

УДК 651.28:35

4.3.1. Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса (технические науки)

**ЗАВИСИМОСТЬ СОСТАВА ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ТРАКТОРОВ ОТ СОСТОЯНИЯ ТОПЛИВНОЙ АППАРАТУРЫ**

Пуляев Николай Николаевич  
кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры тракторов и автомобилей  
РИНЦ SPIN-код: 1436-9093  
WoS ResearcherID: Q-1349-2017  
Scopus AuthorID: 57217654354  
e-mail: pullman-mpt@mail.ru  
*Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, Россия, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 49*

Федорова София Михайловна  
магистрант кафедры тракторов и автомобилей  
РИНЦ SPIN-код: 1898-9045  
e-mail: fiafec@mail.ru  
*Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, Россия, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 49*

В статье рассматривается взаимосвязь состояния топливной аппаратуры сельскохозяйственных тракторов и состава образующихся отработавших газов. Отмечается, что степень износа плунжерных пар, форсунок и элементов системы впрыска влияет на качество смесеобразования, полноту сгорания топлива и концентрацию токсичных компонентов. Результаты анализа позволили заметить, что нестабильное давление впрыска, нарушение факела распыла и снижение точности дозирования топлива приводят к росту содержания CO, CH, NOx и сажи в выхлопе. Описаны ключевые механизмы влияния неисправностей на экологические показатели работы двигателей тракторов без привязки к конкретным экспериментальным данным. Дополнительно затронуты направления развития современных систем топливоподачи, включая электронный впрыск, интеллектуальные датчики и алгоритмы автодиагностики. Из результатов работы следует полагать, что внедрение инновационных решений позволяет повысить эффективность работы двигателей и снизить вредные выбросы. В конце работы сформулированы практические рекомендации по поддержанию топливной аппаратуры в нормативном состоянии

Ключевые слова: ОТРАБОТАВШИЕ ГАЗЫ, ТРАКТОР, ТОПЛИВНАЯ АППАРАТУРА, ВПРЫСК ТОПЛИВА, ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПОКА-

UDC 651.28:35

4.3.1. Technologies, machinery and equipment for the agro-industrial complex (technical sciences)

**DEPENDENCE OF THE EXHAUST GAS COMPOSITION OF AGRICULTURAL TRACTORS ON THE CONDITION OF THE FUEL EQUIPMENT**

Pulyaev Nikolay Nikolaevich  
Candidate of technical sciences, associate professor,  
Associate Professor, Department of Tractors and Automobiles  
RSCI SPIN-Code: 1436-9093  
WoS ResearcherID: Q-1349-2017  
Scopus AuthorID: 57217654354  
email: pullman-mpt@mail.ru  
*Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, 127434, Russia, Moscow, Timiryazevskaya, 49*

Fedorova Sofiya Mihajlovna  
master's student of the Department of Tractors and Automobiles, RSCI SPIN-Code: 1898-9045  
email: fiafec@mail.ru  
*Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, 127434, Russia, Moscow, Timiryazevskaya, 49*

The article examines the relationship between the state of the fuel equipment of agricultural tractors and the composition of the exhaust gases produced. It noted that the degree of wear of plunger pairs, injectors and injection system elements affects the quality of mixing, the completeness of fuel combustion and the concentration of toxic components. Based on the analysis, it can be seen that unstable injection pressure, a violation of the spray torch and a decrease in the accuracy of fuel metering lead to an increase in the content of CO, CH, NOx and soot in the exhaust. The key mechanisms of the influence of malfunctions on the environmental performance of tractor engines described without reference to specific experimental data. Additionally, the directions of development of modern fuel supply systems, including electronic injection, intelligent sensors and auto-diagnostic algorithms, are touched upon. From the results of the work, it should be assumed that the introduction of innovative solutions makes it possible to increase engine efficiency and reduce harmful emissions. At the end of the work, practical recommendations formulated for maintaining fuel equipment in a standard condition

Keywords: EXHAUST GASES, TRACTOR, FUEL EQUIPMENT, FUEL INJECTION, ENGINE ENVIRONMENTAL PERFORMANCE, EMISSION TOX-

ЗАТЕЛИ ДВИГАТЕЛЯ, ТОКСИЧНОСТЬ ВЫБРОСОВ, ДИАГНОСТИКА ТОПЛИВНОЙ СИСТЕМЫ, ФАКЕЛ РАСПЫЛА

ICITY, FUEL SYSTEM DIAGNOSTICS, SPRAY TORCH

<http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-217-041>

## **Введение**

Российский рынок тракторной техники сегодня переживает заметный подъём, что подтверждается статистикой последних лет. Производство тракторов в России в 2024 году увеличилось на 30,9 % по сравнению с 2023 годом и достигло 77,8 тыс. единиц. Этот показатель превысил уровень 2017 года на 50,6 %, отражая постепенное восстановление отрасли после периода снижения темпов и структурных ограничений. По данным AnalyticResearchGroup, общий объём рынка тракторов в России в 2024 году составил 91,6 тыс. машин, что на 0,7 % выше уровня предыдущего года. Несмотря на то, что среднегодовой темп роста с 2017 по 2024 годы остаётся отрицательным (–6,55 %), аналитики прогнозируют смену тренда и переход к устойчивому росту [1]. Усиление внутреннего производства, технологическое обновление предприятий и повышение спроса со стороны аграрного сектора формируют предпосылки для дальнейшего развития рынка.

Становится ясно, что на фоне роста парка тракторной техники усиливается внимание к экологическим характеристикам двигателей, поскольку именно сельскохозяйственные машины часто работают в непосредственной близости от почвы, зелёных насаждений и зон проживания людей. Одной из ключевых проблем выступает зависимость состава отработавших газов от состояния топливной аппаратуры. Любые отклонения в работе плунжерных пар, форсунок и механизмов впрыска напрямую влияют на полноту сгорания топлива и уровень токсичных выбросов. Увеличение доли CO, углеводородов, оксидов азота и сажевых частиц не только снижает экологичность машин, но и приводит к дополнительным расходам

<http://ej.kubagro.ru/2026/03/pdf/41.pdf>

топлива, падению мощности и росту эксплуатационных затрат для хозяйств. На основе вышеизложенного следует полагать, что изучение влияния технического состояния топливной аппаратуры на состав выхлопных газов тракторных двигателей становится важной научной и практической задачей. Цель статьи заключается в анализе основных факторов, определяющих изменение состава отработавших газов, рассмотрении возможных инновационных подходов к диагностике и улучшению работы топливной системы, а также в формировании рекомендаций по снижению токсичности выбросов без привязки к конкретным экспериментальным данным.

### **Результаты и обсуждение**

В результате анализа публикаций последних лет можно отметить, что состояние топливной аппаратуры напрямую определяет химический состав и токсичность отработавших газов тракторных дизелей. Ключевую роль здесь играет качество смесеобразования: любая деформация факела распыла или отклонение от номинального давления впрыска сразу меняет пропорции кислорода и топлива в зоне сгорания. При износе плунжерной пары давление впрыска снижается иногда на 10...15 %, что приводит к укрупнению капель топлива и ухудшению испарения. По мнению В. Н. Ложкина и А. И. Фомичева (2023), такая ситуация формирует цепочку последствий – рост доли неполностью сгоревших углеводородов в выхлопе, увеличение концентрации СО и повышение дымности [2]. Авторы подчёркивают, что нестабильная работа форсунок обычно сопровождается повышением содержания СН в среднем на 8...12 %. Эта тенденция подтверждается и в практических эксплуатационных наблюдениях, что позволяет говорить о высокой чувствительности экологических параметров к состоянию аппаратуры [3]. На основе этих данных можно полагать, что даже небольшие отклонения в геометрии или регулировке элементов топливной системы оказывают заметное влияние на состав выхлопа.

Исследования также демонстрируют, что нарушение равномерности впрыска по цилиндрам приводит к неравномерности температурного поля в камере сгорания. По мнению С. А. Плотникова, А. Н. Карташевича, М. В. Смольникова и А. И. Шипина (2021), разница в подаче топлива между цилиндрами иногда достигает критических значений, что провоцирует локальное переобогащение смеси и увеличивает образование сажи [4]. Авторы подчеркивают, что при работе на многокомпонентных биотопливных смесях влияние неисправностей форсунок на состав отработавших газов становится ещё более выраженным, поскольку биокомпоненты чувствительны к качеству распыла. По результату рассмотренных исследований можно увидеть, что при снижении качества впрыска содержание NO<sub>x</sub> может увеличиваться на 5...7 % за счёт повышения температуры сгорания в отдельных зонах, где смесь оказывается более плотной и горит дольше. Такая неравномерность критична для тракторов, работающих в длительных нагрузочных режимах, когда колебания характеристик впрыска начинают накапливаться и провоцировать прогрессирующее ухудшение экологических показателей.

Отдельного внимания заслуживает вопрос экономичности, поскольку отклонения в работе топливной аппаратуры затрагивают не только состав выхлопа, но и расход топлива. Как считают В. П. Квашин, А. Г. Щербакова и С. В. Захаров (2018), некорректная регулировка форсунок способна увеличивать расход топлива на 4...9 %, что автоматически повышает объем выбросов CO<sub>2</sub>, являющегося конечным продуктом окисления углеводородов [5]. Авторы подчеркивают, что аграрные предприятия нередко недооценивают влияние точности регулировки аппаратуры на экономическую составляющую эксплуатации. На основе их выводов можно допустить, что по мере старения тракторного парка эта проблема будет проявляться всё сильнее, если не выполнять своевременную диагностику и обслуживание форсунок и ТНВД. В этом контексте состояние аппаратуры

оказывает двойное влияние: ухудшает процесс сгорания и увеличивает общий углеродный след хозяйства.

Изменение состава отработавших газов связано также с параметрами температурного режима двигателя. Как выявлено из материалов А. П. Иншакова, И. И. Курбакова, М. С. Курбаковой и С. А. Гаранина (2018), температура выхлопных газов увеличивается при росте нагрузки и при нарушениях подачи топлива может отклоняться от номинала на 20...40 °С [6]. Такая тенденция усиливает образование NO<sub>x</sub>, поскольку именно высокотемпературные зоны создают условия для активного связывания азота с кислородом. Авторы показывают, что по температуре выхлопа возможно косвенно судить о состоянии системы впрыска, поскольку стабильность тепловой картины снижается при износе форсунок и нарушении фаз впрыска. По результату анализа этой работы можно утверждать, что температурные аномалии нередко выступают индикатором неисправностей, влияющих на экологические характеристики двигателя, и позволяют прогнозировать дальнейшее ухудшение состава отработавших газов. На основе вышеизложенного следует полагать, что связь между состоянием топливной аппаратуры и составом отработавших газов носит нелинейный и комплексный характер. Ухудшение работы форсунок или ТНВД отражается сразу на нескольких группах соединений:

- угарный газ увеличивается из-за неполной степени окисления топлива;
- углеводороды накапливаются вследствие плохого распыла и недогорания капель;
- оксиды азота растут при появлении локальных высокотемпературных зон;
- сажа усиливается в условиях плотного распыла и переобогащённой смеси.

Эта взаимосвязь подтверждается как инженерными расчётами, так и эксплуатационными наблюдениями, что позволяет рассматривать состоя-

ние топливной аппаратуры как ключевой фактор экологической устойчивости сельскохозяйственных тракторов [7]. В результате систематизации анализируемых характеристик работы топливной аппаратуры и их влияния на состав отработавших газов была сформирована расширенная Таблица 1, отражающая ключевые взаимосвязи между техническим состоянием системы впрыска и экологическими параметрами тракторных дизелей. Структура позволяет наглядно оценить, какие отклонения наиболее критичны и каким образом они искажают химический состав выхлопа.

Таблица 1 – Влияние состояния топливной аппаратуры на состав отработавших газов сельскохозяйственных тракторов

Аспект влияния	Параметр топливной аппаратуры	Характер отклонения	Последствия для процесса сгорания	Изменение состава отработавших газов	Возможные масштабы изменений
Качество смесеобразования	Давление впрыска	Понижение на 10...15 %	Крупные капли, неполное испарение	Увеличение СО и СН	СО ↑ на 5...7 %, СН ↑ на 8...12 %
Равномерность подачи топлива	Подача по цилиндрам	Разброс 6...10 %	Различная плотность смеси, перегрев отдельных зон	Дымность и сажа ↑	Сажа ↑ на 10...18 %
Геометрическая стабильность распыла	Состояние форсунок	Износ сопловых отверстий	Деформация факела, плотная струя	Рост NO <sub>x</sub> , СН, сажевых частиц	NO <sub>x</sub> ↑ на 5...7 %, сажа ↑ на 10 %
Точность управления впрыском	Момент начала впрыска	Смещение фаз сгорания	Повышение температуры ОГ	Рост NO <sub>x</sub>	Температура ОГ ↑ на 20...40 °С
Топливная экономичность	Количество впрыскиваемого топлива	Перелив на 4...9 %	Переобогащение смеси, неполное окисление	Увеличение CO <sub>2</sub> , СО	CO <sub>2</sub> ↑ пропорционально 4...9 % прироста расхода
Однородность процесса сгорания	Качество распыла	Ухудшение дробления струи	Наличие зон недогорания топлива	Рост СН и сажи	СН ↑ на 10...15 %, сажа ↑ на 12...16 %
Температурная стабильность выхлопа	Температура ОГ	Отклонение от нормы на 20...40 °С	Нестабильное сгорание и образование горячих зон	Повышенное образование NO <sub>x</sub>	NO <sub>x</sub> ↑ на 5...10 %
Работа ТНВД	Износ плунжерных пар	Снижение давления, пульсации	Неравномерное наполнение цилиндров	Увеличение СО, снижение мощности	СО ↑ до 10 %
Мелкодисперсность капель	Степень распыла топлива	Увеличение среднего диаметра капель	Задержка испарения	СН ↑, дымность ↑	Дымность ↑ на 8...14 %
Устойчивость холостого хода	Регулировка топливной рейки	Чрезмерная подача на малых оборотах	Переобогащение смеси	Повышение СН, СО	СН ↑ на 10 %, СО ↑ на 7 %

Анализ приведённых данных показывает, что состояние топливной аппаратуры оказывает комплексное влияние на весь спектр экологических характеристик тракторных двигателей. В результате обобщения можно утверждать, что ключевыми зонами риска остаются давление впрыска, геометрическая стабильность распыла и точность регулировки ТНВД. Эти параметры формируют базовую картину процесса сгорания и напрямую задают пропорции CO, CH, NOx и сажевых частиц в выхлопе [8]. На основе вышеизложенного следует полагать, что своевременная диагностика и точная настройка элементов системы впрыска способны снизить токсичность выбросов на 10...20 % и обеспечить более устойчивую работу техники в условиях АПК.

В результате проведённого обобщения можно заметить, что выявленная взаимосвязь между состоянием топливной аппаратуры и составом отработавших газов выступает не только экологически значимым фактором, но и важнейшим диагностическим инструментом. Химический состав выхлопа тракторного дизеля реагирует на любое отклонение в характеристиках впрыска быстрее, чем большинство механических компонентов системы. Это делает выхлопные газы своеобразным «маркером состояния» топливной аппаратуры, позволяя выявлять скрытые неисправности ещё до того, как они перейдут в стадию критического отказа. По мнению многих исследователей, диагностика тракторных двигателей через мониторинг состава ОГ даёт возможность формировать прогнозы технического состояния без необходимости разборки аппаратуры [9]. Изменение концентрации CO, CH, NOx и сажевых частиц может использоваться как входной параметр в модели прогнозирования износа форсунок и ТНВД. В практических условиях хозяйств это особенно важно, поскольку тракторы часто работают в длительных циклах под переменной нагрузкой, и контроль состава отработавших газов становится одним из самых доступных и точных способов оценки состояния впрыска. На основе вышеизложенного следует по-

лагать, что данные изменения могут быть интегрированы в математические модели технического состояния. Одной из базовых зависимостей, используемых при оценке качества смесеобразования, становится связь концентрации несгоревших углеводородов и параметров распыла:

$$CH \propto \frac{d_{\text{кап}}^3}{P_{\text{впр}}},$$

где  $CH$  - концентрация углеводородов в отработавших газах;

$d_{\text{кап}}$  - средний диаметр капель топлива в факеле распыла;

$P_{\text{впр}}$  - давление впрыска топлива.

Рост диаметра капель при снижении давления впрыска приводит к нелинейному увеличению доли несгоревших углеводородов. Эта связь подтверждается как теоретическими моделями, так и эксплуатационными наблюдениями. Другой показатель, используемый для диагностики температуры выхлопа и образования  $NO_x$ , связывает температуру в камере сгорания с качеством распыла и моментом впрыска:

$$NO_x \approx k * e^{\frac{T_{\text{ц}}}{100}},$$

где  $NO_x$  - концентрация оксидов азота,

$T_{\text{ц}}$  - температура в зоне максимального тепловыделения,

$k$  - коэффициент, отражающий тип двигателя и характеристики смеси.

Рост температуры в результате смещения угла опережения впрыска или нарушения равномерности подачи топлива сразу увеличивает образование  $NO_x$ , что даёт возможность использовать этот показатель как индикатор нарушений в управлении впрыском. Полученные зависимости позволяют не только объяснять наблюдаемые изменения состава выхлопных газов, но и применять их в прогнозных моделях. На основе систематизации данных выхлопа можно формировать прогноз износа элементов топливной аппаратуры, оценку стабильности смесеобразования под фактическими



нагрузками, предиктивные модели технического обслуживания, снижающие риски аварийных отказов.

На практике это может выражаться в переходе к обслуживанию «по состоянию», когда решение о регулировке или замене форсунок принимается на основе динамики концентраций вредных веществ в ОГ, а не по календарному пробегу. Такая стратегия повышает эффективность эксплуатации тракторов и сокращает расходы на ремонт. В итоге выявленная зависимость состава отработавших газов от состояния топливной аппаратуры приобретает комплексное значение – она определяет экологическую безопасность машин, служит основой для точной диагностики и формирует базу для построения интеллектуальных систем прогнозирования износа топливной аппаратуры в технике, используемой в агропромышленном комплексе [10]. Ниже представлен пример графика зависимости концентрации несгоревших углеводородов (СН) от давления впрыска топлива (рисунок 1). Это иллюстрация типичной тенденции – при снижении давления распыл ухудшается, средний диаметр капель растёт, смесь сгорает менее полно, и концентрация СН в выхлопе увеличивается.

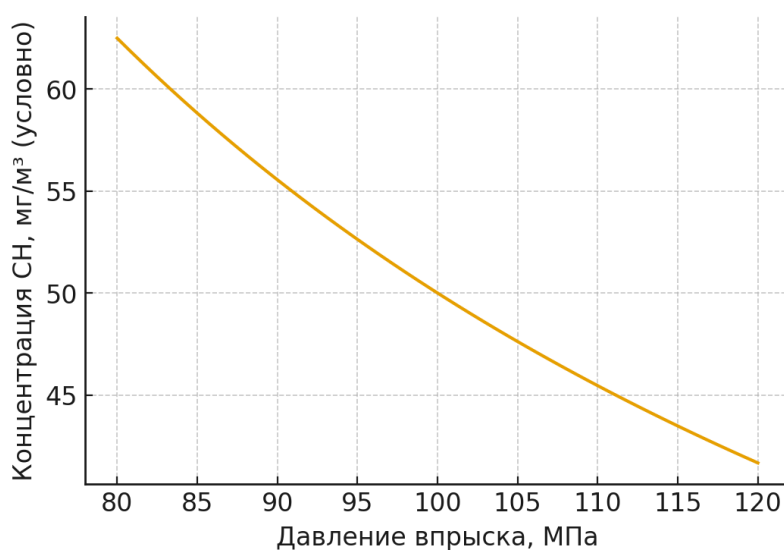


Рисунок 1 – Пример зависимости концентрации СН от давления впрыска

Представленный график демонстрирует, как меняется концентрация СН (условные единицы) при колебаниях давления впрыска от 80 до 120 МПа. Видно, что зависимость имеет выраженный обратный характер. Чем ниже давление, тем выше концентрация углеводородов в отработавших газах. Такой тренд подтверждает практические наблюдения и моделирование: при снижении давления впрыска хотя бы на 10...15 % качество распыла ухудшается настолько, что содержание СН может увеличиваться на 8...12 %. В эксплуатационных условиях это превращается в заметное повышение дымности, нестабильность холостого хода и снижение мощности. Эта кривая иллюстрирует общий механизм, лежащий в основе связи между техническим состоянием топливной аппаратуры и экологическими характеристиками тракторного дизеля. В реальных диагностических системах подобные зависимости используются как входные параметры для прогнозных моделей, позволяющих оценивать износ форсунок или некорректную регулировку ТНВД без разборки двигателя.

В результате анализа теоретических моделей, литературы и эксплуатационных наблюдений можно отметить, что взаимосвязь между состоянием топливной аппаратуры и составом отработавших газов формирует устойчивую систему причинно-следственных связей. Любое отклонение в качестве распыла, точности дозирования или моменте начала впрыска немедленно отражается на химическом составе выхлопа. На основе вышеизложенного следует полагать, что сам по себе состав отработавших газов является индикатором внутренних процессов в цилиндре, а значит позволяет судить о правильности работы элементов впрыска. Выявленные закономерности сводятся к нескольким ключевым положениям. Снижение давления впрыска вызывает укрупнение капель топлива, что ведёт к росту концентрации несгоревших углеводородов и угарного газа. Износ сопловых отверстий форсунок деформирует факел, увеличивает зоны локального переобогащения смеси, что обычно сопровождается ростом сажи и уве-

личением температурных пиков, влияющих на образование NOx. Нарушение момента начала впрыска, даже в пределах 1...2°, приводит к смещению фаз горения и изменению температурной картины, что отражается на изменении пропорций оксидов азота. Все эти факторы носят системный характер и проявляются независимо от модели двигателя, что позволяет использовать их универсально для тракторной техники.

В результате анализа представленных зависимостей можно допустить, что корректировка этих параметров, своевременная диагностика и внедрение современных технологий топливной подготовки способны существенно улучшить экологические показатели сельскохозяйственных тракторов [11]. В первую очередь это касается форсуночных систем нового поколения с многодырочными распылителями, электронного управления моментом впрыска и применения альтернативных видов топлива с улучшенными характеристиками испаряемости. Ниже дана таблица 2 с рекомендациями по коррекции выявленных отклонений.

Таблица 2 – Рекомендации по устранению нарушений, влияющих на состав отработавших газов

Выявленное отклонение	Характер влияния на состав ОГ	Рекомендуемые действия	Возможные технологии / решения
Пониженное давление впрыска	Рост CO и CH, ухудшение распыла	Проверить плунжерную пару, выполнить регулировку ТНВД	Использование износостойких плунжерных пар; применение электронного управления подачей
Нарушение геометрии факела распыла	Повышение сажи, локальные зоны недогорания	Очистка или замена форсунок	Многодырочные форсунки; форсунки с DLC-покрытием
Смещение момента начала впрыска	Рост NOx и повышение температуры	Регулировка угла опережения впрыска	Электронное управление фазами впрыска, применение ЭБУ
Неравномерность подачи по цилиндрам	Дымность, потеря мощности	Регулировка секций ТНВД, проверка трубок высокого давления	Системы Common Rail с коррекцией по каждому цилиндру
Увеличение среднего диаметра капель топлива	Повышение CH и сажи	Оптимизация распыла, проверка распылителей	Использование топлива с улучшенной испаряемостью; добавки-диспергаторы
Износ форсунок	Деформация факела, повышенный расход	Замена или восстановление форсунок	Наноструктурные покрытия сопловых отверстий
Колебание температуры отработавших газов	Рост NOx, нестабильность сгорания	Диагностика термонагруженности двигателя	Мониторинг ЕГТ-датчиками; тепловизионная диагностика
Повышенный расход топлива	Рост CO <sub>2</sub> и CO	Проверка регулировки рейки, секций, уплотнений	Применение интеллектуальных систем управления впрыском

Результаты показывают, что зависимость состава отработавших газов от состояния топливной аппаратуры является системообразующим фактором как с точки зрения экологии, так и с позиции технической диагностики. Состав отработавших газов выступает чувствительным индикатором качества смесеобразования, позволяя выявлять даже незначительные отклонения в работе форсунок, ТНВД и элементов системы впрыска. На основе вышеизложенного следует полагать, что применение современных технологий впрыска, внедрение прогнозной диагностики и регулярная корректировка параметров топливной аппаратуры способны снизить токсичность выбросов на 10...20 % и повысить ресурс основных узлов двигателя. Системный подход к анализу состава отработавших газов становится важным инструментом повышения эффективности эксплуатации сельскохозяйственных тракторов и обеспечения экологической безопасности сельскохозяйственной техники.

Необходимо отметить, что в контексте рассмотренной зависимости особую значимость приобретает развитие современных систем топливоподачи, которые становятся всё более интеллектуальными и адаптивными. Важно подчеркнуть, что переход к электронному управлению впрыском позволяет контролировать давление, длительность и фазу подачи топлива с высокой точностью, что стабилизирует процесс смесеобразования даже при частичном износе отдельных узлов. Инновационным направлением становится внедрение интеллектуальных датчиков, регистрирующих параметры распыла, температуры выхлопа и вибросигнатуры форсунок в режиме реального времени (Таблица 3). Эти данные используются алгоритмами автодиагностики, которые прогнозируют отклонения, формируют рекомендации по обслуживанию и автоматически корректируют режимы впрыска. На основе таких возможностей можно полагать, что цифровизация систем топливоподачи станет ключевым фактором снижения токсичности отработавших газов, повышения энергоэффективности тракторных

двигателей и перехода к обслуживанию по фактическому состоянию техники.

Таблица 3 – Современные инновации в системах топливоподачи сельскохозяйственных тракторов и их эффект

Технология / решение	Суть инновации	Ожидаемый эффект на состав ОГ	Диагностическая ценность
Электронный впрыск (EFI)	Точное управление фазами, давлением и количеством впрыска	Снижение СН и СО на 10...15 %, уменьшение сажи	Высокая детализация состояния работы форсунок
Интеллектуальные датчики давления и температуры	Непрерывный мониторинг параметров смесеобразования	Стабилизация сгорания, снижение пиков NOx	Раннее обнаружение отклонений впрыска
Системы прогнозной диагностики (Predictive Maintenance)	Алгоритмы анализа трендов параметров ОГ	Уменьшение токсичности и расхода топлива	Прогноз износа форсунок и секций ТНВД
Многодырочные распылители с нанопокрытиями	Улучшение дисперсности и устойчивости факела	Снижение сажи на 12...20 %	Снижение чувствительности к износу
Датчики качества распыла (оптические/вибрационные)	Анализ структуры факела в реальном времени	Более полное сгорание топлива	Выявление деформации факела на ранних этапах

Суммируя представленные результаты исследования, следует подчеркнуть, что внедрение современных цифровых и аппаратных решений в систему топливоподачи радикально усиливает контроль над процессом смесеобразования и позволяет уменьшить токсичность отработавших газов. Интеллектуальные датчики, электронный впрыск и алгоритмы автодиагностики обеспечивают устойчивую работу двигателя и создают основу для обслуживания по фактическому состоянию, что особенно важно для интенсивно эксплуатируемых сельскохозяйственных тракторов.

### Заключение

Выполненная работа показала, что состав отработавших газов сельскохозяйственных тракторов формируется под сильным влиянием состояния топливной аппаратуры, а любые отклонения в характеристиках впрыска немедленно отражаются на пропорциях СО, СН, NOx и сажевых частиц. В результате анализа можно отметить, что ключевыми факторами риска

являются снижение давления впрыска, износ форсунок, нарушение равномерности подачи топлива по цилиндрам и смещение момента начала впрыска. Эти параметры определяют полноту сгорания топлива и температурный режим камеры сгорания, что превращает отработавшие газы в чувствительный индикатор состояния двигателя. На основе вышеизложенного следует полагать, что оценка состава отработавших газов может рассматриваться как полноценный диагностический инструмент, позволяющий выявлять скрытые дефекты топливной аппаратуры ещё на ранних стадиях.

Вместе с тем перспективные направления развития систем топливоподачи – электронный впрыск, интеллектуальные датчики, многодырочные распылители и алгоритмы автодиагностики создают условия для устойчивого снижения токсичности тракторных выбросов и перехода к техническому обслуживанию по фактическому состоянию. Внедрение таких решений позволяет стабилизировать процесс смесеобразования, уменьшить влияние износа на экологические показатели и повысить эффективность эксплуатации тракторного парка. В совокупности результаты статьи подчёркивают необходимость комплексного подхода к поддержанию работоспособности топливной аппаратуры, что становится важным элементом экологически ответственного и экономически эффективного аграрного производства.

#### Список литературы

1. Сельхозтехника в России [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://clck.ru/3QarrH> (дата обращения: 17.11.2025 г.).

2. 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.

3. Пуляев, Н. Н. экспериментальный анализ экологических показателей тракторов МТЗ-82.1 / Н. Н. Пуляев, А. С. Павлов // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2025. – № 211. – С. 850-859. – DOI 10.21515/1990-4665-211-071.

4. Оценка регулировочных показателей двигателя сельскохозяйственных транспортных средств при применении многокомпонентных биотоплив / С. А. Плотников,

А. Н. Карташевич, М. В. Смольников, А. И. Шипин // Вестник РГАТУ. – 2021. – № 1. – С. 149-155.

5. Квашин, В. П. Способы экономии топлива в агропромышленном комплексе / В. П. Квашин, А. Г. Щербакова, С. В. Захаров // Вестник ОмГАУ. – 2018. – № 2 (30). – С. 109-115.

6. Определение загрузки автотракторного дизеля с газотурбинным наддувом по температуре отработавших газов и частоте вращения вала турбокомпрессора / А. П. Иншаков, И. И. Курбаков, М. С. Курбакова, С. А. Гаранин // Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии. – 2018. – № 4. – С. 57-63.

7. Пуляев, Н. Н. Аналитические исследования экологических показателей тягово-транспортных средств на полевых работах / Н. Н. Пуляев, А. С. Павлов // Техника и оборудование для села. – 2025. – № 6(336). – С. 10-14. – DOI 10.33267/2072-9642-2025-6-10-14.

8. Экспериментальные исследования улучшения токсических характеристик газодизеля / В. Л. Чумаков, С. Н. Девянин, А. В. Бижаев, А. В. Капустин // Чтения академика В.Н. Болтинского : Сборник статей семинара, Москва, 20-21 января 2021 года. Часть 2. – М. : ООО «Сам полиграфист», 2021. – С. 104-112.

9. Пуляев, Н. Н. Обзор факторов, влияющие на расход топлива на транспортных средствах / Н. Н. Пуляев, Н. Н. Пуляев // Чтения академика В. Н. Болтинского : Сборник статей, Москва, 22-23 января 2025 года. – М. : ООО «Сам Полиграфист», 2025. – С. 33-39.

10. Результаты экспериментального исследования устройства для энергонасыщения топлива на дизеле Д-243 / Г. З. Кайкацишвили, А. А. Симдянкин, Н. В. Бышов [и др.] // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2014. – № 100. – С. 396-410.

11. Федорова, С. М. Цифровизация в агропромышленном комплексе / С. М. Федорова // Научный форум: Экономика, управление и цифровые технологии в АПК-2024 : Сборник трудов, приуроченных к Международной научно-практической студенческой конференции, Москва, 20 ноября 2024 года. – Москва: Российский государственный аграрный университет, 2024. – С. 323-326.

## References

1. Sel'hoztehnika v Rossii [E`lektronny`j resurs]. – Rezhim dostupa: <https://clck.ru/3QappH> (data obrashheniya: 17.11.2025 g.).

2. Lozhkin, V. N. Teoriya i praktika diagnostirovaniya avarijno-opasny`x rezhi-mov e`kspluatatsii dvigatelej traktornogo i kombajnovogo naznacheniya / V. N. Lozhkin, A. I. Fomichev // Izvestiya SPbGAU. – 2023. – № 4 (73). – S. 116-125.

3. Pulyaev, N. N. e`ksperimental`ny`j analiz e`kologicheskix pokazatelej trakto-rov MTZ-82.1 / N. N. Pulyaev, A. S. Pavlov // Politematicheskij setevoy e`lektronny`j nauchny`j zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2025. – № 211. – S. 850-859. – DOI 10.21515/1990-4665-211-071.

4. Ocenka regulirovochny`x pokazatelej dvigatelya sel`skoxozyajstvenny`x transportny`x sredstv pri primenении mnogokomponentny`x biotopliv / S. A. Plotnikov, A. N. Kartashevich, M. V. Smol`nikov, A. I. Shipin // Vestnik RGATU. – 2021. – № 1. – S. 149-155.

5. Kvashin, V. P. Sposoby` e`konomii topliva v agropromy`shlennom komplekse / V. P. Kvashin, A. G. Shherbakova, S. V. Zaxarov // Vestnik OmGAU. – 2018. – № 2 (30). – S. 109-115.

6. Opredelenie zagruzki avtotraktornogo dizelya s gazoturbinnym nadduvom po temperature otrabotavshix gazov i chastote vrashheniya vala turbokompressora / A. P. Inshakov, I. I. Kurbakov, M. S. Kurbakova, S. A. Garanin // Izvestiya Samarskoj gosudarstvennoj sel'skoxozyajstvennoj akademii. – 2018. – № 4. – S. 57-63.

7. Pulyaev, N. N. Analiticheskie issledovaniya e`kologicheskix pokazatelej tyago-vo-transportny`x sredstv na polevy`x rabotax / N. N. Pulyaev, A. S. Pavlov // Texnika i oborudovanie dlya sela. – 2025. – № 6(336). – S. 10-14. – DOI 10.33267/2072-9642-2025-6-10-14.

8. E`ksperimental`ny`e issledovaniya uluchsheniya toksicheskix xarakteristik gazodizelya / V. L. Chumakov, S. N. Devyanin, A. V. Bizhaev, A. V. Kapustin // Chteniya akademika V.N. Boltinskogo : Sbornik statej seminara, Moskva, 20-21 yanvarya 2021 goda. Chast` 2. – M. : OOO «Sam poligrafist», 2021. – S. 104-112.

9. Pulyaev, N. N. Obzor faktorov, vliyayushhie na rasxod topliva na transportny`x sredstvax / N. N. Pulyaev, N. N. Pulyaev // Chteniya akademika V. N. Boltinskogo : Sbornik statej, Moskva, 22-23 yanvarya 2025 goda. – M. : OOO «Sam Poligrafist», 2025. – S. 33-39.

10. Rezul`taty` e`ksperimental'nogo issledovaniya ustrojstva dlya e`nergonasy`shheniya topliva na dizele D-243 / G. Z. Kajkacishvili, A. A. Simdyankin, N. V. By`shov [i dr.] // Politematicheskij setevoj e`lektronny`j nauchny`j zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2014. – № 100. – S. 396-410.

11. Fedorova, S. M. Cifrovizaciya v agropromy`shlennom komplekse / S. M. Fedorova // Nauchny`j forum: E`konomika, upravlenie i cifrovy`e tehnologii v APK-2024 : Sbornik trudov, priurochenny`x k Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj studencheskoj konferencii, Moskva, 20 noyabrya 2024 goda. – Moskva: Rossijskij gosudarstvenny`j agrarny`j universitet, 2024. – S. 323-326.