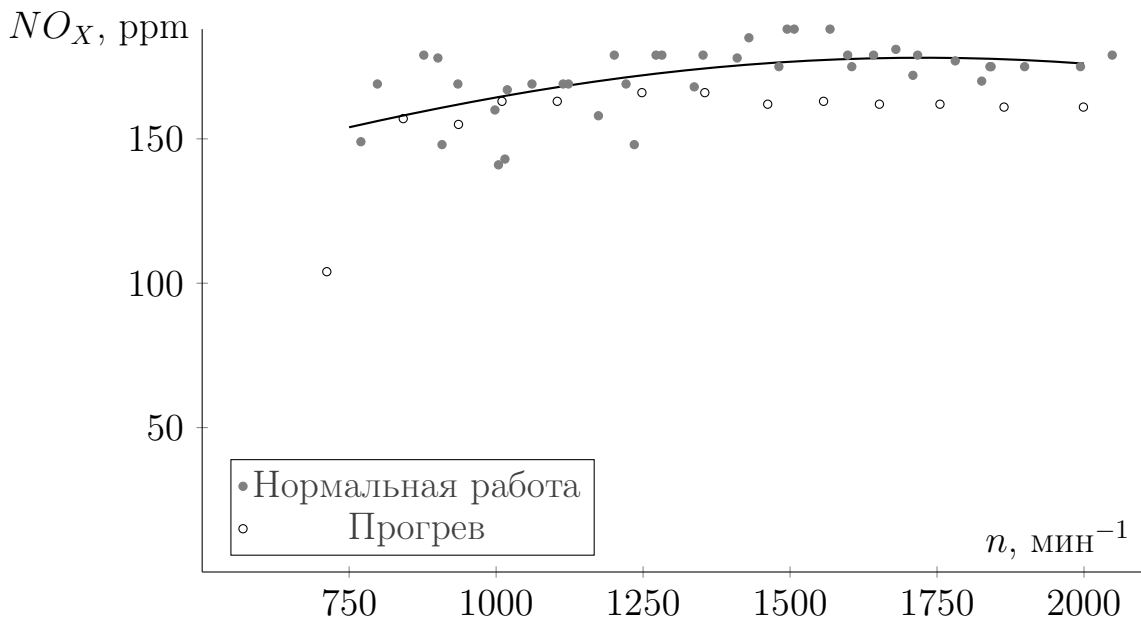
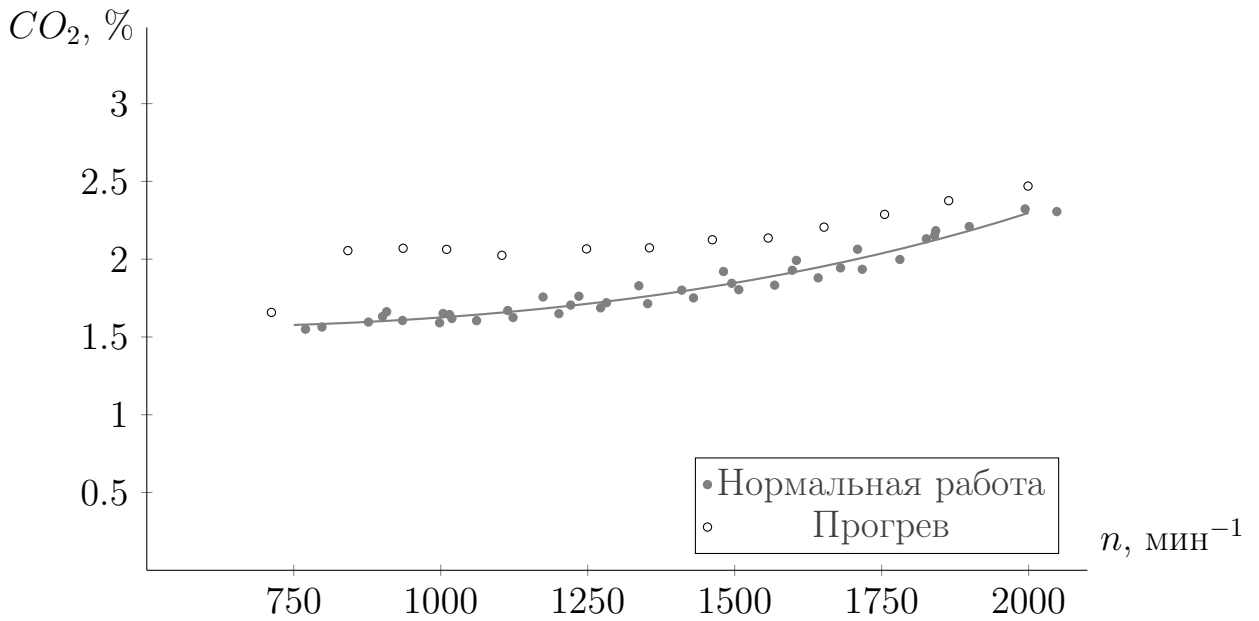
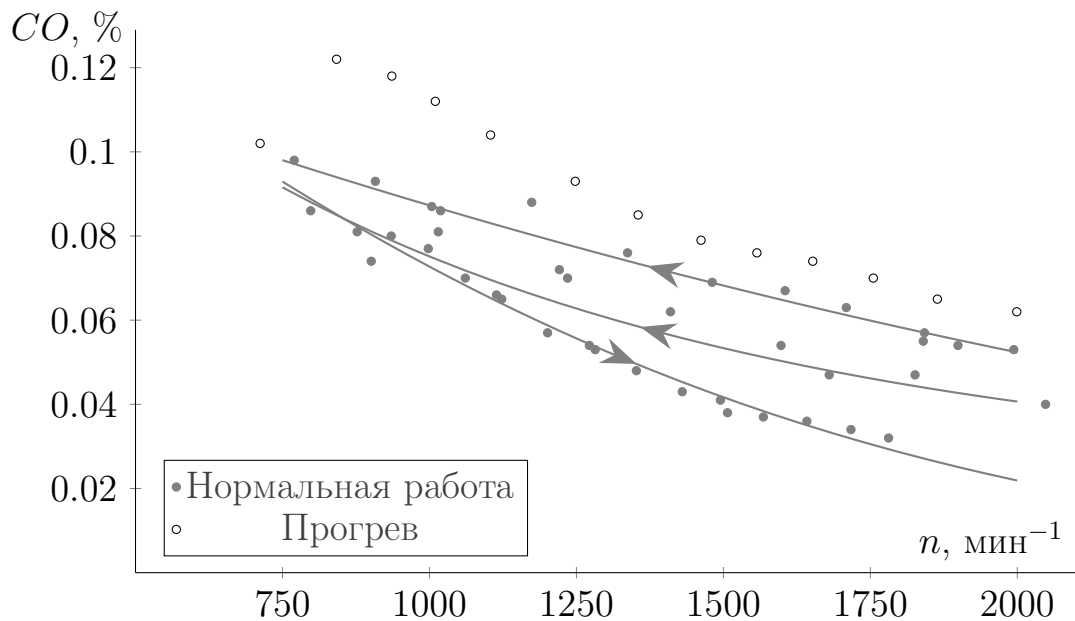


Рисунок 4.21 — Характеристика NO_x , Агромаш 85ТК

Рисунок 4.22 — Характеристика CO_2 , Агромаш 85ТК

Показатели CO для Д-145Т (рис. 4.23) плавно изменялись в ходе всего эксперимента. Вероятнее всего, это связано с тем, что наработка испытуемого дизеля крайне мала, и процессы приработки при обкатке ещё не успели пройти полностью.

Помимо того, изменение характеристик двигателя по мере его прогрева в целом является штатным процессом. В работе [77] показано, как температура

Рисунок 4.23 — Характеристика CO , Агромаш 85ТК

двигателя влияет на расход топлива на различных режимах холостого хода: по мере прогрева потребление топлива снижается.

В целом зависимость CO для Д-145Т 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.

4.5 Выводы

Резюмируя полученные результаты, выделим следующие основные положения:

1. Наиболее информативными показателями являются содержание NOx и CO . Концентрация CO_2 минимально изменяется при введении неисправностей.
2. Неисправности топливной аппаратуры, ведущие к увеличению подачи топлива, приводят к росту концентрации NOx при малых значениях n_d холостого хода приблизительно в 4 раза, и в 1.5 раза — при высоких n_d .
3. Дросселирование воздуха на впуске позволяет оценить состояние двигателя.
 - 3.1. Для менее изношенного дизеля показатели NOx при дросселировании снижаются, а у двигателя с большой наработкой — возрастают по мере роста n_d ; при этом характеристика для нового двигателя является убывающей, а для изношенного — восходящей.
 - 3.2. Концентрация CO , напротив, является возрастающей у нового двигателя против убывающей у изношенного. При этом дросселирование воздуха на впуске приводит к значительно большему увеличению показателей при высоких n_d , чем у изношенного двигателя.

По результатам выполнения экспериментальной работы опубликованы статьи [1; 2; 40].

5 ВОПРОСЫ ПРАКТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ РАЗРАБОТОК

5.1 Реализация исследованных методов

Для полноценного применения исследуемой методологии необходимо произвести синтез теоретического и практического материала, описанного в предыдущих главах, в единую концепцию, в рамках которой диагностика по характеристикам отработавших газов может быть интегрирована в процесс эксплуатации, ТО и ремонта сельскохозяйственных МЭС.

Прежде всего, резюмируя полученные экспериментальные данные, подчеркнём, что не все компоненты отработавших газов обладают диагностической информативностью. В силу того, что произвести измерение концентрации O_2 и CH не удалось вследствие неполной исправности оборудования, данные компоненты остаются под сомнением. Отметим, впрочем, что главным образом показатели CH применимы для бензиновых двигателей, а для дизельных, согласно выводам главы 4, следует задействовать анализ концентрации NOx и CO .

В связи с этим, было бы рациональнее воспользоваться газоанализаторами, изначально предназначенными для выявления этих двух компонентов. Однако, поиск в открытых источниках даёт понять, что, во-первых, газоанализаторы конкретных компонентов реализованы на другой основе и неприменимы для целей диагностики МЭС, а во-вторых, сравнимы по стоимости (каждый, а не суммарно) с использованным нами Инфракар-5М. Таким образом, без дополнительных разработок целесообразнее использовать серийные автомобильные газоанализаторы — главным критерием выбора является возможность конкретной модели анализировать содержание двух перечисленных компонентов.

В дальнейших рассуждениях будем исходить из общих характеристик модельного ряда газоанализаторов Инфракар. В первую очередь важны следующие показатели (выдержка из приложения А.1):

Предел допускаемого времени установления показаний для каналов CO , CH , CO_2 , сек	30
Предел допускаемого времени установления показаний для каналов O_2 , NOx , сек	60
Время прогрева при $20\text{ }^{\circ}C$, мин, не более	30

Питание газоанализатора, В	12DC / 220AC
Средняя наработка на отказ, ч	10000
Срок службы, лет	10
Потребляемая мощность, Вт, не более	40
Масса (НЕТТО), кг	8
Габариты (В×Ш×Д), мм	180 × 310 × 370

Ранее был сделан вывод о том, что задействовать диагностику при помощи газоанализатора следует на низших видах ТО (1, 2). Также представляется разумным при свободности газоанализатора задействовать его для тракторов, возвращающихся в хозяйство после выполнения работ. Такой промежуточный контроль благоприятно скажется на информированности об общем состоянии парка.

Анализ частоты диагностики тракторов по показателям ОГ будет произведён в разделе 5.2, сейчас будет более правильным рассмотреть конкретику организации рабочего места и процесса диагностирования.

В первую очередь установим тот факт, что работа с газоанализатором должна в приоритетном порядке производиться на открытом воздухе. Возможно его применение и в помещениях, но в таком случае к ним предъявляются повышенные требования по вентиляции и воздухообмену.

Во-первых, при расположении газоанализатора в помещении трактору необходимо изначально доехать своим ходом до рабочего места диагноста — при этом, очевидно, также выделяются выхлопные газы, которые необходимо улавливать системой вентиляции. Помимо того, практика показывает, что при работе двигателя в помещении возможно срабатывание системы пожарной сигнализации.

Во-вторых, подключение стационарной газоотводящей системы к выхлопной трубе (или трубам) требует пусть небольших, но затрат времени; также важным фактором является то, что в таком случае установка пробоотборника в выхлопную трубу крайне неудобна. Более того, при работе в таком режиме не гарантируется точность показаний прибора (впрочем, при применении только такого метода будет обеспечиваться принцип единства средств измерения, и подход к диагностике изменять не потребуется).

Таким образом, необходимо спроектировать рабочее место диагноста на открытом воздухе, которое отвечало бы требованиям производственной безопасности (не в последнюю очередь электро-), эргономики и комфорта.

5.1.1 Мобильное рабочее место диагноста

В первую очередь, необходимо рассмотреть **климатические условия**. Поскольку речь идёт о диагностике сельскохозяйственной техники — логично предположить, что диагностика МЭС после смены будет происходить в тёплое время года, а работа поста зимой стала бы скорее исключением.

По этой причине, главными факторами, от которых необходимо защитить работника и оборудование, являются солнце и дождь. Скорее всего, диагностику нет необходимости находиться возле стенда с газоанализатором в течение всей смены, но в те промежутки времени, когда стенд находится в работе, обеспечить комфортные условия для оператора важно.

Всё то же относится и к оборудованию. Вне зависимости от того, к какому источнику электроэнергии подключается газоанализатор ($=12\text{В}$ или $\sim 220\text{В}$), необходимо обеспечить его защиту от атмосферных осадков.

Далее рассмотрим **требования к эргономике**. Поскольку снятие характеристики состава ОГ требует некоторого времени, было бы правильным предусмотреть для оператора сиденье, с которого был бы обеспечен доступ к органам управления и индикации газоанализатора.

Поскольку срез выхлопной трубы на преобладающем большинстве моделей сельскохозяйственной техники находится на высоте порядка 2 м, необходимо предусмотреть лестницу для оператора. Наиболее рациональным её расположением в пространстве было бы поперёк продольной оси трактора, поскольку в таком варианте лестница может быть интегрирована в конструкцию самого стенда. В противном случае её пришлось бы выполнять в приставном варианте, что менее безопасно, к тому же далеко не на каждом тракторе есть элементы, которые могли бы выступить в роли опоры для приставной лестницы.

Упомянув лестницу, перейдём к **требованиям безопасности**. Хотя высота 2 м, казалось бы, невелика, но тем не менее, падение с неё может привести к серьёзным последствиям, особенно с учётом расположения стенда на твёрдой поверхности. Поэтому было бы правильным предусмотреть для оператора инструментальный пояс (или жилет) со страховочным карабином, подсоединяемым к лестнице. Подобный подход хоть и не является полноценной страховкой, но тем не менее позволяет минимизировать риски, связанные с работой на высоте.

Электробезопасность, помимо уже упомянутого навеса, включает в себя заземление стенда на случай аварийных режимов работы. Рациональнее всего

выполнить его в виде цепочки из нержавеющей стали, соприкасающейся несколькими звеньями (порядка 100...150 мм суммарно) с землёй. Использование именно нержавеющей стали обосновано тем, что большую часть времени стенд статичен, и на звеньях цепи, выполненной из обычной стали, неминуемо возникнет коррозия, нарушающая электрический контакт.

Для удобного перемещения стенда было бы рациональным снабдить его колёсами и примитивным сцепным устройством для транспортировки при помощи трактора. Сцепное устройство проще всего выполнить на базе разъёмных звеньев, присоединяемых к продольным тягам задней навески трактора. Для надёжной установки стенда в рабочее положение колёса должны иметь механизмы фиксации (как минимум два колеса, расположенных диагонально относительно друг друга).

Полезным будет предусмотреть наличие у стенда ящиков для инструментов и документации, а также отсека для аккумулятора и зарядного устройства для работы стенда в условиях отсутствия стационарного электропитания. Также следует предусмотреть место для хранения средств индивидуальной защиты: наушников, жаропрочных перчаток, защитных очков и страховочной системы.

Также в комплектацию стенда рационально добавить веерные наборы табличек со значениями ступеней n_d для каждой модели двигателя: при работающем двигателе речевая коммуникация тракториста и диагноста затруднительна.

С учётом перечисленных факторов был разработан эскизный проект стенда, показанный на рис. 5.1. Обшивка стенда условно показана прозрачной. Также на рисунке не показаны отсек для хранения вспомогательного инвентаря (в том числе средств индивидуальной защиты), который может быть размещён в левой (относительно иллюстрации) части стенда, и сцепное устройство для транспортировки, размещение которого может варьироваться в зависимости от конкретики конструктивного исполнения стенда.

Обшивка конструкции может быть выполнена либо листовыми материалами (к примеру, сотовый поликарбонат) при условии их непрозрачности, либо в виде тента из непромокаемой ткани.

Электрооборудование размещается таким образом, чтобы минимизировать риски соприкосновения кабелей с элементами конструкции и опорной поверхностью.

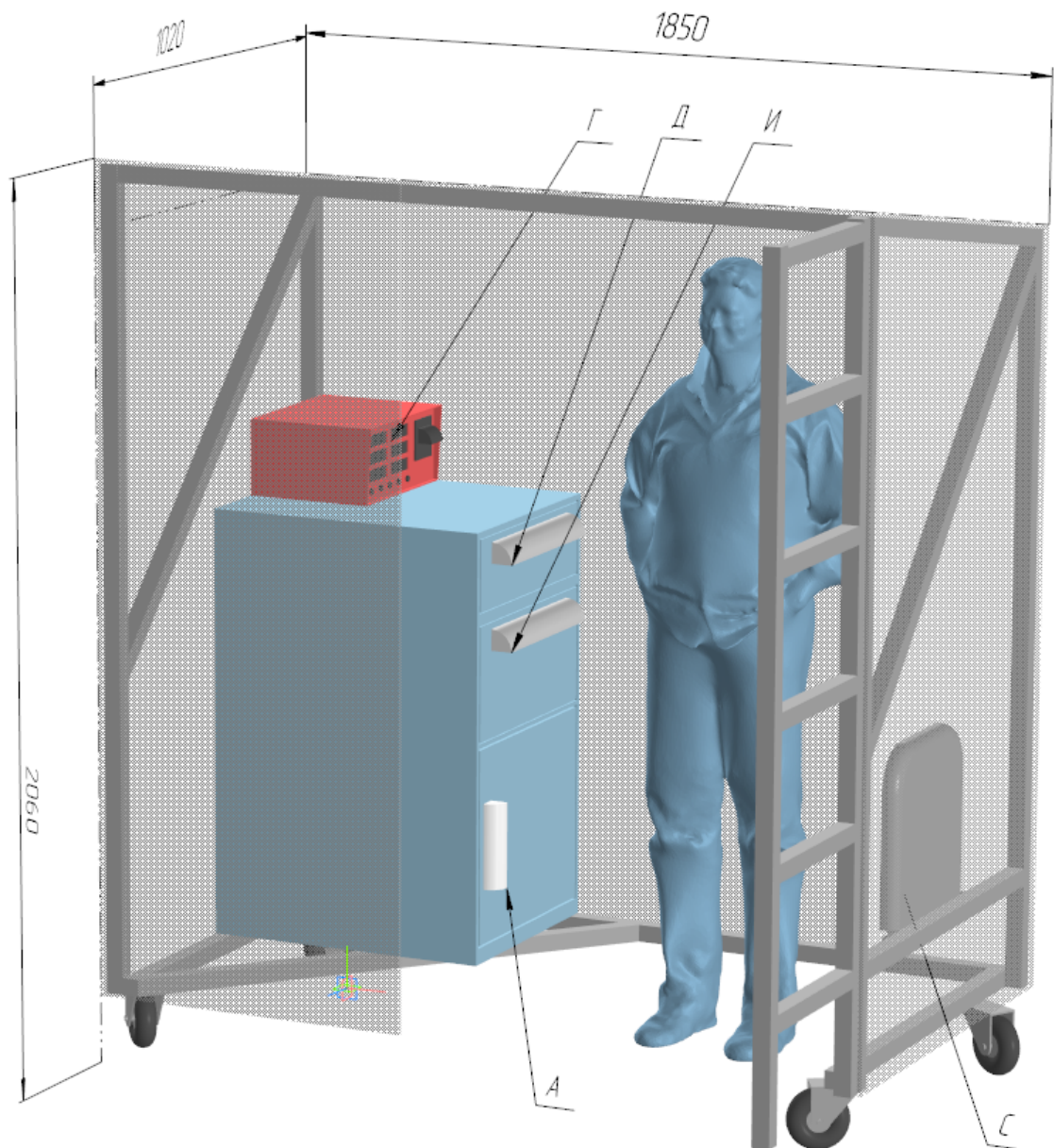


Рисунок 5.1 — Мобильное рабочее место диагноста

Г – газоанализатор, Д – ящик для документации, И – инструментальный ящик,
А – аккумуляторный отсек, С – сиденье

5.1.2 Технология диагностики по составу ОГ с применением стенда

5.1.2.1 Снятие стенда с консервации

1. На площадке хранения восстановить подвижность стенда, переместить его на освещённое место на открытом воздухе.
2. Визуально убедиться в целостности обшивки по отсутствию видимых изнутри щелей.

3. Переместить стенд по возможности ближе к зданию, в котором хранятся газоанализатор и аккумуляторы.
4. Установить газоанализатор на предназначенное для него место, подсоединить шланги. Трубки сброса конденсата и отвода газов расположить таким образом, чтобы их свободные концы выступали за нижний пояс рамы стенда.
5. Установить аккумулятор. При транспортировке аккумулятора избегать чрезмерной весовой нагрузки, при необходимости — воспользоваться тележкой. При помощи тестера убедившись в отсутствии короткого замыкания низковольтной цепи и утечек тока на раму, присоединить клеммы.
6. Аналогичным образом проверить схему переменного тока. Удостовериться, что заземляющая цепочка находится в контакте с опорной поверхностью. Подключить источник внешнего питания.
7. Включив зарядное устройство, установить ток, численно равный ёмкости аккумулятора, делённой на 10. Наблюдать за показателями тока в течение 5 мин. При возникновении аварийных режимов прекратить зарядку и отправить аккумулятор на диагностику.
8. Подключить высоковольтный вход питания газоанализатора, включить прибор, ожидать прогрева блока датчиков (10 минут).
9. В процессе прогрева газоанализатора укомплектовать стенд средствами индивидуальной защиты, бумагой и канцелярскими принадлежностями, универсальным слесарным инструментом.
10. После прогрева газоанализатора включить его компрессор и наблюдать за показаниями в течение 15...20 минут, раз в две минуты записывать их значения по всем компонентам.
11. По полученным данным убедиться в стабильности показаний, выключить прибор и отключить его высоковольтный вход.
12. Подключить газоанализатор к низковольтной цепи, дождаться его прогрева, включить компрессор и в течение 2 мин убедиться в стабильности показаний прибора. Выключить газоанализатор и отключить вход питания.

13. Проверить режим заряда аккумулятора. Зарядный ток исправного аккумулятора за время выполнения предыдущих манипуляций должен уменьшиться по сравнению с начальным.
14. При исправности аккумулятора продолжить его зарядку, не изменяя положение регулировочной ручки зарядного устройства.
15. После зарядки аккумулятора стенд готов к работе. Хранить его между сменами рекомендуется в сухом помещении, допускается — под навесом. При повышенной влажности воздуха крайне рекомендуется переместить стенд в сухое помещение.

5.1.2.2 Подготовка стенда к работе

1. Определить, какой источник электроэнергии будет использоваться, подключить соответствующий вход питания газоанализатора.
2. Переместить стенд на рабочую площадку; убедиться, что заземляющая цепочка находится в контакте с опорной поверхностью.
3. Застопорить колёса стенда. Включить питание и газоанализатор.
4. Трубку пробоотборника не подключать. Дождаться прогрева блока датчиков газоанализатора.
5. В процессе прогрева прибора убедиться в наличии на стенде средств индивидуальной защиты, бумаги и канцелярских принадлежностей, инструмента.
6. После прогрева газоанализатора стенд готов к работе.

5.1.2.3 Выполнение измерений

1. Расположить диагностируемое МЭС так, чтобы срез выхлопной трубы находился возле лестницы стенда.
2. Подключить к газоанализатору трубку пробоотборника.
3. Надеть СИЗ – перчатки, наушники и очки – и пристегнуть страховочный карабин к жилету или поясу.

4. Поднявшись на лестницу и зафиксировав на ней страховочный карабин, надеть хомут соответствующего размера на выхлопную трубу и, придерживая его одной рукой, другой установить пробоотборник.
5. Затянуть хомут и убедиться в надёжности крепления (пробоотборник подвержен разбалтыванию от вибрации).
6. Отстегнув страховочный карабин от лестницы, спуститься и присоединить трубку пробоотборника к газоанализатору.
7. При помощи веерной таблички указать водителю МЭС требуемую n_d . После сигнала о выполнении следить за показаниями газоанализатора, и по их стабилизации зафиксировать значения при помощи порта RS-232, печатающего устройства или вручную.
8. Повторить предыдущий пункт требуемое количество раз, последовательно повышая n_d до максимальной предписанной, и затем понижая до минимальной.
9. Соблюдая предписанные ранее требования безопасности, подняться на лестницу и демонтировать пробоотборник с хомутом.
10. Только после спуска с лестницы подать водителю сигнал об окончании измерений.
11. Отсоединить от газоанализатора трубку пробоотборника.

5.1.2.4 Завершение рабочей смены

1. Дать компрессору газоанализатора поработать 5 минут при отсоединённом пробоотборнике, чтобы удалить остатки газов из системы.
2. Отключить газоанализатор, убрать инструменты, принадлежности и СИЗ.
3. При использовании источника внешнего питания отключить его.
4. По возможности, расстопорив колёса стенда, переместить его под навес или в помещение.
5. Если для работы использовался аккумулятор, подключить внешнее питание и настроить зарядный ток.

5.1.2.5 Постановка стенда на хранение

1. Убедиться, что внешнее питание стенда отключено, по возможности переместить его ближе к зданию, где хранится оборудование.
2. Отключить клеммы аккумулятора. Переместить аккумулятор на хранение.
3. Отключив трубки от газоанализатора, свернуть их и упаковать.
4. Переместить газоанализатор на склад.
5. Оставшиеся на стенде инструмент и принадлежности также распределить по местам хранения.
6. Переместить стенд под навес и зафиксировать его на месте, подложив под раму деревянные бруски или заблокировав колёса (рекомендуется первый вариант)

5.2 Экономический эффект

Для расчёта экономического эффекта прежде всего следует определить исходные данные.

Трудоёмкость элементов, из которых складывается длительность смены оператора газоаналитического стенда: подготовка к работе, выполнение измерений, завершение работы.

В подготовку к работе входят: установка стенда на рабочую площадку, подключение питания и прогрев газоанализатора, в течение которого производятся остальные необходимые операции. Суммарное время определим как $t_s = 10 + 2 \cdot (5...10) = 20...30$ минут.

Снятие характеристики для каждого МЭС складывается из установки-демонтажа пробоотборника и непосредственно измерений. Ускоренная методика, описанная выше, позволяет произвести измерение за 5 минут. Трудоёмкость монтажно-демонтажных работ зависит от труднодоступности среза выхлопной трубы и может быть оценена как 2...5 минут для монтажа и 1...3 минуты для демонтажа. Суммарные затраты времени на обслуживание одного МЭС: $t_m = 5 + 2...5 + 1...3 = 8...13$ минут.

Завершение рабочей смены менее трудоёмко, для него требуется порядка $t_e = 5...10$ минут.

Также необходимо учитывать, что каждые полчаса газоанализатор производит перекалибровку, занимающую порядка минуты (итого доля времени на перекалибровку равна $1/30$).

Для вычислений с диапазонами был написан модуль `aerange` на Python, приведённый в приложении Б.6.

Модуль выстроен таким образом, что его интеграция в программный код происходит без дополнительных функций. Единственным на текущий момент исключением является создание переменной диапазона, выглядящее следующим образом: `d = aerange.Range(1, 47.5)`. Данный программный код соответствует созданию переменной `d`, хранящей диапазон от 1 до 47,5.

При помощи т.н. "магических методов", являющихся отличительной особенностью Python¹, можно указать для создаваемого объекта его реакцию на выполнение базовых взаимодействий: сложение, вычитание, умножение и т.д., трансформация в строку, логические операции. Таким образом, вместо гипотетического `d3 = aerange.add(d1, d2)` достаточно выполнить `d3 = d1 + d2`, что в значительной мере упрощает работу.

Чистое время t_p , доступное для измерений, при смене $t_{см} = 8$ ч равно:

$$t_p = (t_{см} - t_s - t_e) \cdot (1 - 1/30) = 7,09...7,33 \text{ ч}$$

Также учтём потери времени 10%, связанные с технологическими перерывами и непредвиденными обстоятельствами. С учётом этой корректировки чистое время на выполнение технологических операций составляет $t_o = 6,38...6,6$ ч.

Разделив данное значение на длительность обслуживания одного трактора, получаем **количество измерений за смену** $N_{см} = 29,5...49,5$.

Такой показатель достигается в том случае, когда диагностический стенд непрерывно работает в течение всей смены. Вероятнее всего, реальные условия приведут к сокращению этого времени, в первую очередь потому, что диагностированию главным образом подвергаются МЭС, возвращающиеся в хозяйство

¹В C++ имеется похожий функционал, но его применение гораздо менее удобно

после работы, а остальное время стенд и его оператор задействуются только для диагностирования техники, вышедшей с мероприятий технического сервиса.

С учётом этого, задействуем альтернативную величину t_0 , равную 2 ч. В таком случае $N_{\text{см}} = 9,23...15$. Отметим, что фактическое время работы диагноста составит порядка 2,5 ч, что связано с дополнительными затратами времени на подготовку и выключение диагностического стенда.

Вычисленные диапазоны являются альтернативой равномерного распределения вероятности, которое в реальных условиях редко достижимо: чаще всего реальным процессам соответствуют распределения Эрланга, экспоненциальное, нормальное (Гаусса). Первые два варианта соответствуют величинам, математическое ожидание μ которых принимает положительное значение, относительно близкое к нулю; в то время как μ для нормального распределения может быть любым.

По этой причине задействуем нормальное распределение. Вторым его параметром, помимо μ , является среднеквадратическое отклонение σ . Негласное "правило трёх сигм" устанавливает максимальное вероятное отклонение от μ , равное $\pm 3 \cdot \sigma$, а значения, выходящие за пределы данного диапазона, маловероятны.

Принимая это во внимание, можно утверждать, что озвученным выше $N_{\text{см1}}$ и $N_{\text{см2}}$ соответствуют распределения Гаусса: $\mu_1 = 39,5$; $\sigma_1 = 3,33$ (8,43%) и $\mu_2 = 12,1$; $\sigma_2 = 0,962$ (7,95%). На рис. 5.2 описанные распределения показаны наглядно в виде функций плотности.

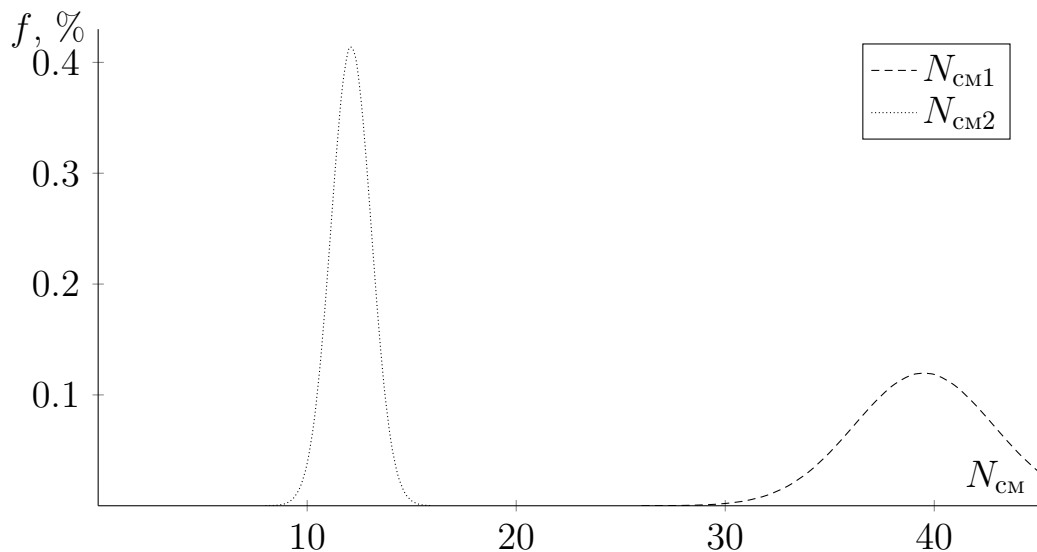


Рисунок 5.2 — Количество измерений за смену

Итоговым результатом приведённых вычислений является количество измерений за смену $N_{\text{см}} = 39,5$ при непрерывной работе и $N_{\text{см}} = 12,1$ при диагностике тракторов, возвращающихся с работы. Первый вариант в большей степени характерен для ремонтных, второй — для эксплуатирующих предприятий, с учётом чего и будем производить дальнейшие вычисления.

В предыдущих главах был сделан вывод о том, что диагностика при помощи газоанализатора позволяет выявить: а) повышенный расход топлива даже одной форсункой; б) ориентировочный уровень действительного износа двигателя; в) нарушение режимов работы дизеля, способное привести к неисправности. Опираясь на это, сформулируем основные позиции **экономии денежных средств** при введении предлагаемой технологии.

- Повышение показателей NOx свидетельствует о некорректной работе форсунки, влекущей увеличение расхода топлива. Разница может принимать различные значения; в своих рассуждениях будем ориентироваться на её постепенный рост в ходе эксплуатации и уменьшение при проведении сервисных мероприятий.
- Уменьшение показателей NOx и повышение для CO при дросселировании воздуха на впуске свидетельствуют об изнашивании двигателя. Поскольку установить прямую корреляцию здесь крайне затруднительно, данный фактор представим как прибавочную стоимость к запасным частям для каждого текущего ремонта в размере 0,25% от стоимости двигателя.
- Неисправности, вызванные нарушением режимов работы двигателя, определим как 5% риск повышения затрат на текущий ремонт в размере 2.5% от стоимости двигателя.

Данные факторы касаются в первую очередь эксплуатирующих предприятий. Выгода для ремонтных главным образом формируется за счёт снижения риска некачественного ремонта. Как и в случае со вторым пунктом списка выше, выполнение расчётов здесь весьма затруднительно и требует большого объёма актуальных статистических данных, поэтому примем значение экономии средств (с учётом вероятностных показателей) равным 0,02% от стоимости двигателя для текущих и 0,04% для капитальных ремонтов.

Более подробно рассмотрим фактор увеличения расхода топлива. В диссертации научного консультанта, В. В. Егорова, приведён алгоритм расчёта так

называемых прогрессирующих топливных издержек, графическое изображение которых показано на рис. 5.3.

Абстрактное значение расхода топлива q меняется в течение времени, увеличиваясь относительно номинального значений $q_{\text{ном}}$ с условно постоянным темпом. График q_0 показывает настройку топливной системы только при ТР, q_0 — при каждом ТО-2 и более крупных мероприятиях. Разница между q_0 и q_1 , соответственно, и обеспечивает экономию топлива.

Для определения расхода топлива примем, что его рост, связанный с неисправностями топливной аппаратуры, равен 2,5 % к каждому ТР, а при прохождении настройки этот фактор сводится к нулю. В свою очередь, долю прироста расхода топлива вследствие эксплуатационного износа двигателя примем равной 0,5% к каждому ТР, а обнуление данного фактора происходит только при капитальном ремонте.

Отметим, что подобные значения было бы достаточно сложно зафиксировать при помощи расходомера, но в масштабе всего парка тракторов даже 3% перерасхода топлива способны привести к повышению издержек, измеряемому десятками тысяч рублей в месяц.

Определим численные значения перерасхода топлива, ориентируясь на "классические" марки тракторов, для которых известны нормы выработки и расхода топлива на полевые механизированные работы [86]: Т-40, МТЗ-82, ДТ-75М, Т-150К, К-744Р1. Пусть многие модели из этого списка неактуальны, они, тем не менее, способны отразить приблизительный уровень расхода топлива современным машинно-тракторным парком.

Ориентируясь на данный справочник, определим сменный расход топлива для каждой из перечисленных марок тракторов на несколько видов полевых

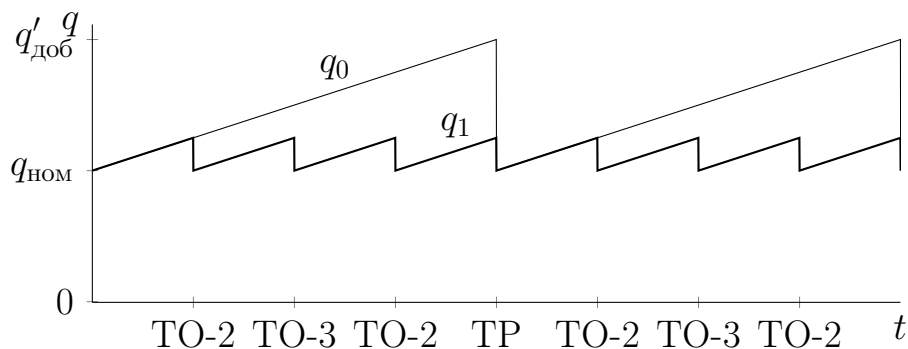


Рисунок 5.3 — Сравнение топливных издержек при различных стратегиях ТОР
Концепция и иллюстрация В. В. Егорова

работ. Для этого, воспользовавшись усреднёнными нормами, частично представленными в табл. 5.2, умножим сменную выработку $W_{\text{см}}$ (га/см; т/см) на удельный расход топлива g (л/га; л/т), получив сменный расход топлива G , л/см.

Результаты предварительного расчёта по приведённой таблице и иным данным из Норм показаны в таблице 5.3 и на рис. 5.4.

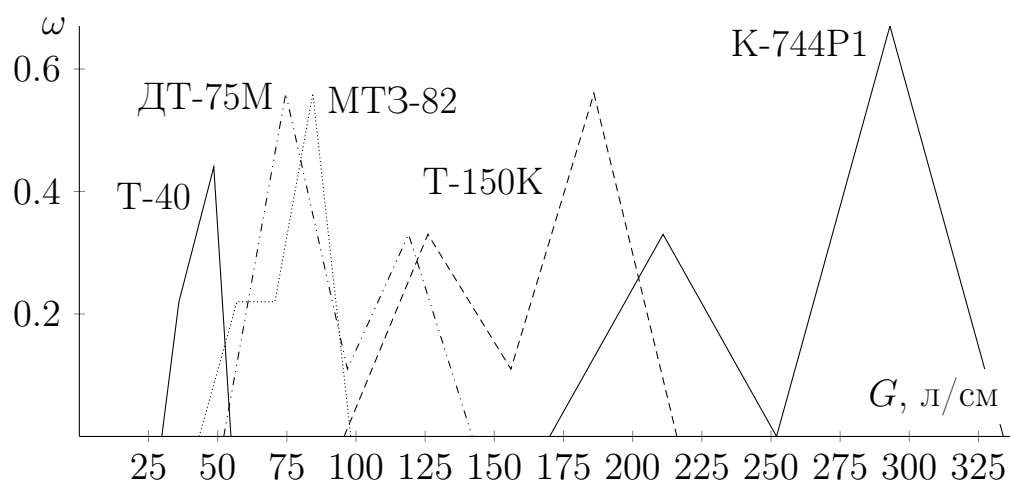
Таблица 5.2

К расчёту сменного расхода топлива

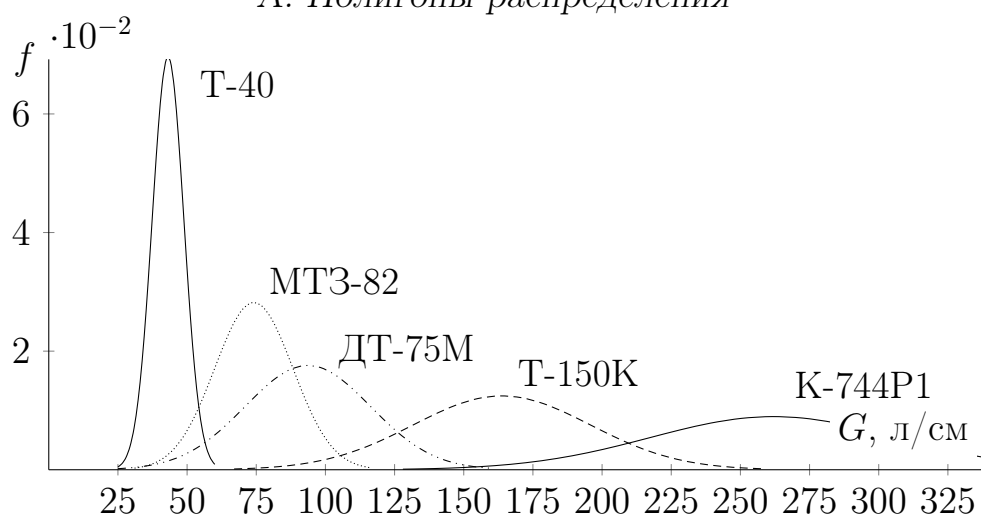
Операция	ед. изм.	Трактор	С/х машина; а/м; комбайн	$W_{\text{см}}$	g , л/га (л/т)	G , л/см
Боронование по всходам	га	ДТ-75М	21·БЗСС-1,0	54	1,3	70,2
		МТЗ-82	15·БЗСС-1,0	40	1,8	72
		Т-40АМ	9·ЗБЗС-1,0	24,5	1,9	46,55
Вспашка	га	К-744Р1	ПТК-9-35	17,7	17,2	304,4
		Т-150К	ПЛП-6-35	13,2	15,2	200,6
		ДТ-75М	ПП-6-35	8	14,2	113,6
		МТЗ-82	ПЛН-3-35	4,8	19	91,2
Культивация	га	К-744Р1	4·КПС-4	76	3	228
		Т-150К	3·КПС-4	65	3	195
		ДТ-75М	3·КПС-4	45	2,9	130,5
		МТЗ-82	КПС-4	23	3,5	80,5
Междурядная обработка картофеля первая -//- вторая -//- последующие	га	МТЗ-82	КОР-4,2	15	5,2	78
		Т-70С	КРН-4,2	15	5,5	
		Т-40АМ	КОН-2,8ПМ	10,2	4,7	47,94
		МТЗ-82	КОР-4,2	14	4	56
		Т-70С	КРН-4,2	14	4,3	
		Т-40АМ	КОН-2,8ПМ	9,5	4,2	39,9
		МТЗ-82	КОН-2,8ПМ	13	5,3	68,9
		Т-40АМ	КОН-2,8ПМ	8,7	4,7	40,89
Посадка картофеля	га	ДТ-75М	КСМ-6	9,9	6,4	63,36
		МТЗ-82		10	5,1	50,1
Посев зерновых и люпина	га	К-744Р1	5·СЗУ-3,6	65	3,1	201,5
		Т-150К	4·СЗУ-3,6	52	2,8	145,6
		ДТ-75М		42	2	84
		МТЗ-82	2·СЗУ-3,6	33	2,4	79,2
Прикатывание	га	Т-150К	(3+2)·ЗККШ-6	122,3	1,1	134,5
		ДТ-75М	3·ЗККШ-6	85,3	1,2	102,4
		МТЗ-80	(2+1)·ЗККШ-6	76	1,2	91,2
		Т-40А	2·ЗККШ-6	47	1,1	51,7

Вычисленные нормы расхода топлива за смену, л

	ДТ-75М	МТЗ-82	Т-150К	К-744Р1	Т-40
	70,2	72	200,6	304,4	46,55
	113,6	91,2	195	228	47,94
	130,5	80,5	145,6	201,5	39,9
	63,36	78	134,5	287,8	40,89
	84	56	186	276	51,7
	84	68,9	187,2	313,9	32,9
	102,4	50,1	176,4	282,8	38,25
	80	79,2	137,75	190,4	43,5
	114,7	91,2	110,7	273	46,4
μ	93,6	74,1	164	262	43,1
σ	22,7	14,2	32	44,5	5,73



А. Полигоны распределения



Б. Функции плотности

Рисунок 5.4 — Вероятностное представление сменного расхода топлива

Далее будем оперировать полученными данными с учётом следующего усреднённого состава МТП: ДТ-75М 22,2%; МТЗ-82 37%; Т-150К 18,5%; К-744Р1 14,8%; Т-40 7,4%.

Ориентируясь на данные табл. 1.2 и 5.3, можно определить, что наработка в сменах между ТО-2 составляет, дней: ДТ-75М: 62; МТЗ-82: 57; Т-150К: 61; К-744Р1: 67; Т-40: 87. Используя указанные выше весовые коэффициенты, получаем среднее значение $62,45 \rightarrow 63$ смены. Подобное упрощение позволяет также усреднить по аналогичной схеме и расход топлива; полученное значение — 120,6 л/см на один трактор.

Итого, с учётом перечисленного выше, а также коэффициента использования календарного времени² $\alpha_K = 0,5$ и коэффициента технической готовности $K_{ТГ} = 0,84$, получаем годовой расход топлива в размере 18,49 т, а также:

	Наработка		Количество
	клд. дней	л топлива	в клд. год
ТО-2	148,7	7532	2,45
ТО-3	297,4	15194	1,23
ТР	594,8	30389	0,614
КР	1189,6	60778	0,307

Опираясь на представленные данные, вычислим темп роста расхода топлива. Для компонента, связанного с неисправностями топливной аппаратуры, получаем $\frac{2,5\%}{594,8 \text{ клд.}} = 0,0042 \frac{\%}{\text{клд.}}$. Полученная единица измерения недостаточно наглядна, поэтому для адекватного восприятия проценты необходимо домножить на номинальный расход топлива. Итоговым результатом является прирост 0,00507 литров за календарный день.

По аналогичному алгоритму был вычислен прирост расхода топлива вследствие износа двигателя: 0,00101 л/клд.

Приведённые величины кажутся абсурдно малыми, но если провести простейшие расчёты (в первом приближении пренебрегая эффектом от проведения сервисных мероприятий), получаем (по формуле площади треугольника):

$$(0,0042 + 0,00084) \cdot 365 \cdot \frac{365}{2} = 335,7 \text{ л}$$

²Здесь также учитывается простой в зимний период

При стоимости дизельного топлива 72 Р/л получаем дополнительные издержки в размере 24170 Р в год на один трактор. Данное значение весьма наглядно, однако доведём расчёты до конца, чтобы учесть все описанные выше факторы.

Математическое моделирование расхода топлива произведено при помощи Python (файл в приложении не приведён, поскольку имеет излишний размер). Так, на рис. 5.5 показано сравнение величин расхода топлива при базовой (пунктирная линия) и предлагаемой технологиях (в двух её вариациях соответственно подписям). На данных графиках показан временной промежуток длиной 5 лет, а смещение "фаз" сервисных мероприятий (при постоянной периодичности) выполняется самим расчётным скриптом.

Получив значения расхода топлива, сравним интегральные кривые. Приводить их на иллюстрациях нет смысла, поскольку на графическом отображении разница заметна не будет. Впрочем, проанализируем численные данные.

Помимо прочего, при относительно долгосрочном планировании необходимо учесть инфляцию. Для упрощения расчётов воспользуемся свойствами геометрической прогрессии:

$$b_n = b_1 \cdot q^{n-1} \Rightarrow q^{n-1} = \frac{b_n}{b_1} \Rightarrow q = \sqrt[n-1]{\frac{b_n}{b_1}}$$

Таким образом, при годовой инфляции 5% получаем дневной коэффициент, равный $1 + 134.1 \cdot 10^{-6}$. При расчётах будем пользоваться следующим алгоритмом:

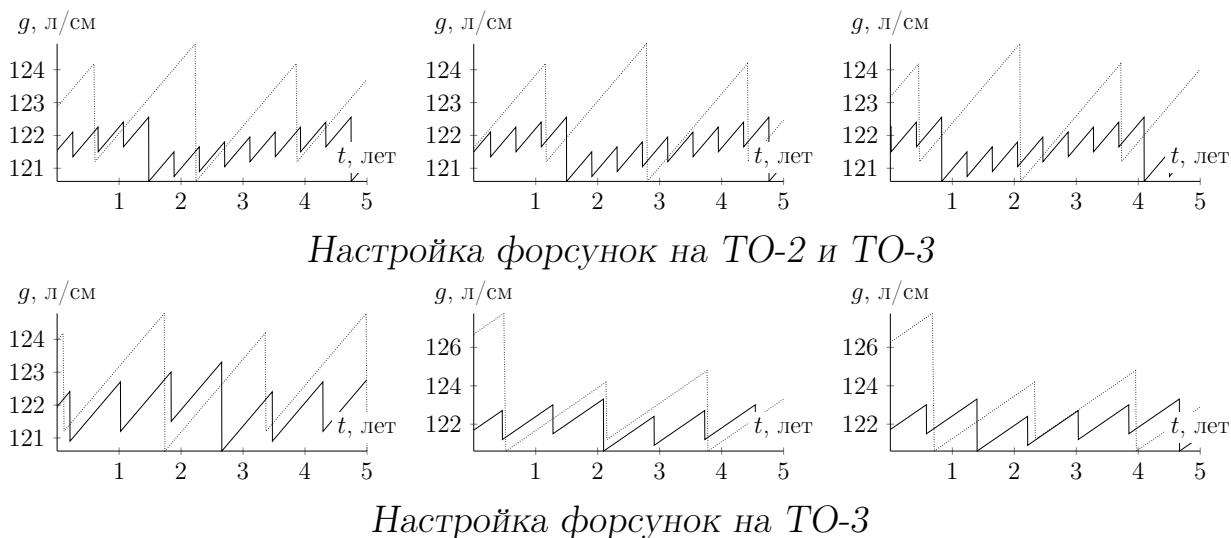


Рисунок 5.5 — Полученные графики расхода топлива

```

K_INF = 1,0001341
infl = 1
for day in range(DAYS_TOTAL):
    infl *= K_INF

```

Проверочный расчёт даёт годовую инфляцию 0,505%, что приемлемо по точности.

При начальной цене дизельного топлива 72 Р/л получаем годовые топливные издержки на один трактор:

- при базовой технологии: 1 388 093Р с $\sigma = 5304$ Р;
- при настройке на ТО-2 и ТО-3: 1 376 686Р с $\sigma = 2668$ Р, т.е. среднегодовая экономия на один трактор равна 11 407Р;
- при настройке только на ТО-3: 1 379 584Р с $\sigma = 2665$ Р, $\langle \dots \rangle$ экономия равна 8508Р.

Приведённые числа невелики, однако, не стоит забывать о том, что расчёт произведён только для одного трактора. При парке 20 тракторов получаем годовую экономию на топливных издержках в размере 260 350 Р и 175 030 Р соответственно, что при стоимости диагностического стенда в сборе с газоанализатором $I = 150000$ Р обеспечивает срок окупаемости от 7 до 10,5 месяцев.

Теперь определим экономию средств за счёт снижения рисков повышения объёма ремонтов с учётом процентных соотношений, приведённых на стр. 109. Для этой цели в открытых источниках были найдены примерные стоимости двигателей задействованных тракторов (табл. 5.4). Для дизелей, производство которых прекращено, приведены аналоги.

С учётом полученных ранее весовых коэффициентов определена стоимость двигателя усреднённого трактора: 679 500 Р. Таким образом, снижение рисков при каждом ТР даёт усреднённую экономию $0,002 \cdot 679500 = 1359$ Р, а то же для КР равно 2718 Р.

Таблица 5.4

Стоимость тракторных двигателей

Трактор	Двигатель	Аналог	Стоимость, тыс. Р
Т-40	Д-144	Deutz F4L912	480
МТЗ-82	Д-240	Д-243	409
ДТ-75М	А-41	Д-260.2	847,7
Т-150К	СМД-62	ЯМЗ-236ДЗ	843,6
К-744Р1	ЯМЗ-238НД5		1003

По аналогии с предыдущими вычислениями, примем, что при снижении частоты диагностирования снижается и получаемый эффект.

Последним нерассмотренным фактором является заработная плата диагноста. Не углубляясь в излишние подробности, примем, что при более интенсивной диагностике (2,5 ч за смену) доля заработной платы, приходящаяся на диагностирование, составляет 1250 Р, при менее интенсивной (1,5 ч) — 625Р.

График зависимости годовой экономии от списочного количества тракторов показан на рис. 5.6.

Таким образом, расчёты показывают, что срок окупаемости, равный 1 году, соответствует величине парка 33...34 трактора.

Решение обратной задачи показано на рис. 5.7, из которого видно, что описываемая технология актуальна для эксплуатирующих предприятий с парком 30 и более тракторов, причём увеличение парка ведёт к ускорению окупаемости инновации.

Следует отметить, что показанные данные получены из расчёта заведомо сниженной экономии топлива и заведомо завышенных трудозатрат, поэтому при реальном применении экономический эффект способен проявиться в более полной мере. В том числе, на предприятиях с парком тракторов меньшим, чем рекомендуемый, возможно проведение диагностики не ежедневно, а в определённые дни, что снизит трудозатраты в пересчёте на один трактор.

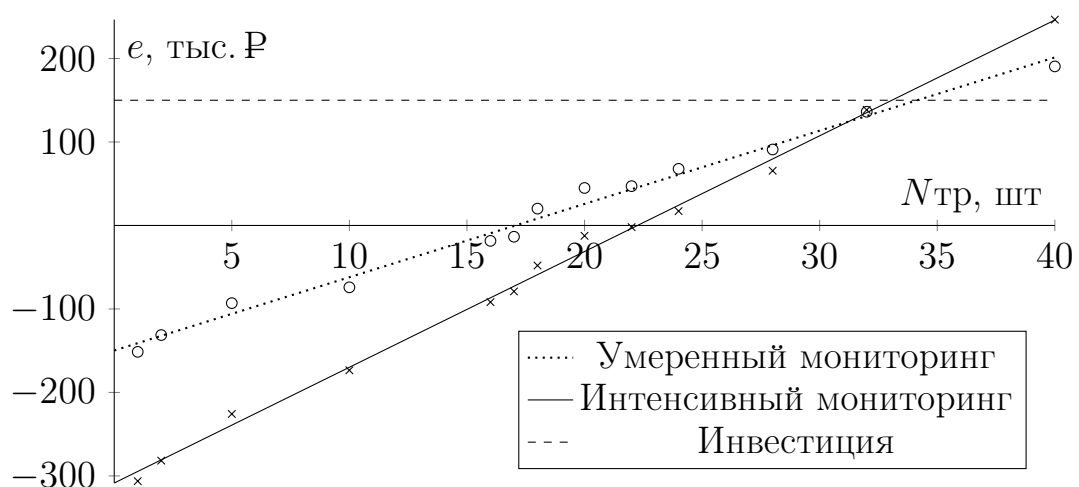


Рисунок 5.6 — Годовая экономия средств в зависимости от числа тракторов

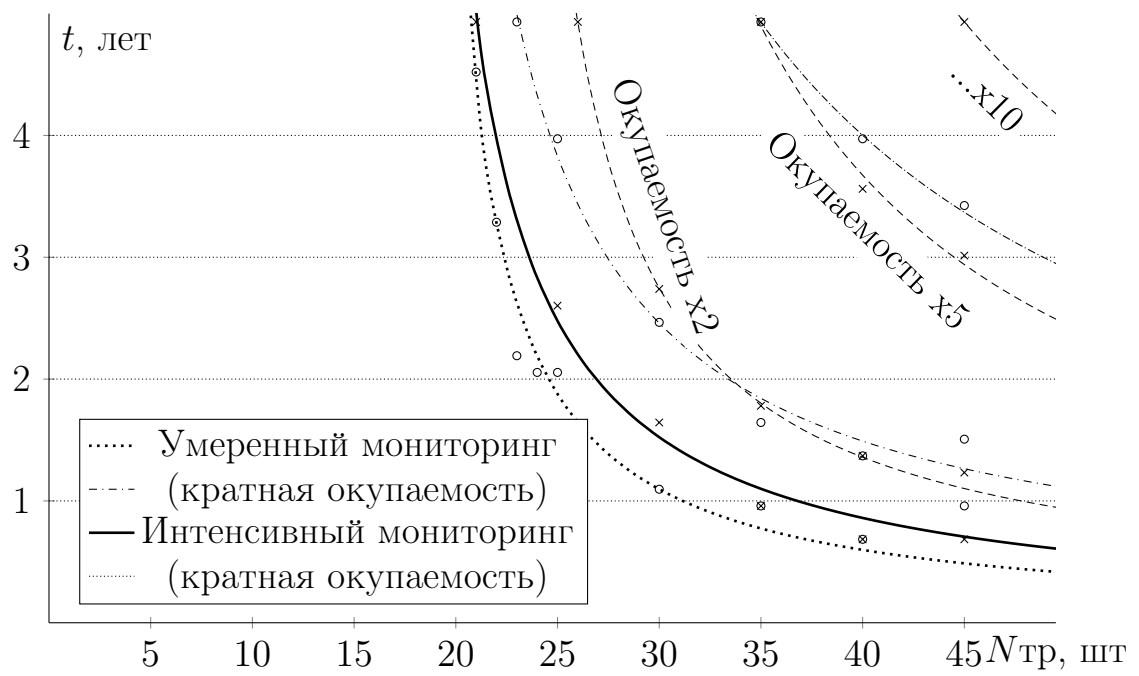


Рисунок 5.7 — Срок окупаемости в зависимости от числа тракторов

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках первой главы диссертации был рассмотрен научный задел выбранного направления, сформулированы основные подходы к использованию анализа состава отработавших газов дизельного двигателя в качестве диагностического показателя. Поставлены следующие задачи исследования:

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.

Вторая глава диссертации отражает разработку математической модели выбросов абстрактного компонента отработавших газов, и на примере этой модели показано, что наиболее удобным и информативным методом диагностирования ДВС по составу отработавших газов является измерение характеристик зависимостей состава ОГ от частоты вращения коленчатого вала.

В третьей главе диссертации изложена методология проведения экспериментальных исследований.

В четвёртой главе показаны результаты экспериментальной работы, описанные ниже.

В пятой главе представлены результаты конструирования мобильного рабочего места для диагностирования сельскохозяйственной техники по составу отработавших газов, а также определён экономический эффект предлагаемой технологии.

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 двигателям. 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 мм^2 .

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 ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ал-Жавхар, А.Е.М. Выявление неисправности топливной аппаратуры тракторного дизеля путём анализа выхлопных газов / А.Е.М. Ал-Жавхар; В.А. Луханин; В.В. Егоров // Международный технический журнал. — 2025. — 3(97). — С. 118—127.
2. Ал-Жавхар, А.Е.М. Получение и анализ характеристик состава отработавших газов дизеля на различных режимах холостого хода / А.Е.М. Ал-Жавхар; Н.А. Майстренко; В.В. Егоров // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. — 2025. — Т. 72, 3(60). — С. 89—96.
3. Аладышкин, В.Я. Аладышкин, В. Я., Чичурин, А. Г. Судовые двигатели внутреннего сгорания. Анализ газов при испытаниях судовых дизелей и котлоагрегатов: метод. пособие для студ. мех., электромех., кораблестроит. и судовод. специальностей. — Изд-во ФБОУ ВПО «ВГАВТ», 2013.
4. Андриян, К. Э. Анализ и планирование технического обслуживания и ремонта сложного объекта на основе его функционального состояния / К. Э. Андриян; Д. А. Курсин // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. — 2018. — № 8. — С. 11.
5. Атрощенко, В. А. К вопросу диагностики двигателя ДЭС по параметрам частотных характеристик масляного очистителя / В. А. Атрощенко // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление. — 2010. — № 6. — С. 96—100.
6. Бабошин, А. А. Оценка технического состояния двигателей внутреннего сгорания по току, потребляемому стартером при прокрутке двигателя / А. А. Бабошин; А. С. Косарев; В. С. Малышев // Вестник МГТУ. — 2013. — № 1. — С. 33—39.
7. Балакин, В. А. Тепловыделение и теплоперенос в зоне фрикционного контакта / В. А. Балакин; Ю. В. Лысенко // Вестник ГГТУ им. П. О. Сухого. — 2001. — № 1.
8. Баубеков, Е. Е. Оптимизация технического обслуживания и ремонта как фактор повышения надёжности автотранспорта / Е. Е. Баубеков // Endless Light in Science. — 2025. — № 30.

9. Бегматов, Б. Я. Диагностика экологической безопасности двигателя внутреннего сгорания / Б. Я. Бегматов; Р. К.-У. Фозилов // Academic research in educational sciences. — 2022. — № 2. — С. 425—433.
10. Бегунков, Т. Н. Анализ систем удаления оксидов азота (NOx) из отработавших газов дизельных двигателей / Т. Н. Бегунков // Вестник РГАТУ. — 2021. — № 2.
11. Безюков, О. К. Диагностирование технического состояния судовых дизелей по инфракрасному излучению их наружных поверхностей / О. К. Безюков; А. А. Кардаков; С. В. Шаршавин // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2010. — № 3. — С. 160—164.
12. Белов, С. А. Переносной стенд для проведения технического диагностирования топливной системы дизельных двигателей в полевых условиях / С. А. Белов // Вестник науки. — 2024. — 5 (74). — С. 551—557.
13. Белоусов, И. В. Обзор и анализ способов диагностики сельскохозяйственных тракторов / И. В. Белоусов; С. Н. Шуханов // Вестник ВСГУТУ. — 2025. — 2(97).
14. Бельских, В. И. Показатели технического состояния тракторов и средства для их определения / В. И. Бельских // Техника в сельском хозяйстве. — 1971. — № 9. — С. 70.
15. Беляев, А. А. Исследование выбора материнской вейвлет-функции при вибродиагностике тепловозных двигателей / А. А. Беляев; Д. П. Кононов; А. М. Кудрин // Известия Петербургского университета путей сообщения. — 2025. — № 2. — С. 290—299.
16. Бижаев, А. В. Снижение токсичности отработавших газов дизеля путем подачи топлива с водой в камеру сгорания / А. В. Бижаев; С. Н. Девянин // АвтоГазоЗаправочный комплекс + Альтернативное топливо. — 2019. — Т. 18, № 12. — С. 586—588.
17. Бугаков, М. С. Диагностика дизельных форсунок с помощью ультразвука: дизель-ЭКО / М.С. Бугаков // Современные инновации, системы и технологии. — 2023. — № 2.

18. Булавка, Ю. А. Анализ эффективности экспресс-тестов для определения срока замены отработанного моторного масла / Ю. А. Булавка; А. В. Мелешк // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. — 2023. — № 1. — С. 100—107.
19. Бышов, Н. В. Анализ методов диагностирования топливной аппаратуры автотракторных дизелей и разработка математической модели топливного насоса высокого давления / Н. В. Бышов // Научный журнал КубГАУ. — 2016. — № 123.
20. Венцель, С. В. Газодинамический фон в картере двигателя / Венцель, С. В.; Коровянский, И. А. // Двигателестроение. — 1982. — № 1. — С. 32—36.
21. Вертей, М. Л. Обоснование способа разгона двигателя с принудительным впрыском топлива и электрическим управлением топливоподачей при проведении тестового диагностирования / М. Л. Вертей // Вестник АГАУ. — 2015. — № 2 (124). — С. 112—116.
22. Влияние конструктивных параметров двигателя на величину пульсаций потока картерного газа / Воронин, Д. М. // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. — 2016. — № 12. — С. 112—117.
23. Волков, Е. В. Методика экспресс-диагностирования дизелей автомобильной техники, оборудованных топливной системой с электронным управлением / Е. В. Волков // Инженерный вестник Дона. — 2018. — № 3 (50).
24. Воронин, Б. А. К вопросу о механизации сельского хозяйства через использование МТС / Б. А. Воронин, М. Л. Юсупов, Я. В. Воронина, Л. А. Новопашин // Научно-технический вестник: Технические системы в АПК. — 2021. — 1 (19). — С. 20—27.
25. Гайдар, С. М. Оценка методов подачи спирта в цилиндры дизельного двигателя экспериментальной установкой / С. М. Гайдар; Д. А. Пикин; Я. Д. Павлов // Агроинженерия. — 2022. — Т. 24, № 2. — С. 71—75.
26. Грачев, В. В. Математическая модель процесса холодной прокрутки многоцилиндрового дизеля / В. В. Грачев // Известия вузов. Машиностроение. — 2023. — 11 (764). — С. 61—70.

27. Гриценко, А. В. Диагностирование газораспределительного механизма виброакустическим методом / А. В. Гриценко // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. — 2017. — № 3.
28. Грунтович, Н. В. Применение вероятностно-статистических методов при выявлении дефектов дизельной форсунки / Н.В. Грунтович; Д.В. Кирдищев // Вестник ФГОУ ВПО Брянская ГСХА. — 2024. — 1 (101). — С. 58—62.
29. Гюнтер, Г. Диагностика дизельных двигателей. Серия "Автомеханик". Перевод с нем. Ю.Г. Грудского / Г. Гюнтер. — М.: ЗАО «КЖИ "За рулём"», 2004. — 176 с. — ISBN 5-85907-365-8.
30. Данилов, Ю. И. Совершенствование планирования эксплуатационно-ремонтных циклов двигателей внутреннего сгорания / Ю. И. Данилов, А. С. Денисов, И. К. Данилов // Вестник СГТУ. — 2013. — № 1 (69). — С. 229—232.
31. Девянин, С. Н. Подача воды в цилиндры дизеля и показатели токсичности его отработавших газов / С. Н. Девянин [и др.] // Автомобильная промышленность. — 2021. — № 5. — С. 12—18.
32. Джалолов, У. Х. Идентификация параметров разгонной характеристики двигателя внутреннего сгорания / У. Х. Джалолов; Н. И. Юнусов; У. А. Турсунбадалов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. — 2020. — № 35. — С. 43—56. — DOI: 10.15593/2224-9397/2020.3.03..
33. Дидманидзе, О. Н. Экспериментальные исследования расхода картерных газов двигателя Д-243 с разной степенью износа цилиндропоршневой группы / О. Н. Дидманидзе; А. И. Сучков; С. Н. Девянин // Техника и оборудование для села. — 2023. — 11 (317). — С. 36—39.
34. Егоров, В. В. Область применения бортовой диагностики самоходных технических средств / В. В. Егоров // Международная научная конференция молодых учёных и специалистов, посвященная 100-летию И. С. Шатилова. — РГАУ–МСХА им. К. А. Тимирязева. 2017. — С. 293—295.

35. Егоров, В. В. Оценка влияния тепловых зазоров газораспределительного механизма дизеля на пульсации во впускном коллекторе / В. В. Егоров; В. А. Чечет // Вестник ФГОУ ВПО «МГАУ им. В. П. Горячкина». — 2019. — № 4(92). — С. 4–8. — URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_39257084_55454232.pdf.
36. Егоров, В. В. Цифровой комплекс для диагностики ДВС по динамическим показателям и его модернизация / Егоров, В. В. // Материалы Международной научной конференции молодых учёных и специалистов, посвящённой 135-летию со дня рождения А. Н. Костякова : сборник статей, Москва, 06–08 июня 2022 года. Том 2. — РГАУ–МСХА им. К. А. Тимирязева. 2022. — С. 622–626.
37. Егоров, В. В. Системная диагностика тракторных и комбайновых дизелей на базе экспертной системы и индикаторных методов: – дис. . . . канд. техн. наук: – 05.20.03 / Егоров Вячеслав Владимирович. — РГАУ–МСХА, 2020.
38. Егоров, В. В. Потенциал применения комплекса экспресс-диагностики (Exsys, ИМДЦ-2) для тепловозных дизелей / В. В. Егоров // Мир транспорта. — 2022. — 1 (98). — С. 23–29.
39. Егоров, В. В. Применение индикаторных методов диагностики для машин с электронным управлением (на примере автотракторного дизеля) / В. В. Егоров; В. А. Чечет // Доклады ТСХА. — 2019. — С. 179–182.
40. Егоров, В.В. Анализ влияния давления подъёма иглы форсунки на состав выхлопных газов дизеля / В.В. Егоров; А.Е.М. Ал-Жавхар // Сборник статей научно-практической конференции, посвященной 90-летию Шарова Николая Михайловича. — Москва, 2024. — С. 155–159.
41. Жданко, Д. А. Разработка мобильного контрольно-диагностического устройства / Д. А. Жданко // Технический сервис машин. — 2021. — 1 (142). — С. 34–44.
42. Журавский, Б. В. Совершенствование диагностирования электрогидравлических форсунок дизельных двигателей с аккумуляторной системой впрыска топлива / Б. В. Журавский // Известия ТулГУ. Технические науки. — 2024. — № 3. — С. 589–596.

43. Инсафуддинов, С. З. Метод и технология непрерывной предиктивной диагностики автотракторных и комбайновых двигателей / С. З. Инсафуддинов; М. И. Веледов; Ф. Г. Абдразаков // Агротехника и энергообеспечение. — 2024. — 4 (45). — С. 93—101.
44. Ипатов, А. А. Электромобили и автомобили с КЭУ / А. А. Ипатов; А. А. Эйдинов. — М., 2004.
45. Испулов, А. А. Выбор метода аппроксимации экспериментальных данных / А. А. Испулов // Известия ТулГУ. Технические науки. — 2019. — № 3.
46. Карпов, В. М. Полиномиальная аппроксимация и проблемы точности при обработке экспериментальных данных / В. М. Карпов // МНИЖ. — 2014. — № 10—2.
47. Карташов, А. А. Снижение нагарообразования в дизельных двигателях / А.А. Карташов; И.А. Успенский; И. А. Юхин // Вестник РГАТУ. — 2023. — № 4.
48. Катаев, Ю. В. Контроль технического состояния сельскохозяйственной техники через онлайн мониторинг параметров / Ю. В. Катаев; Е. А. Градов; И. А. Тишанинов // Сельскохозяйственная техника: обслуживание и ремонт. — 2022. — № 1. — С. 14—19.
49. Ким, С. И. Встроенная экспертная система для оперативной тестовой диагностики локомотива, оборудованного системой МСУ-Т (П,Э) / С. И. Ким [и др.]. — 2014.
50. Кирдищев, Д. В. Применение метода Байеса при выявлении дефектов топливной аппаратуры по виброакустическим характеристикам во время работы дизеля / Д. В. Кирдищев // Вестник ГГТУ им. П. О. Сухого. — 2021. — 1 (84). — С. 109—122.
51. Ковалишин, Ф. П. Диэлектрическая спектроскопия судовых смазочных материалов / Ф. П. Ковалишин // Вестник молодежной науки. — 2022. — 2 (34).
52. Колунин, А. В. Определение состояния цилиндропоршневой группы двигателей военной техники по расходу картерных газов / А. В. Колунин; А. С. Шудыкин; С. В. Белокопытов // Известия ТулГУ. Технические науки. — 2018. — № 11. — С. 583—588.

53. Копышева, Т. Н. Применение платформ Neural Network Wizard и Loginom Community для решения задач аппроксимации и классификации в образовательном процессе / Т. Н. Копышева // Программные системы и вычислительные методы. — 2024. — № 4.
54. Кострицкий, В. В. Диагностирование дизельных топливных форсунок с пьезоэлектрическим приводом без снятия с двигателя / В. В. Кострицкий; А. В. Павченко // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. — 2021. — № 3. — С. 49—54.
55. Коцуба, В. И. Совершенствование метода оценки пневмоплотности цилиндропоршневой группы дизельного двигателя / В. И. Коцуба // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. — 2021. — № 3. — С. 158—163.
56. Кручек, В. А. Методика диагностирования дизельных двигателей автомобильной техники по параметрам акустического сигнала / В. А. Кручек; А. А. Горбачев; Р. А. Иванов // Известия Петербургского университета путей сообщения. — 2021. — № 4. — С. 571—577.
57. Кулагин, А. В. Диагностирование состояния судовых дизельных двигателей вероятностным методом распознавания неисправностей / А. В. Кулагин // Научные проблемы водного транспорта. — 2023. — № 69. — С. 109—122.
58. Кутенев, В. Ф. Экологическая безопасность автомобилей с двигателями внутреннего сгорания / В. Ф. Кутенев; Б. В. Кисуленко; Ю. В. Шюте. — М.: – Типография «Наука» РАН, 2009.
59. Лобанов, И. И. Процесс пуска дизеля как источник диагностической информации / И. И. Лобанов; С. П. Калугин // Двигателестроение. — 2021. — 2 (284). — С. 31—35.
60. Ложкин, В. Н. Теория и практика диагностирования аварийно-опасных режимов эксплуатации двигателей тракторного и комбайнового назначения / В. Н. Ложкин; А. И. Фомичев // Известия СПбГАУ. — 2023. — 4 (73). — С. 116—125.

61. Лянденбургский, В. В. Контроль технического состояния двигателя по давлению в системе смазки автомобилей КамАЗ / В. В. Лянденбургский // Нива Поволжья. — 2022. — 4 (64).
62. Мазур, Е. В. Разработка алгоритма комплексной методики оценки технического состояния цилиндропоршневой группы судовой двигательной установки на основе показателей масляной системы / Е. В. Мазур; Н. Л. Великанов; Г. Е. Ананьев // Вестник АГТУ. Серия: Морская техника и технология. — 2024. — № 1. — С. 72—83.
63. Малахов, А. Ю. Исследование нештатных (нехарактерных для исправной работы) звуков, возникающих в процессе эксплуатации автомобиля / А.Ю. Малахов // Проблемы экспертизы в автомобильно-дорожной отрасли. — 2024. — 1 (10).
64. Малахов, А. Ю. Методика проведения экспертиз причин выхода из строя топливных форсунок современных автомобилей / А. Ю. Малахов; А. Н. Ливанский; М. А. Карпов // Проблемы экспертизы в автомобильно-дорожной отрасли. — 2021. — № 1. — С. 5—22.
65. Манаков, А. Л. Методика определения эффективной работы ДВС / А. Л. Манаков; А. С. Алехин; Е. А. Ижбулдин // Вестник ИрГТУ. — 2015. — № 8 (103).
66. Мигаль, В. Методы технической диагностики автомобилей: учебное пособие / В.Д. Мигаль; В.П. Мигаль. — М: ИД Форум, 2018. — 417 с.
67. Мигаль, В. Техническая диагностика автомобильных двигателей: учебное пособие в 3-х томах. Т.3. Практические основы диагностирования / В.Д. Мигаль. — Харьков: Майдан, 2014, 2014. — 444 с.
68. Михлин, В. М. Система технического обслуживания и ремонта сельскохозяйственных машин по результатам диагностирования / В. М. Михлин [и др.]. — М.: – Информагротех, 1995.
69. Мухина, М. В. Анализ окружающей среды крупного промышленного города / М. В. Мухина; С. М. Шевченко; К. А. Фролова // Интернет-журнал "Отходы и ресурсы". — 2018. — № 1, том 5.

70. Науменко, А. М. Изменение диэлектрических характеристик моторного масла в процессе эксплуатации / А. М. Науменко; Д. А. Темкин // Материалы и технологии. — 2023. — № 2. — С. 6—11.
71. Нестеренко, Г. А. Обзор различных методов исследования потерь на трение в двигателях внутреннего сгорания / Г. А. Нестеренко; Е. А. Лысенко; И. С. Нестеренко // Международный научно-исследовательский журнал. — 2022. — 1—1(115). — С. 52—54. — DOI: 10.23670/IRJ.2022.115.1.009.
72. Нечаев, В. В. Методики технического диагностирования цилиндропоршневой группы дизелей холодной пусковой прокруткой коленчатого вала / В. В. Нечаев; Е. В. Воробьев; А. А. Тарасенко // Инженерный вестник Дона. — 2018. — № 3 (50).
73. Плаксина, Е. Т. Применение прецизионных хронометрических технологий для мониторинга отклонений в работе двигателей внутреннего сгорания / Е. Т. Плаксина, А. Б. Сырицкий; А. С. Комшин // Инженерный журнал: наука и инновации. — 2021. — 11(119). — DOI: 110.18698/2308-6033-2021-11-2126.
74. Побединский, В. В. Нейро-нечеткая сеть для оценки остаточного ресурса тракторных двигателей / В. В. Побединский // Вестник МГУЛ – Лесной вестник. — 2022. — № 2. — С. 120—130.
75. Потетня, К.М. Проведения исследований выхлопных газов с использованием современных газоанализаторов / К.М. Потетня; А.А. Садов // Научно-технический вестник: технические системы в АПК. — 2018. — 1(1). — С. 50—53.
76. Редников, С. Н. Полимеризация нефтяной жидкости в зазорах плунжерных и золотниковых пар / С. Н. Редников; Н. Н. Трушин; Д. В. Сычев // Известия ТулГУ. Технические науки. — 2023. — № 11. — С. 652—656.
77. Роцин, Д. В. Снижение погрешностей диагностирования составных частей двигателя внутреннего сгорания тракторов и самоходных машин / Д. В. Роцин; В. В. Егоров; В. А. Чечет // Научно-практические исследования. — 2019. — № 5(1). — С. 42—46. — URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_38589064_64990365.pdf.

78. Саженков, А. Н. Обзор методов и средств измерения эмиссии оксидов азота NO_x в газотурбинных технологиях / А. Н. Саженков; А. И. Фатыков; И. Б. Мелузова // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. — 2024. — № 77. — С. 74—88.
79. Сайкин, А. М. Особенности применения каталитических нейтрализаторов для очистки отработавших газов дизелей / А.М. Сайкин; А.А. Ахмедов // Вестник Вятского ГАТУ. — 2025. — 1 (23). — С. 78—87.
80. Сандаг, Г. Определение диагностических параметров для дизельных двигателей локомотивов / Г. Сандаг; П. Жамъян-Осор; О. Нацаг // Известия Транссиба. — 2023. — 1 (53). — С. 2—9.
81. Сараева, И. Ю. Анализ метода диагностирования цилиндропоршневой группы двигателя с использованием оборудования фирмы Bosch / И. Ю. Сараева // Автомобильный транспорт. — 2010. — № 27. — С. 56—60.
82. Сафин, Ф. Р. Оперативный контроль мощностных показателей дизельных двигателей с топливной системой типа Common Rail / Ф. Р. Сафин // Вестник МГУ. — 2023. — № 2. — С. 192—206.
83. Сахатмурадов, Е. Оценка работы двигателя внутреннего сгорания по состоянию выхлопных газов / Е. Сахатмурадов // IN SITU. — 2022. — № 10. — С. 16—19.
84. Симон, Д. В. Эксплуатационные методы повышения надёжности сельскохозяйственной техники / Д. В. Симон // Вестник Донского государственного технического университета. — 2015. — № 4(83). — С. 130—136.
85. Соснин, А. С. Функции активации нейросети: сигмоида, линейная, ступенчатая, RELU, TANH / А. С. Соснин; И. А. Сулова // Наука. Информатизация. Технологии. Образование : материалы XII международной научно-практической конференции. — Екатеринбург, 02.2019. — С. 237—246.
86. Типовые нормы выработки и расхода топлива на сельскохозяйственные механизированные работы. — утв. Минсельхозпродом РФ, 2006. — URL: <https://docs.cntd.ru/document/420270203>.

87. Устройство для диагностирования дизельной топливной аппаратуры. – 2247856С2: – F02М 65/00 / В. А. Чечет; Н. Т. Иванов; А. В. Чечет. – № 2003112032/06; заявл. 25.04.2003.
88. Уханов, А. П. Теоретическая оценка эксплуатационных показателей машинно-тракторных агрегатов при работе дизеля на различных видах бионефтяного топлива / А. П. Уханов; Е. А. Сидоров; Л. И. Сидорова // Вестник Ульяновской ГСХА. – 2023. – № 3(63). – С. 236–242.
89. Черепанов, С. С. Техническое обслуживание и ремонт машин в сельском хозяйстве / С. С. Черепанов. – М., «Колос», 1978. – 278 с.
90. Чечет В. А., Иванов Н. Т., Чечет Ю. В. Способ диагностирования цилиндро-поршневой группы двигателя внутреннего сгорания // Патент РФ № 2 184 360 С1. 2002. Бюл. № 18.
91. Чечет, В. А. Основные положения системной диагностики машин / В. А. Чечет [и др.] // Вестник ФГОУ ВПО «МГАУ им. В. П. Горячкина». – 2018. – № 6(88). – С. 51–55. – URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_36566078_18397347.pdf.
92. Чечет, В. А. Современные методы диагностики и обслуживания ДВС. Учебное пособие / В. А. Чечет [и др.]. – М.: МЭСХ, 2018.
93. Чечет, В. А. Техническая диагностика тракторов. Учебное пособие / В. А. Чечет [и др.]. – М.: МЭСХ, 2018.
94. Шевцов, Ю. Д. Алгоритм диагностики технического состояния двигателя по параметрам частотных характеристик масляного фильтра / Ю. Д. Шевцов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. – 2018. – № 4. – С. 63–70.
95. Шевцов, Ю. Д. К вопросу моделирования элементов систем смазки двигателей ДЭС как линейных электрических цепей / Ю. Д. Шевцов // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление. – 2010. – № 5. – С. 179–182.
96. Шпаков, А. В. Применение нейронных сетей для аппроксимации экспериментальных данных / А. В. Шпаков; Т. А. Лавина // Тенденции развития науки и образования. – 2022. – № 84–2. – С. 60–64.

97. Щукина, В. Н. Проектирование интеллектуальной системы контроля технического состояния парка мобильных машин / В. Н. Щукина // Агроинженерия. — 2022. — № 5. — С. 52–56.
98. Щукина, В. Н. Разработка алгоритма поиска неисправности при удалённой диагностике / В. Н. Щукина // Агроинженерия. — 2022. — № 6. — С. 20–24.
99. Экспертная система технической диагностики на открытых базах (Exsys v1.0): – Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2019612928 / В. А. Чечет; В. В. Егоров. — Заявл. 02.2019.
100. Hulsen, T. DeepVenn – a web application for the creation of area-proportional Venn diagrams using the deep learning framework Tensorflow.js. — 2022. — arXiv: 2210.04597 [cs.LG]. — URL: <https://arxiv.org/abs/2210.04597>.
101. Non-Destructive Testing Inspection for Metal Components Produced Using Wire and Arc Additive Manufacturing / Serrati, Douglas S. M. // Metals. — 2023. — Т. 13, № 4. — ISSN 2075-4701. — DOI: 10.3390/met13040648. — URL: <https://www.mdpi.com/2075-4701/13/4/648>.
102. Al-Shemmeri, T. T. Correlation of the NO emission and exhaust gas temperature for biodiesel / T. T. Al-Shemmeri, S. Oberweis // Applied Thermal Engineering. — 2011. — 31 (10).
103. Hong, J. In-situ tailpipe soot emission monitoring for diesel engine exhaust using a quartz-enhanced photoacoustic spectroscopy sensor / J. Hong [и др.] // Measurement. — 2025. — Т. 246. — ISSN 0263-2241. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2024.116555>. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263224124024400>.
104. Luján, J. M. Effectiveness of hybrid powertrains to reduce the fuel consumption and NOx emissions of a Euro 6d-temp diesel engine under real-life driving conditions / J. M. Luján [и др.] // Energy Conversion and Management. — 2019. — Т. 199. — ISSN 0196-8904. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.111987>. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890419309938>.

105. Monieta, J. The use of thermography in the diagnosis of ship piston internal combustion engines / J. Monieta // 17th International Conference Diagnostics of Machines and Vehicles. — 2018.
106. Xie, B. Exploring high-emission driving behaviors of heavy-duty diesel vehicles based on engine principles under different road grade levels / B. Xie [и др.] // Science of The Total Environment. — 2024. — Т. 951. — ISSN 0048-9697. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.175443>. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969724055931>.
107. Zeng, W. Prediction of transient NOX emission from a non-road diesel engine using a model combining Bayesian search and Population-based training / W. Zeng [и др.] // Atmospheric Environment. — 2024. — Т. 321. — ISSN 1352-2310. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2024.120350>. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231024000256>.
108. Zhao, P. The effects of injection timings on the spray and combustion of automobile engines fueled with diesel/methanol under cross and horizontal injection / P. Zhao [и др.] // Energy. — 2025. — Т. 323. — ISSN 0360-5442. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.135857>. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544225014999>.

1.1	Теплотворная способность различных видов топлива и их смесей .	10
1.2	Каталитический нейтрализатор дизельного двигателя и его внутренняя структура	12
1.3	Иерархическая схема регламентной стратегии ТОР	15
1.4	Диаграмма периодичности ТО и ремонта	16
1.5	Индикатор расхода газов КИ-13671	24
1.6	Сравнение осциллограмм пульсации картерных газов	24
1.7	Тепловизионная съёмка судового дизеля	25
1.8	Прибор ИМД-Ц	26
1.9	Переносной стенд для диагностики форсунок механического впрыска	30
1.10	Интерфейс программы Exsys	34
2.1	Исходные данные для моделирования режима работы дизеля	40
2.2	Сравнение исходных и интерполированных данных	40
2.3	Итоговая модель единичного разгона	41
2.4	Базовая модель многократного разгона	41
2.5	Модель содержания компонента R в выхлопных газах	42
2.6	Модель показаний газоанализатора по компоненту R	43
2.7	Модель содержания компонента R в эластичной камере	44
2.8	Характеристики состава газов бета-модели	45
2.9	Характеристики состава газов гамма-модели	46
2.10	Сравнение эмиссии в разных моделях	46
2.11	Сравнение показаний газоанализатора в разных моделях	47
2.12	Сравнение содержимого эластичной камеры в разных моделях . . .	47
2.13	Представление табличных данных в вероятностном формате	51
2.14	Окно ввода данных в TableCurve	52
2.15	Отображение введённых данных в TC2D	53
2.16	Выбор используемых функций в TC2D	53
2.17	Результат аппроксимации в TC2D	55
2.18	Структура словаря over_dct	58
2.19	Гистограммы точности аппроксимации	58
2.20	Соотношение компонентов функций аппроксимации	61
2.21	Визуализация 2-й группы функций	61
2.22	Визуализация 3-й группы функций	62
2.23	Визуализация наиболее подходящих функций	62
2.24	Функции активации нейронных сетей	63
2.25	Аппроксимация данных сигма-функцией	65
2.26	Итоговые сигма-функции	67
3.1	Газоанализатор Инфракар 5M2.01	69

3.2	Интерфейс ИМДЦ-2	70
3.3	Прибор ИМДЦ-2	71
3.4	Адаптеры ИМДЦ-2 для дизелей Д-145Т и Д-240	71
3.5	Установка ИМДЦ-2 на дизель Д-145Т	72
3.6	Прототип дросселирующего устройства	73
3.7	Изготовление элементов дросселирующего устройства	73
3.8	Опытное дросселирующее устройство	73
3.9	Серийное дросселирующее устройство и его установка	74
3.10	Регулировка давления впрыска прибором КИ-16301	76
4.1	Подключение газоанализатора к двигателю Д-240	81
4.2	Замеры концентрации O_2	82
4.3	Замеры концентрации CH	82
4.4	Влияние переизбытка топлива на концентрацию CO	83
4.5	Влияние переизбытка топлива на концентрацию CO_2	83
4.6	Влияние переизбытка топлива на концентрацию NO_x	84
4.7	Алгоритм анализа данных для выявления эффекта льющей фор- сунки	85
4.8	Газоанализатор в кабине МТЗ-82	87
4.9	Влияние дросселирования на концентрацию NO_x , неизношенный двигатель	87
4.10	Влияние дросселирования на концентрацию CO , неизношенный двигатель	88
4.11	Влияние дросселирования на концентрацию CO_2 , неизношенный двигатель	88
4.12	Влияние дросселирования на концентрацию NO_x , двигатель с из- носом	89
4.13	Влияние дросселирования на концентрацию CO , двигатель с износом	90
4.14	Влияние дросселирования на концентрацию CO_2 , двигатель с из- носом	90
4.15	Влияние дросселирования на концентрацию NO_x , сравнительный анализ	91
4.16	Влияние дросселирования на концентрацию CO , сравнительный анализ	92
4.17	Влияние дросселирования на концентрацию CO_2 , сравнительный анализ	92
4.18	Номограмма изношенности для NO_x	93
4.19	Номограмма изношенности для CO	94
4.20	Номограмма изношенности для CO_2	94

4.21	Характеристика NO _x , Агромаш 85ТК	95
4.22	Характеристика CO ₂ , Агромаш 85ТК	96
4.23	Характеристика CO, Агромаш 85ТК	96
5.1	Мобильное рабочее место диагноста	102
5.2	Количество измерений за смену	108
5.3	Сравнение топливных издержек при различных стратегиях ТОР .	110
5.4	Вероятностное представление сменного расхода топлива	112
5.5	Полученные графики расхода топлива	114
5.6	Годовая экономия средств в зависимости от числа тракторов	116
5.7	Срок окупаемости в зависимости от числа тракторов	117

1.1	Состав выхлопных газов дизельного двигателя.....	9
1.2	Периодичность технического обслуживания тракторов.....	14
1.3	Фрагмент матрицы условных вероятностей	33
2.1	Допускаемые значения суммарного зазора в сопряжениях нижней и верхней головок шатуна	51
2.2	Функции, предложенные TableCurve2D.....	56
2.3	Точность аппроксимации выбранными функциями	56
2.4	Результаты аппроксимации сигмоидой	66
3.1	Образец таблицы результатов эксперимента	77
4.1	Характеристики аппроксимированных уравнений	84
4.2	Зависимости для вычисления степени изношенности.....	94
5.2	К расчёту сменного расхода топлива.....	111
5.3	Вычисленные нормы расхода топлива за смену, л	112
5.4	Стоимость тракторных двигателей	115

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ

ГРМ	— газораспределительный механизм, стр. 22
ЕТО	— ежедневное техническое обслуживание, стр. 13
МТА	— механотестер топливной аппаратуры, стр. 31.
МТС	— машинно-тракторная станция, стр. 13
МЭС	— мобильное энергетическое средство, стр. 4
ОГ	— отработавшие газы
ТОР	— техническое обслуживание и ремонт, стр. 13
ЦПГ	— цилиндро-поршневая группа, стр. 29
ЭБУ	— электронный блок управления, стр. 28
DPF	— дизельный сажевый фильтр, стр. 11
DOC	— каталитический нейтрализатор дизельного двигателя, стр. 11
EGR	— система рециркуляции выхлопных (картерных) газов, стр. 12
ERP	— компьютерная система управления ресурсами предприятия, стр. 19

ПЕРЕЧЕНЬ ОБОЗНАЧЕНИЙ

$\text{perge } K_r$	— коэффициент готовности
n_d	— частота вращения коленчатого вала двигателя, мин^{-1}
ppm	— миллионная доля, $1 \cdot 10^{-6}$
R	— содержание абстрактного компонента R в отработавших газах
R_s	— показания газоанализатора по содержанию компонента R
R_v	— содержание компонента R в эластичной камере-пробоотборнике
ε	— угловое ускорение (коленчатого вала)

ПЕРЕЧЕНЬ ТЕРМИНОВ И ОПРЕДЕЛЕНИЙ

Дифференциальным называют *диагностический показатель*, позволяющий дать количественную оценку одного или нескольких структурных параметров.

Интегральный показатель, напротив, зависит от сочетания нескольких структурных параметров, и их количественная оценка только по одному этому показателю невозможна.

Коэффициент готовности K_T — вероятность того, что в заданный момент времени объект окажется в работоспособном состоянии.

Ошибка первого рода — ошибочная отбраковка исправного элемента.

Ошибка второго рода — ошибочная валидация неисправного элемента.

Структурный параметр — линейно измеримый либо наблюдаемый без приборов показатель диагностируемого объекта, непосредственно характеризующий его техническое состояние.

Фаззификация — преобразование численных показателей в вероятностные

ПРИЛОЖЕНИЕ А. ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗАДЕЙСТВОВАННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

А.1 Газоанализатор Инфракар 5М2.01

Класс прибора (по ГОСТ 33997-2016)	I
Диапазон измерений объемной доли CO, %	0...5
Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений CO, %	$\pm 0,06$ (при 0...1,25)
Пределы допускаемой относительной погрешности измерений CO, %	± 4 (при 1,25...5)
Диапазон измерений объемной доли CH, ppm	0...2000
Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений CH, ppm	± 12 (при 0...240)
Пределы допускаемой относительной погрешности измерений CH, %	± 5 (при 240...2000 ppm)
Диапазон измерений объемной доли CO ₂ , %	0...16
Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений CO ₂ ,	$\pm 0,5$ (при 0...12,5)
Пределы допускаемой относительной погрешности измерений CO ₂	± 4 (при 12...16)
Диапазон измерений объемной доли O ₂ , %	0...21
Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений O ₂ , %	$\pm 0,1$ (при 0...3,3)
Пределы допускаемой относительной погрешности измерений O ₂ , %	± 4 (при 3,3...21)
Диапазон измерений объемной доли NOx, ppm	0...5000
Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений NOx, ppm	± 100 (при 0...1000)
Пределы допускаемой относительной погрешности измерений NOx, ppm	± 10 (при 1000...5000)
Расчет коэффициента избытка воздуха λ	да
Диапазон измерений коэффициента избытка воздуха λ	0...2
Измерение температуры масла	нет

Таблица А.1, продолжение

Канал для измерения частоты вращения коленчатого вала	да
Диапазон измерения частоты вращения, мин ⁻¹	0...9000
Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений частоты вращения, мин ⁻¹	±30 (0...1200)
Пределы допускаемой относительной погрешности измерений частоты вращения, %	±2.5 (при 1200...9000 мин ⁻¹)
Автослив конденсата	да
Автоподстройка нуля	да
Работа с ЛТК и мотортестерами	да
Встроенный принтер с часами реального времени	да
Предел допускаемого времени установления показаний для каналов СО, СН, СО ₂ , сек	30
Предел допускаемого времени установления показаний для каналов О ₂ , NO _x , сек	60
Время прогрева при 20 °С, мин, не более	30
Питание газоанализатора, В	12DC / 220AC
Средняя наработка на отказ, ч	10000
Срок службы, лет	10
Потребляемая мощность, Вт, не более	40
Масса (НЕТТО), кг	8
Габариты (В×Ш×Д), мм	180 × 310 × 370

ПРИЛОЖЕНИЕ Б. ЛИСТИНГИ ЗАДЕЙСТВОВАННЫХ ПРОГРАММ

Б.1 Анализ фаззифицирующих функций

```
1
2 def avg(lst) -> float:
3     return sum(lst)/len(lst)
4
5
6 over_dct = {}
7 comp_dct = {}
8
9
10 filenames = ['d240-2f2.txt', 'd240-4f2.txt', 'smd2f2.txt', 'smd4f2.txt',
11              '']
12
13 for filename in filenames:
14     with open(filename) as file:
15         dct = {}
16         for line in file:
17             arr = line.split()
18             det = float(arr[1])
19             eq = arr[4]
20             dct[eq]=det
21         over_dct[filename] = dct
22
23 for key, value in over_dct[filenames[0]].items():
24     comp_dct[key] = [value,]
25
26 for filename in filenames[1:]:
27     f = over_dct[filename]
28     for key, value in f.items():
29         comp_dct[key].append(value)
30
31 for key, value in comp_dct.items():
32     comp_dct[key] = avg(value)
33
34 result = sorted(comp_dct.items(), key=lambda x:x[1])
35 res = result.reverse()
36
37 for item in result:
38     print(f'{item[0]}: {item[1]:.3f}')
```

Б.2 Аппроксимация данных сигмной

```

1 import numpy as np
2 from scipy.optimize import curve_fit
3 import matplotlib.pyplot as plt
4
5 XDATA = np.array([0.46, 0.62, 0.71]) #значения x
6 YDATA = np.array([0.0, 0.5, 1.0]) # значения y
7
8 def adaptive_sigmoid_fit(x_data, y_data):
9
10
11     dx = x_data.max() - x_data.min()
12     dy = y_data.max() - y_data.min()
13     tg = dy/dx
14
15     def sigmoid_fixed(x, b):
16         return 1 / (1 + np.exp(-4*tg*(x-b)))
17
18     p=[np.mean(x_data)]
19     b, _ =(curve_fit(sigmoid_fixed, x_data, y_data, p0=p))
20     return (4*tg, b[0])
21
22 a, b = adaptive_sigmoid_fit(XDATA, YDATA)
23
24 """Визуализация"""
25 x_plot = np.linspace(min(XDATA), max(XDATA), 100)
26 y_plot = 1 / (1 + np.exp(-a * (x_plot - b)))
27
28 plt.figure(figsize=(10, 6))
29 plt.scatter(XDATA, YDATA, s=150, label='Данные', zorder=5)
30 plt.plot(x_plot, y_plot, 'r-', linewidth=3,
31         label=f'Аппроксимация')
32 plt.axvline(b, color='green', linestyle='--', alpha=0.5)
33 plt.xlabel('x')
34 plt.ylabel('y')
35 plt.title(f'Сигмапереход- a={a}, b={b}')
36 plt.legend()
37 plt.grid(alpha=0.3)
38 plt.tight_layout()
39 plt.show()

```

Б.3 Интерполяция разгонной характеристики

```

1 def linear_interpolation(t1, n1, t2, n2, t_target):
2     """Выполняет линейную интерполяцию между двумя точками"""
3     if t1 == t2:
4         return n1
5
6     return n1 + (n2 - n1) * (t_target - t1) / (t2 - t1)
7
8 def interpolate_to_multiples_of_50(data):
9     """Преобразует данные так, чтобы значения времени были кратны 50"""
10    # Извлекаем исходные данные
11    times = [row[0] for row in data]
12    values = [row[1] for row in data]
13
14    # Находим минимальное и максимальное время, кратное 50
15    min_time = min(times)
16    max_time = max(times)
17
18    # Округляем до ближайших кратных 50
19    start_time = (min_time // 50) * 50
20    if min_time % 50 != 0:
21        start_time += 50
22
23    end_time = (max_time // 50) * 50
24
25    # Генерируем целевые временные точки
26    target_times = []
27    current_time = start_time
28    while current_time <= end_time:
29        target_times.append(current_time)
30        current_time += 50
31
32    # Выполняем интерполяцию для каждой целевой точки
33    result = []
34    for target_time in target_times:
35        # Если точка точно совпадает с существующей, используем её значение
36        if target_time in times:
37            index = times.index(target_time)
38            result.append((target_time, values[index]))
39            continue
40
41    # Находим интервал, в который попадает целевое время
42    for i in range(len(times) - 1):
43        if times[i] <= target_time <= times[i + 1]:
44            # Выполняем линейную интерполяцию
45            interpolated_value = linear_interpolation(
46                times[i], values[i],
47                times[i + 1], values[i + 1],
48                target_time
49            )

```

```

50         result.append((target_time, round(
interpolated_value)))
51         break
52
53     return result
54
55 def parse_input_data(input_data):
56     """Парсит входные данные из строкового формата, игнорируя третий
столбец"""
57     lines = input_data.strip().split('\n')
58     data = []
59
60     # Пропускаем заголовок и парсим данные
61     for line in lines[1:]:
62         if line.strip():
63             parts = line.split()
64             t = int(parts[0])
65             n = int(parts[1])
66             # Третий столбец (e) игнорируется
67             data.append((t, n))
68
69     return data
70
71 def main():
72     # Входные данные
73     input_data = """t n e
74     330 1093 5.9
75     385 1091 -4.5
76     ...
77     9406 1118 -4.7
78 """
79
80     # Парсим данные
81     data = parse_input_data(input_data)
82
83     # Выполняем интерполяцию
84     result = interpolate_to_multiples_of_50(data)
85
86     # Выводим результат
87     print("t\tn")
88     for t, n in result:
89         print(f"{t}\t{n}")
90
91 if __name__ == "__main__":
92     main()

```

Б.4 Имитация затухающих колебаний

```
1 import math
2 import random
3
4 T_START=9450
5 T_FINISH=15350
6 DECAY=1800
7 DECAY_MLT=36
8 STRETCH = 232
9 PING = -570
10 LEVEL = 1091
11
12 t = range(9450,15350,50)
13
14 for time in t:
15     dissip = DECAY_MLT / math.exp((time-T_START)/DECAY)
16     sin = math.sin((time-T_START-PING) / STRETCH)
17     res = LEVEL + round(sin * dissip + random.normalvariate(0,1))
18     print(time, '\t', res)
```

Б.5 Аппроксимация экспериментальных данных

```

1 import numpy as np
2 import matplotlib.pyplot as plt
3 from scipy.optimize import curve_fit
4
5 def read_data(filename):
6     """Чтение данных из файла"""
7     x = []
8     y = []
9     with open(filename, 'r') as f:
10         next(f) # Пропускаем заголовок
11         for line in f:
12             if line.strip(): # Пропускаем пустые строки
13                 parts = line.split()
14                 x.append(float(parts[0]))
15                 y.append(float(parts[1]))
16     return np.array(x), np.array(y)
17
18 def linear_func(x, a, b):
19     """Линейная функция для аппроксимации"""
20     return a * x + b
21
22 def power_func(x, a, b):
23     """Степенная функция для аппроксимации"""
24     return a * x**b
25
26 def exp_func(x, a, b):
27     """Экспоненциальная функция для аппроксимации"""
28     return a * np.exp(b * x)
29
30 def exp_boost(x, a, b, c):
31     """Экспонента полинома"""
32     return np.exp(a + 0.001*b*x + 0.000001*c*x*x)
33
34 def exp_honest(x, a, b):
35     """Честная экспонента"""
36     return np.exp(0.001*a*x + 0.000001*b*x*x)
37
38 def approximate_and_plot(x, y, func, func_name):
39     """Аппроксимация данных и построение графика"""
40     try:
41         # Аппроксимация
42         popt, pcov = curve_fit(func, x, y)
43
44         # Вывод параметров
45         print(f"\n{func_name} аппроксимация:")
46         print(f"Параметры: {popt}")
47
48         # Расчет R2
49         residuals = y - func(x, *popt)
50         ss_res = np.sum(residuals**2)

```

```

51     ss_tot = np.sum((y - np.mean(y))**2)
52     r_squared = 1 - (ss_res / ss_tot)
53     print(f"R^2 = {r_squared:.4f}")
54
55     # Построение графика
56     plt.figure()
57     plt.scatter(x, y, label='Данные')
58     x_fit = np.linspace(min(x), max(x), 100)
59     plt.plot(x_fit, func(x_fit, *popt), 'r-', label=f'{
func_name} аппроксимация')
60     plt.xlabel('x')
61     plt.ylabel('y')
62     plt.title(f'{func_name} аппроксимация данных')
63     plt.legend()
64     plt.grid()
65     plt.show()
66
67     except Exception as e:
68         print(f"Ошибка при {func_name} аппроксимации: {e}")
69
70 # Основная программа
71 if __name__ == "__main__":
72     filename = "nox_1_fl.txt"
73
74     try:
75         # Чтение данных
76         x, y = read_data(filename)
77
78         # Аппроксимация (подставить функцию)
79         approximate_and_plot(x, y, exp_boost, "Экспонента полинома")
80
81     except FileNotFoundError:
82         print(f"Файл {filename} не найден!")
83     except Exception as e:
84         print(f"Произошла ошибка: {e}")

```

Б.6 Вычисления с диапазонами

```

1 class Range():
2     def __init__(self, minimum, maximum) -> None:
3         if type(minimum) in [int, float] or type(maximum) in [int,
float]:
4             self.minimum = minimum
5             self.maximum = maximum
6             if self.minimum > self.maximum:
7                 self.minimum, self.maximum = self.maximum, self.
minimum
8             elif type(minimum) is Range and type(maximum) is Range:
9                 temp = Matrix()
10                temp.append(minimum.minimum)
11                temp.append(minimum.maximum)

```

```

12         temp.append(maximum.minimum)
13         temp.append(maximum.maximum)
14         self.minimum = min(temp)
15         self.maximum = max(temp)
16
17     def __add__(self, b):
18         if type(b) in [int, float]:
19             return Range(self.minimum+b, self.maximum+b)
20         elif type(b) is Range:
21             return Range(self.minimum+b.minimum, self.maximum+b.
22 maximum)
23
24     def __radd__(self, b):
25         if type(b) in [int, float]:
26             return Range(self.minimum+b, self.maximum+b)
27         elif type(b) is Range:
28             return Range(self.minimum+b.minimum, self.maximum+b.
29 maximum)
30
31     def __truediv__(self, divider):
32         """Деление"""
33         if type(divider) in (int, float):
34             return Range(self.minimum/divider, self.maximum/divider
35 )
36         elif type(divider) is Range:
37             temp = Matrix()
38             temp.append(self.minimum / divider.minimum)
39             temp.append(self.minimum / divider.maximum)
40             temp.append(self.maximum / divider.minimum)
41             temp.append(self.maximum / divider.maximum)
42             return Range(min(temp), max(temp))
43
44     def __rtruediv__(self, divider):
45         """Обратное деление"""
46         if type(divider) in (int, float):
47             return Range(divider/self.maximum, divider/self.minimum
48 )
49         elif type(divider) is Range:
50             temp = Matrix()
51             temp.append(divider.minimum / self.minimum)
52             temp.append(divider.minimum / self.maximum)
53             temp.append(divider.maximum / self.minimum)
54             temp.append(divider.maximum / self.maximum)
55             return Range(min(temp), max(temp))
56
57     def __format__(self, frm):
58         if not frm:
59             return self.__repr__()
60         if frm[0] == '.':
61             if frm[1:] == '1f':
62                 return self.show_rnd1()
63             elif frm[1:] == '2f':

```

```

60         return self.show_rnd2()
61     elif frm[1:] == '3f':
62         return self.show_rnd3()
63
64     def __ge__(self, x):
65         """Больше или равно"""
66         ret = False
67         if type(x) is Range:
68             ret = True if self.minimum >= x.maximum else False
69         else:
70             ret = True if self.minimum >= x else False
71         return ret
72
73     def __gt__(self, x):
74         """Строго больше"""
75         ret = False
76         if type(x) is Range:
77             ret = True if self.minimum > x.maximum else False
78         else:
79             ret = True if self.minimum > x else False
80
81     def __le__(self, x):
82         """Меньше или равно"""
83         ret = False
84         if type(x) is Range:
85             ret = True if self.maximum <= x.minimum else False
86         else:
87             ret = True if self.maximum <= x else False
88         return ret
89
90     def __lt__(self, x):
91         """Строго меньше"""
92         ret = False
93         if type(x) is Range:
94             ret = True if self.maximum < x.minimum else False
95         else:
96             ret = True if self.maximum < x else False
97         return ret
98
99     def __mul__(self, multiplier):
100         """Умножение"""
101         if type(multiplier) == int or type(multiplier) == float:
102             return Range(self.minimum*multiplier, self.maximum*
multiplier)
103         elif type(multiplier) == Matrix:
104             temp = Matrix()
105             temp.append(self.minimum * multiplier.minimum)
106             temp.append(self.minimum * multiplier.maximum)
107             temp.append(self.maximum * multiplier.minimum)
108             temp.append(self.maximum * multiplier.maximum)
109             return Range(min(temp), max(temp))
110

```

```

111     def __rmul__(self, multiplier):
112         """Обратное умножение зачем(?) """
113         if type(multiplier) == int or type(multiplier) == float:
114             return Range(self.minimum*multiplier, self.maximum*
multiplier)
115         elif type(multiplier) == Matrix:
116             temp = Matrix()
117             temp.append(self.minimum * multiplier.minimum)
118             temp.append(self.minimum * multiplier.maximum)
119             temp.append(self.maximum * multiplier.minimum)
120             temp.append(self.maximum * multiplier.maximum)
121             return Range(min(temp), max(temp))
122
123     def contains(self, member) -> float:
124         if type(member) in [int, float]:
125             ret = 1.0 if (self.minimum <= member and member <= self
.maximum) else False
126             return ret
127         elif type(member) is Range:
128             ret = 0.0
129             if self.minimum >= member.maximum: # 1 случай
130                 ret = 0.0
131             elif self.minimum > member.minimum: # 2 случай
132                 if self.minimum <= member.maximum and self.maximum
>= member.maximum:
133                     ret = 0.5
134                     print('case 2')
135             elif self.minimum <= member.minimum and self.maximum >=
member.maximum:
136                 # 3 случай
137                 ret = 1.0
138             elif self.maximum < member.maximum: # 4 случай
139                 if self.minimum <= member.minimum < self.maximum:
140                     ret = 0.5
141             elif self.maximum <= member.minimum: # 5 случай
142                 ret = 0.0
143             elif self.minimum > member.minimum and self.maximum <
member.maximum:
144                 ret = 0.5
145             return ret
146
147     def __pow__(self, p):
148         """Степень """
149         if type(p) in [int, float]:
150             return Range(self.minimum**p, self.maximum**p)
151         elif type(p) is Range:
152             temp = Matrix()
153             temp.append(self.minimum ** p.minimum)
154             temp.append(self.minimum ** p.maximum)
155             temp.append(self.maximum ** p.minimum)
156             temp.append(self.maximum ** p.maximum)
157             return Range(min(temp), max(temp))

```

```

158
159 def __rpow__(self, p):
160     """Обратная степень """
161     if type(p) in [int, float]:
162         return Range(p**self.minimum, p**self.maximum)
163     elif type(p) is Range:
164         temp = Matrix()
165         temp.append(p.minimum ** self.minimum)
166         temp.append(p.minimum ** self.maximum)
167         temp.append(p.maximum ** self.minimum)
168         temp.append(p.maximum ** self.maximum)
169         return Range(min(temp), max(temp))
170
171 def __repr__(self) -> str:
172     """Вывод """
173     return f'{self.minimum}..{self.maximum}'
174
175 def show_rnd1(self): # преобразование в строку с округлением до десятых
176     return f'{self.minimum:.1f}..{self.maximum:.1f}'
177
178 def show_rnd2(self): # преобразование в строку с округлением до сотых
179     return f'{self.minimum:.2f}..{self.maximum:.2f}'
180
181 def show_rnd3(self): # преобразование в строку с округлением до
182     тысячных return f'{self.minimum:.3f}..{self.maximum:.3f}'
183
184 def __sub__(self, b):
185     """Вычитание """
186     if type(b) in [int, float]:
187         return Range(self.minimum - b, self.maximum - b)
188     elif type(b) is Range:
189         return Range(self.minimum-b.maximum, self.maximum-b.
190 minimum)
191
192 def __rsub__(self, b):
193     """Обратное вычитание """
194     if type(b) in [int, float]:
195         return Range(b-self.maximum, b-self.minimum)
196     elif type(b) is Range:
197         return Range(b.minimum-self.maximum, b.maximum-self.
198 minimum)
199
200 class Matrix(list):
201     def __mul__(self, multiplier):
202         result = Matrix()
203         for element in self:
204             result.append(element*multiplier)
205         return result

```