

На правах рукописи

ГАМОВ АРТЕМ АЛЕКСЕЕВИЧ

**АДАПТАЦИЯ РАБОТЫ ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ ПОД
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ВИДОВ ТОПЛИВА
(БИОДИЗЕЛЬ) В МАШИННО-ТРАКТОРНЫХ АГРЕГАТАХ**

Специальность: 4.3.1. Технологии, машины и оборудование для
агропромышленного комплекса

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2025

Работа выполнена на кафедре тракторов и автомобилей Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева».

Научный руководитель:

Пуляев Николай Николаевич,

кандидат технических наук, доцент кафедры тракторов и автомобилей ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева»

Официальные оппоненты:

Плотников Сергей Александрович,

доктор технических наук, профессор, Заслуженный изобретатель Российской Федерации, профессор кафедры «Технология машиностроения» ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет»;

Варнаков Дмитрий Валерьевич,

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры техносферной безопасности ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный университет».

Ведущая организация:

ФГБОУ ВО «Башкирский государственный аграрный университет»

Защита состоится 18 декабря 2025 года в 10:00 на заседании диссертационного совета 35.2.030.03 на базе ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева», по адресу: 127434, г. Москва, ул. Прянишникова, д. 19, тел: 8 (499) 976-17-14.

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

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

Автореферат разослан «_____» _____ 2025 г.

И.о. ученого секретаря
диссертационного совета

А. А. Манохина

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Переход на альтернативные виды топлива, в частности на биодизель, представляет собой важную задачу в условиях необходимости снижения выбросов парниковых газов и зависимости от ископаемых ресурсов. Одним из ключевых направлений снижения углеродного следа является замещение ископаемого топлива возобновляемыми источниками энергии. Среди альтернативных видов топлива особое место занимает биодизель, представляющий собой метиловые эфиры жирных кислот, получаемые из растительного или животного сырья. Биодизель обладает рядом преимуществ, включая биоразлагаемость, меньшую токсичность, снижение выбросов твёрдых частиц и углекислого газа, а также совместимость с существующими дизельными двигателями.

Однако внедрение биодизеля сопряжено с рядом технологических и эксплуатационных проблем. Одной из таких проблем является необходимость адаптации топливных систем, обусловленная различием в физико-химических свойствах дизеля и биодизеля. Особенно актуальной становится задача организации перехода от одного топлива к другому в условиях, когда невозможно полностью очистить бак от остатков предыдущего топлива. Использование одного бака для смесового топлива создаёт задачу контроля качества смеси, обеспечения стабильной работы двигателя и минимизации потерь мощности.

В практических условиях эксплуатации сельскохозяйственной техники нередко возникает ситуация, когда в баке остаётся некоторое количество дизельного топлива, а заправка производится биодизелем, или наоборот. Такая ситуация требует научного подхода к оценке остатка старого топлива, разработки математических моделей разбавления и обоснования количества заливок, необходимых для перехода к новому топливу без риска нарушения рабочих параметров двигателя.

Степень разработанности темы исследования. Вопросом влияния биотоплива на мощность двигателей внутреннего сгорания (ДВС), в частности тракторных дизелей, занимались многие ученые как в России, так и за рубежом. Значительный вклад в получение расчетных характеристик при использовании смесового топлива и способах адаптации ДВС в России внесли Аллилуев В.А., Батыров В. И., Бельских В.И., Варнаков В.В., Варнаков Д.В., Веденяпин Г.В.,

Габитов И.И., Девянин С.Н., Дидманидзе О.Н., Ждановский Н.С., Катаев Ю.В., Мигаль В.Д., Михлин В.М., Неговора А.В., Черноиванов В.И., Чечет В.А., Шекихачев Ю. А., Шубин В.М. и многие другие. За рубежом исследованием влияния биотоплива на дизельный ДВС занимались Youngchul Ra, Rolf Reitz, Stuart Daw, Joanna Mcfarlane, Drożdziel P., Lei Zhu W.G., Huang Z., Hui An, Yang W.M., Amin Maghbouli, Chua K.J., Henein N.A, Zahdeh A.R., Yassine M.K. и другие.

Известны работы, в которых доказано влияние цикловой подачи и угла опережения впрыска топлива в зависимости от процентного содержания биотоплива в смеси. При этом остается открытым вопрос адаптации топливной системы под дизельное и биодизельное топливо. Нет ясности какое количество смеси и как влияет на характеристики подачи.

Разработка математической модели подачи топлива позволит адаптировать дизельные двигатели в сельхозтехнике к использованию альтернативных видов топлива без потерь мощности.

Цель работы: разработка и верификация математической модели дозирования топлива $Q = f(n, M, S)$ и алгоритма её интеграции в систему управления дизельного двигателя с одним топливным баком при переменном составе смеси (дизель/биодизель), обеспечивающих сохранение требуемой мощности без применения датчиков состава и без переключения режимов.

Объектом исследования является процесс эксплуатации дизельной техники при использовании смесей биодизеля и дизеля.

Предметом исследования являются физико-химические свойства топлива, динамика вымывания остаточного топлива из топливного бака и влияние состава топливной смеси на мощность двигателя внутреннего сгорания.

Задачи исследования:

1. Провести исследование физико-химических характеристик дизеля и биодизеля (плотность, вязкость, теплота сгорания);
2. Оценить влияние топлива на мощность двигателя;
3. Построить математическую модель постепенного разбавления остатков топлива при многократных заправках;
4. Разработать модель для вычисления эффективной подачи топлива при смешанном составе в системах, рассчитанных на однотипное топливо;
5. Провести реальный эксперимент на дизельном двигателе;

6. Сформировать безопасную и эффективную стратегию перехода на биодизель при использовании одного топливного бака.

Научная новизна:

1. Разработан подход к оценке остаточной концентрации топлива при многократных заправках одним топливом после использования другого, с использованием модели геометрического убывания;

2. Проведён сравнительный анализ потерь мощности двигателя в зависимости от доли биодизеля в смеси, с учётом теплотворной способности и других физико-химических характеристик топлива;

3. Разработана математическая модель, которая позволяет сохранять заданную мощность при работе на смесевом топливе;

4. Разработаны практические рекомендации по организации перехода на биодизель в условиях эксплуатации сельхозтехники с использованием одного бака без полной промывки.

Теоретическая значимость диссертационного исследования заключается в получении и верификации компактной математической модели дозирования топлива $Q = f(n, M, S)$, которая описывает потребный массовый расход как непрерывную функцию оборотов, нагрузки и доли биодизеля. Модель физически согласована (через плотность и низшую теплоту сгорания смеси) и пригодна как в параметрической, так и в табличной форме для прямой реализации в ЭБУ.

Практическая ценность результатов работы заключается в том, что благодаря разработанной модели двигатель с одним баком не теряет мощность при смене состава топлива: подача автоматически компенсируется под текущую долю биодизеля без переключения режимов и без дополнительных датчиков. Это обеспечивает стабильную тягу в реальной эксплуатации и упрощает внедрение (достаточно программной калибровки). Модель может быть переобучена на другом объеме данных, что делает ее гибкой и позволяет масштабировать на другие дизельные ДВС, используемые в сельскохозяйственной технике.

Методы исследования: аналитические расчёты, сравнительный анализ характеристик топлива, аппроксимация зависимости мощности от состава смеси, оценка остаточной доли топлива в баке по экспоненциальной модели, анализ нормативной базы и практических кейсов.

Положения, выносимые на защиту:

1. Методика расчёта процесса перехода с одного топлива на другое;

2. Результаты экспериментальных исследований по смешиваемости дизельного и биодизельного топлива;

3. Результаты расчетных и экспериментальных исследований влияния биодизельного топлива на мощность двигателя.

Достоверность результатов обеспечивается использованием проверенных теоретических основ термодинамики, характеристик топлива, а также моделей разбавления, широко применяемых в инженерных расчётах. Расчёты основаны на регламентированных значениях теплотворной способности, плотности и вязкости дизельного топлива и биодизеля, приведённых в стандартах EN 14214 и ГОСТ Р 52368-2005. Для оценки переходных процессов в топливной системе использованы логарифмические модели, подтверждённые практикой топливного смешивания. Расчёты проиллюстрированы применением к реальному образцу техники (двигатель Д-21), что позволяет оценить практическую применимость результатов. Надёжность выводов подтверждается согласованностью полученных оценок с данными профильных исследований и нормативных документов.

Апробация результатов. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на международном семинаре «Чтения академика В. Н. Болтинского», Москва, ФГБОУ ВО РГАУ – МСХА имени К. А. Тимирязева, 23 января 2025 года.

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 3 печатные научные работы, в том числе 2 работы в рецензируемых изданиях из перечня ВАК Российской Федерации.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав, общих выводов, списка использованной литературы из 103 наименований, 20 из которых на иностранном языке. Работа изложена на 140 страницах, содержит 42 рисунка, 15 таблиц, 7 приложений.

Личный вклад соискателя. Личный вклад соискателя заключается в непосредственном участии на всех этапах теоретических и экспериментальных исследований, формировании задач исследования, получении и обработке данных, разработке математической модели, составлении рекомендаций по внедрению математической модели, анализе и подготовке публикаций по диссертационной работе, выступлении на научном семинаре, написании диссертационной работы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении содержится общая характеристика работы, обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформирована цель и задачи исследований, изложена научная новизна и практическая значимость работы, а также основные положения диссертации, выносимые на защиту.

В первой главе «Использование альтернативных видов топлива» проведен анализ мирового опыта применения смесевых топлив, который показывает, что при наличии государственной поддержки, развитой инфраструктуры и нормативной базы возможно широкое внедрение смесей дизельного топлива и биодизеля в транспортном и аграрном секторах. Наибольших успехов в этом направлении достигли страны Европейского Союза, США, Бразилия и Индонезия, где использование смесевого топлива закреплено на законодательном уровне и сопровождается масштабными производственными программами.

В России, несмотря на наличие научных разработок и успешные пилотные проекты, применение смесевого топлива пока носит ограниченный характер. Основными барьерами являются недостаток инфраструктуры для производства и распределения биодизеля, а также необходимость адаптации топливных систем для работы с высокими концентрациями биокомпонентов.

На основании проведенного анализа сформулированы задачи исследований.

В второй главе «Теоретические основы работы дизельных двигателей на смесях топлива» проведены теоретические расчеты потерь мощностных характеристик двигателя при использовании топлива с наименьшей теплотой сгорания. Выявлены недостатки существующий решений.

Особое внимание уделено применению формулы Д. И. Менделеева для оценки теплоты сгорания смесей. Проведённые расчёты подтвердили, что по мере увеличения доли биодизеля снижается удельная теплота сгорания топлива, что приводит к падению мощности двигателя и требует увеличения подачи топлива.

$$Q_H = 33,9 * C + 103 * H - 10,9(O - S) - 2,514 * W, \quad (1)$$

Если учитывать плотность топлива, то для сохранения мощности потребуется увеличить подачу на ~10 %:

$$\frac{Q_{\text{дизеля}} \times \rho_{\text{дизеля}}}{Q_{\text{биодизеля}} \times \rho_{\text{биодизеля}}} = \frac{42 \times 0,83}{37 \times 0,86} = \frac{34,9}{31,8} = 1,097, \quad (2)$$

Чтобы сохранить мощность на том же уровне, нужно увеличить расход топлива (например, на 10...13 %). При этом исследования показали, что объемную подачу нужно увеличить на 9,4 %, а массовую на 13 %.

Зависимость заданной мощности $P_{\text{зад.}}$ от получаемой энергии выражается как:

$$E = P_{\text{зад.}} \times t. \quad (3)$$

И, следовательно, для того чтобы поддерживать постоянную мощность, E должно быть равно энергии, которую получает двигатель от сгорания топлива.

Таким образом, для поддержания мощности при изменении состава топлива, масса подаваемого топлива должна изменяться обратно пропорционально теплотворной способности топлива:

$$m_f = \frac{E}{Q_f}. \quad (4)$$

Соответственно масса топлива будет увеличиваться при переходе на биодизельное топливо.

Таким образом, анализ показал, что для эффективного использования смесового топлива необходимы новые подходы к адаптации топливных систем, так как для поддержания заданной мощности, необходимо учитывать состав смеси. Существующие решения с механическими ТНВД работают на жестко заданных параметрах. А решения с ЭБУ опираются на косвенные параметры – температуру, давление, состав выхлопных газов, но не обладают датчиками, которые напрямую определяют процентное содержание биодизеля в смеси. Существующие решения должны включать разработку математических моделей перехода между видами топлива и использование критериев «пренебрежимости» остаточного топлива, что позволит повысить точность управления, снизить эксплуатационные риски и обеспечить устойчивую работу дизельных двигателей на смесях. Предлагаемая адаптивная система позволяет трактору работать на различных типах топлива с возможностью выбора смеси дизеля и биодизеля в реальном времени. Она может быть адаптирована как для ручного управления водителем, так и для автоматического контроля, что делает ее универсальной для различных условий эксплуатации.

В третьей главе «Разработка математической модели переходного режима» подтверждается необходимость контроля смеси в баке для сохранения мощностных характеристик. Была составлена математическая модель, которая

позволяет адаптировать цикловую подачу топлива в зависимости от смеси в баке, момента, оборотов двигателя:

$$Q = f(n, M, S) \quad (5)$$

Однако для реализации модели необходимо провести исследования вязкости топлив, сравнить их плотность (рисунок 1) и разработать систему контроля заправок (рисунок 2), которая сможет оценить процентное содержание биотоплива в топливном баке.

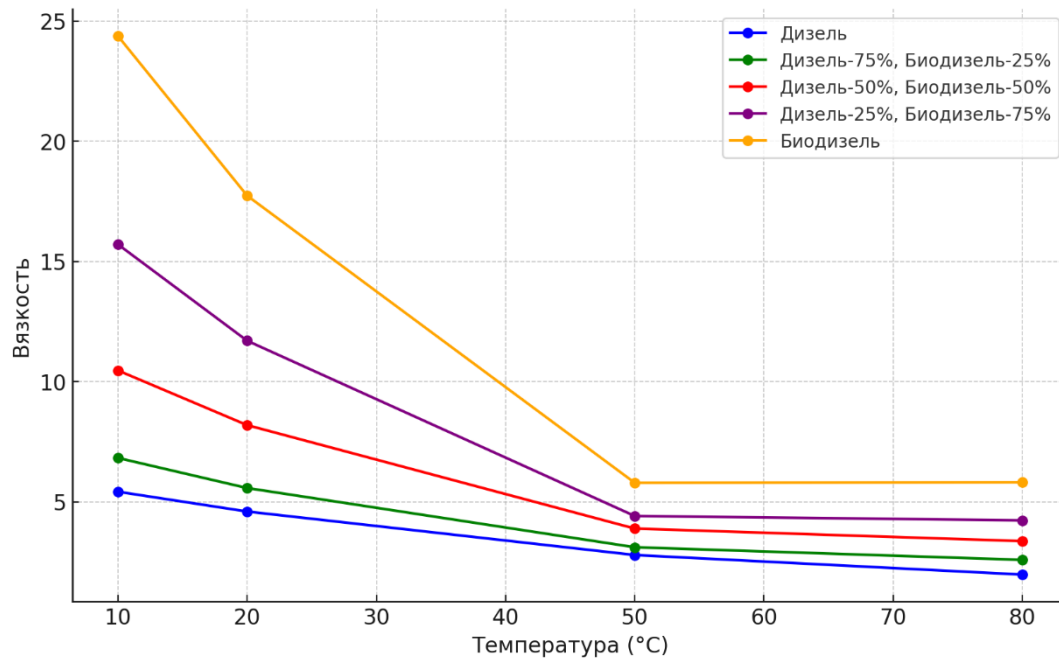


Рисунок 1 – Зависимость вязкости от температуры для различных составов топлива

Для учета всех факторов (вязкости, угла опережения и цикловой подачи топлива) можно построить комбинированную модель, которая будет учитывать взаимодействие всех параметров:

$$Q = k \times \frac{P}{\mu(T, P_{dis}, P_{bio})}, \quad (6)$$

где: Q – цикловая подача,

$\mu(T, P_{dis}, P_{bio})$ – вязкость смеси, вычисляемая через интерполяцию по составу и температуре.

Калькулятор вязкости

Укажите температуру (°C):

Процентное содержание Дизеля (%):

Процентное содержание Биодизеля (%):

Расчет вязкости

Вязкость смеси: 7.5442386418

Рисунок 2 – Графический интерфейс ПО для расчета вязкости

Также был рассмотрен процесс вытеснения неизвестного топлива из бака (рисунок 3).

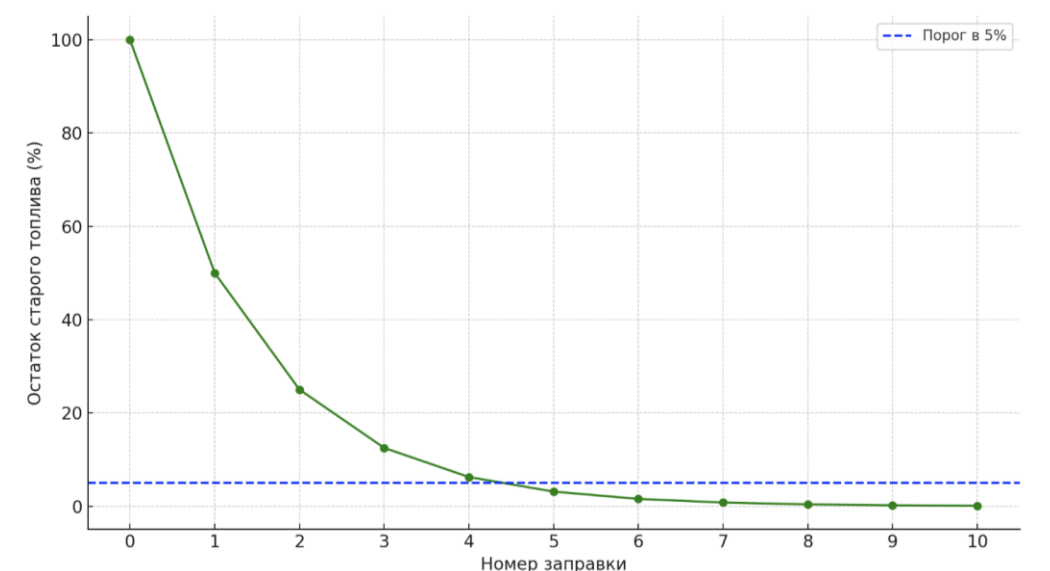


Рисунок 3 – График изменения доли старого топлива

Между заправками расходуем уже смешанное топливо, S считаем постоянным, а при доливке пересчитываем по формуле 3.13:

$$S_{\text{нов}} = \frac{S_{\text{стар}} \times V_{\text{ост}} + S_{\text{дол}} \times V_{\text{дол}}}{V_{\text{ост}} + V_{\text{дол}}}, \quad (6)$$

где $V_{\text{ост}}$ – остаток в баке перед доливкой, $V_{\text{дол}}$ – доливаемый объём.

На рисунке 4 отображена схема работы программы контроля заправок.

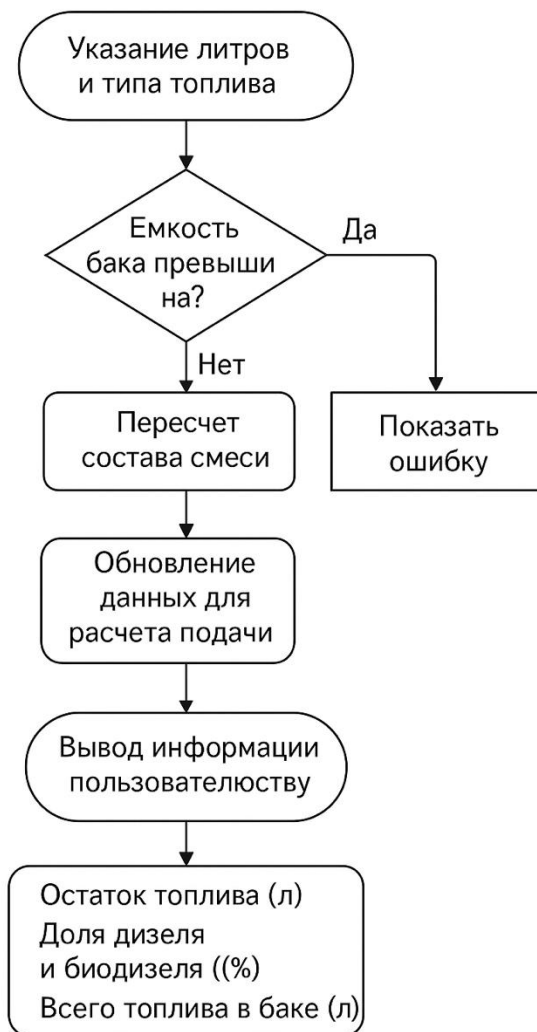


Рисунок 4 – Схема работы модуля контроля заправкок

В программной части предусмотрена связь двух разных способов подсчета подачи топлива: суммарный массовый расход, который модель принимает в кг/ч, и цикловую подачу форсунки, которой оперируют инженеры и калибровки (мм³ на один рабочий цикл одного цилиндра). Эта связь проходит через количество рабочих циклов в секунду и зависит сразу от двух вещей: тактности и числа цилиндров. Для четырехтактного двигателя расчет производится по формуле 7.

$$v_{\text{впр}} = \frac{n \times N_{\text{ц}}}{120} \Rightarrow V_{\text{ц}} = \frac{\frac{Q_m}{3600}}{\rho_{\text{mix}} \left(\frac{n N_{\text{ц}}}{120} \right)} \times 10^6 \quad (7)$$

На основании полученных данных была составлена программа, позволяющая рассчитать количество заправкок, необходимых для перехода на новое топлива (например, биодизель) и модуль контроля заправкок.

В четвертой главе «Экспериментальное исследование модели топливоснабжения» был сформирован план многофакторного эксперимента – ЦКД-подобный план на 15 точек и обоснован его выбор. Предложена методика проведения испытаний, включающая повторяемость, рандомизацию и использование ANOVA для анализа данных. Таким образом, подготовлена база для проведения многофакторного эксперимента и построения модели $Q = f(n, M, S)$. Для регулирования смеси был сконструирован импровизированный топливный бак и переключение подачи регулировалось при помощи встроенных кранов в модифицированную топливную систему (рисунок 5). Эксперимент проводился на двигателе Д-21 (Д-120) и результат эксперимент отображен на рисунке 6.



Рисунок 5 – Топливная магистраль для переключения подачи (основной бак/бак со смесью)

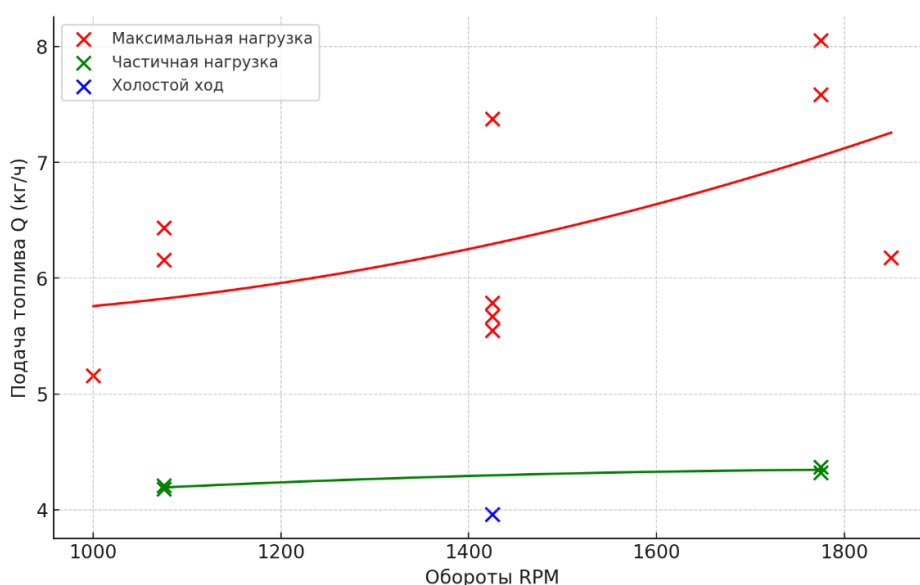


Рисунок 6 – График изменения подачи в зависимости от нагрузки

Полученные экспериментальные данные оказались хорошо согласованы с теоретическими предположениями: наблюдаемый рост массового расхода с увеличением доли биодизеля полностью соответствует расчётам на основе теплотворной способности смеси, а значения на холостом ходу и при малых нагрузках отражают ожидаемое минимальное влияние состава топлива на подачу. Таким образом, проведённый эксперимент подтвердил адекватность предложенной модели, продемонстрировал практическую зависимость расхода топлива от состава смеси и нагрузочных режимов двигателя и позволил сформировать достоверную основу для интеграции β -модели в систему управления подачей топлива.

В пятой главе «Оценка эффективности и практические рекомендации» подтверждается, что разработанная модель дозирования $Q = f(n, M, S)$ обеспечивает сохранение требуемой мощности при переменном составе топлива за счёт автоматической компенсации различий в низшей теплоте сгорания и плотности смеси. Практическая необходимость динамического изменения угла опережения впрыска отсутствует. Оценено влияние математической модели на ресурс двигателя и ТНВД.

Экономическая целесообразность подтверждается снижением непроизводительных потерь времени (устранение «провалов» тяги и повторных проходов), уменьшением внеплановых простоев топливной аппаратуры и расширением возможностей закупки топлива за счёт использования смесей в тёплый период. Качество аппроксимации на контрольной выборке составило $RMSE \leq 5...7 \%$, $R^2 \geq 0,93...0,97$ по Q , при этом отклонение по мощности находится в пределах $3...5 \%$. Совокупный эффект обеспечивает окупаемость внедрения в горизонте одного-двух сезонов при типичных параметрах эксплуатации. Механический предел подачи Q_{max} является необходимым элементом безопасной интеграции: он гарантирует достижимость команд дозирования на всех режимах и предотвращает работу исполнительных органов в насыщении, особенно при высоких оборотах и повышенной вязкости смесей.

Предположим: $H = 1200$ ч/год, $q_D = 10$ л/ч, доля использования смесей $\gamma = 0,7$ (в тёплый период), среднее $S_{avg} \approx 0,3 \Rightarrow k \approx 1$. Смесь дешевле на $|\Delta p| = 3$ руб./л. Машино-час $C_h = 1800$ руб./ч. За счёт стабилизации тяги и отсутствия «провалов» без переработок берём консервативно $\alpha = 5 \%$. Внеплановые простои сокращаются на 10 ч/год при $C_{down} = 3000$ руб./ч.:

$$Saving_{prod} \approx 0,05 * 1200 * 1800 = 108\,000 \text{ руб./год}$$

$$q_{mix} \approx 10 * 1,06 = 10,6 \text{ л/ч}$$

$$Saving_{price} \approx 0,7 * 1200 * 10,6 * 3 \approx 26\,640 \text{ руб./год}$$

$$Saving_{downtime} \approx 10 * 3000 \approx 30\,000 \text{ руб./год}$$

Итого $Saving_{year} = 164\,640$ руб. в год.

Пусть $C_{soft} = 180\,000$ руб. (разработка и калибровка под тип двигателя), сервопривод и датчик $C_{servo} = 60\,000$ руб., итого капиталовложения 240 тыс. руб. Ежегодное сопровождение $C_{maint} = 20\,000$ руб. Тогда срок окупаемости составит:

$$PB = \frac{240000}{164640 - 20000} \approx 1,7 \text{ года.}$$

Для агропромышленного комплекса внедрение модели даёт системный эффект: стабилизация тяги и производительности, предсказуемый расход в терминах «л/га» и «л/т·км», снижение стоимости владения за счёт уменьшения простоев и оптимизации калибровок, а также повышение устойчивости топливного обеспечения за счёт частичного замещения дизеля возобновляемым компонентом. На рисунке 7 отображена схема работы разработанной системы.

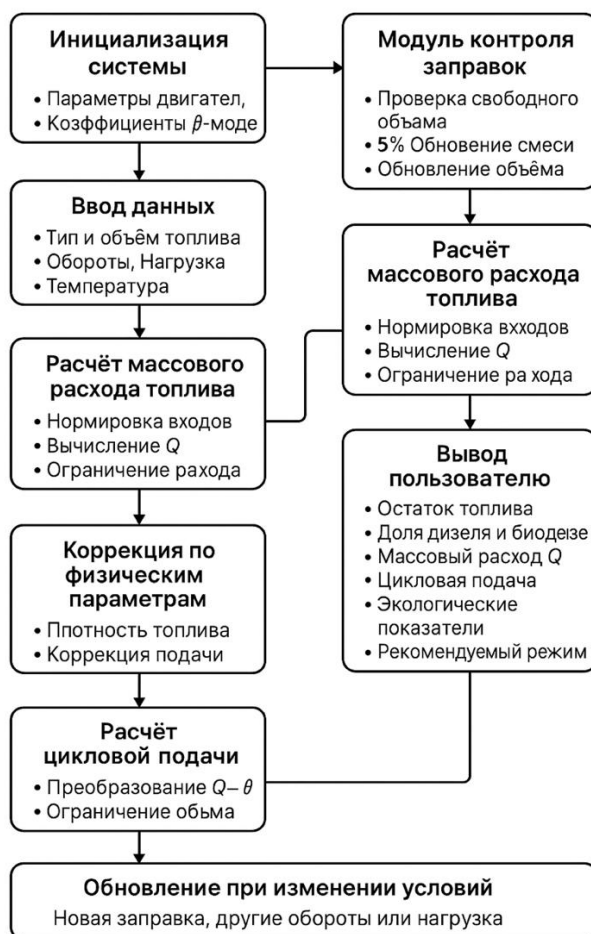


Рисунок 7 – Схема работы адаптивной системы

Достижение прогнозируемого результата зависит от соблюдения регламентов качества топлива (ГОСТ/EN для FAME и смесей), сезонной политики по низкотемпературным свойствам, корректной калибровки базовой карты (для ДТ), обратной зависимости «рычаг/рейка–подача» и дисциплины обслуживания фильтров и водоотделения.

Максимальный практический эффект внедрения разработанного алгоритма математической модели, в случае с механическим ТНВД, обеспечивается при наличии сервопривода на рычаге подачи (закрытый контур по целевой подаче), однако даже режим рекомендательной подпорки оператору снижает разброс по производительности и уменьшает риск ухода в недостижимые режимы. При использовании ЭБУ максимальный эффект достигается путем регулирования времени открытия форсунки при заданном давлении в рампе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана и верифицирована модель $Q = f(n, M, S)$ и алгоритм её интеграции. Построена компактная математическая модель дозирования, связывающая требуемый массовый расход топлива с оборотами n , нагрузкой M и долей биодизеля S . Модель физически согласована с различиями в низшей теплоте сгорания и плотности смесей и реализуема в параметрической (β -модель) форме. Интеграция в контур управления обеспечена через пересчёт «масса в час $\rightarrow$ объём на цикл» и обратную зависимость «рычаг/рейка $\leftrightarrow$ подача» для механических ТНВД, что соответствует заявленной цели – сохранить мощность без датчиков состава и без переключения режимов.

2. Проведён анализ ключевых физико-химических параметров дизеля и биодизеля (плотность, вязкость, теплотворная способность) и их температурных зависимостей:

- низшая теплота сгорания (массовая): ДТ $\approx 42,5$ МДж/кг, а у В100 $\approx 37,5$ МДж/кг;
- энергетический коэффициент для сохранения мощности $k(S)$ растёт от 1,00 (В0) до 1,12...1,14 (В100) по массе и 1,05...1,10 по объёму;
- плотность при 15 °С: ДТ $\approx 0,83...0,85$ кг/л; В100 $\approx 0,86...0,89$ кг/л;
- наибольшая разница заметна при приближении температуры к 0 °С, что ограничивает сезонность применения биодизеля.

Эти параметры введены в модель в виде энергетического коэффициента и поправок по плотности, что позволяет корректно пересчитывать требуемую дозу при любой доле S и температуре топлива. Таким образом, фундаментальные отличия топлив конвертированы в управляемые коэффициенты, доступные для калибровки в ЭБУ.

3. Показано, что основная причина потери тяги при переходе к смесям с биодизелем – снижение подводимой энергии из-за меньшей теплотворной способности и отличий плотности. Модельно и методически доказано, что:

- при фиксированной подаче переход от чистого дизельного топлива к 100 % биодизельному даёт падение развиваемой мощности порядка $\sim 2...3 \%$ / $\sim 6...8 \%$ / $\sim 10...12 \%$ в зависимости от % состава смеси;
- компенсация химических свойств топлива с помощью подачи восстанавливает эквивалентный теплоподвод к цилиндру и удерживает требуемую мощность в пределах допустимого отклонения ($3...5 \%$ в охваченном диапазоне режимов);
- вклад угла опережения впрыска вблизи заводских значений признан вторичным, что упрощает практическую реализацию.

4. Получено аналитическое описание доли «старого» топлива после n полных заправок: $x_n = x_0 \prod r_k$. Выведены формулы для оценки числа заправок до достижения порога по «неизвестному» топливу S_0 , что позволяет формировать регламенты безопасного переключения рабочих стратегий и обосновывать практические допуски по составу. Этот раздел закрывает вопрос о временных переходных процессах в общем баке.

5. Разработана и идентифицирована β -модель эффективной подачи для смешанного состава. В нормированных координатах (n, M, S) получена квадратичная регрессионная модель с взаимодействиями, оцененная методом наименьших квадратов (с опцией взвешивания/риджд-регуляризации). Диагностика по RMSE, R^2 и анализу остатков подтверждает достаточную точность. Введена монотонность по S , исключая нефизичные «зубцы». Для расширения области применимости предусмотрена гибридизация с локальной 3D-картой, что сохраняет вычислительную экономичность и обеспечивает точное следование экспериментальным данным.

6. Сформирован план многофакторного эксперимента (в т.ч. ЦКД-15) для получения измерений $Q(n, M, S)$ и цикловой подачи, а также методика последующей идентификации коэффициентов. В результате:

- показана увязка результатов с исполнительным контуром через обратную карту «рычаг ↔ подача»;
- качество аппроксимации на контрольной выборке: $RMSE \leq 5...7 \%$, $R^2 \geq 0,93...0,97$ по Q ;
- допустимое расхождение целевой мощности после пересчёта «масса → объём на цикл» и обратной карты «рычаг ↔ подача» — не более $\pm 3...5 \%$ в охваченном диапазоне режимов;
- ограничение достижимости команды дозирования: карта $Q_{\max}$ отсекает насыщение по временному окну впрыска.

7. Сформирована безопасная и эффективная стратегия перехода на биодизель при одном баке. Предложен алгоритм эксплуатации: оценка доли S программно (учёт доливок и интеграла расхода), дозирование по $Q = f(n, M, S)$, соблюдение механического предела, а также регламент по порогам «вымывания» старого топлива. Стратегия не требует специальных датчиков состава и динамической подстройки угла впрыска, а потому технологически реализуема на существующем парке тракторов с механическими ТНВД.

8. Была подтверждена практическая ценность и экономический эффект:

- модель стабилизирует тягу и время операций при переменном составе топлива, сокращает непроизводительные повторы и простои на $3...8 \%$, открывает окно для планового применения смесей в тёплый период при соблюдении стандартов качества;
- инженерные расчёты показывают окупаемость программной интеграции в горизонте 1-2 сезонов при типичных фондах времени, а аппаратные доработки минимальны (опциональный сервопривод), основная часть — калибровка ПО;
- при годовой наработке ≈ 1200 ч, базовом расходе ≈ 10 л/ч, доле смесей в тёплый период $\approx 70 \%$ и экономии на смеси ≈ 3 руб./л совокупный годовой эффект порядка 160...180 тыс. рублей (стабилизация производительности + ценовой эффект).
- ориентировочный срок окупаемости 1,7 года.

Рекомендации производству

В двигателях с механическим ТНВД рекомендуется использовать сервопривод для управления подачей, чтобы исключить влияние человеческого фактора. При использовании на иных дизельных ДВС рекомендуется провести первичную проверку теоретического значения подачи с результатом расчета математической модели.

Перспективы дальнейшей разработки темы

Проведенные диссертационные исследования могут служить основой для дальнейшего развития и совершенствования методов поддержания мощностных характеристик двигателя при использовании альтернативных видов топлива.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах

Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Гамов, А. А. Адаптивная топливная система трактора с двухтопливным режимом / А. А. Гамов, Н. Н. Пуляев // Техника и оборудование для села. – 2025. – № 9. – С.17-21.

2. Гамов, А. А. Анализ процесса смешивания оставшегося топлива с биодизелем при многократной заправке дизельного трактора / А. А. Гамов, Н. Н. Пуляев // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета имени П. А. Костычева. – 2018. – № 1. – С. 32-42.

Прочие издания:

3. Гамов, А. А. Автоматизация управления двигателем для экономии топлива и сокращения вредных выбросов в атмосферу в агропромышленном комплексе / А. А. Гамов, Н. Н. Пуляев // Чтения академика В. Н. Болтинского : сборник статей, Москва, 22-23 января 2025 года. – М. : ООО «Сам Полиграфист», 2025. – С. 144-152.