

На правах рукописи



РОМАНОВ Сергей Вячеславович

**ПОВЫШЕНИЕ ТОПЛИВНОЙ ЭКОНОМИЧНОСТИ
ДВИГАТЕЛЕЙ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ
МАШИННО-ТРАКТОРНЫХ АГРЕГАТОВ ПУТЕМ
ПРИМЕНЕНИЯ ВОДНОЙ ИНЖЕКЦИИ**

Специальность 05.20.01 – Технологии и средства механизации
сельского хозяйства

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Троицк – 2017

Работа выполнена на кафедре «Технические системы в АПК» ФГБОУ ВО «Государственный аграрный университет Северного Зауралья».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Старцев Андрей Васильевич

Официальные оппоненты: **Карнаухов Владимир Николаевич**,
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Эксплуатация
автомобильного транспорта», ФГБОУ ВО
«Тюменский индустриальный
университет» (г. Тюмень)

Новопашин Леонид Алексеевич,
кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой «Тракторы
и автомобили», ФГБОУ ВО «Уральский
государственный аграрный университет»
(г. Екатеринбург)


Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Уральский государственный
лесотехнический университет»
(г. Екатеринбург)

Защита состоится «23» июня 2017 г., в 15.00 часов на заседании диссертационного совета Д 220.066.02 на базе ФГБОУ ВО Южно-Уральский ГАУ по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 75.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО Южно-Уральский ГАУ: <http://юургау.рф>.

Автореферат разослан «__» мая 2017 г. и размещен на официальном сайте ВАК при Министерстве образования и науки России <http://vak.ed.gov.ru> и на сайте ФГБОУ ВО Южно-Уральский ГАУ: <http://юургау.рф>.

Ученый секретарь
диссертационного
совета



Запевалов
Михаил Вениаминович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Повышение производительности и топливной экономичности машинно-тракторных агрегатов (МТА) определяет эффективность механизированных процессов в сельскохозяйственном производстве. В настоящее время доля потребления энергоресурсов сельским хозяйством Российской Федерации составляет около 12,5% от общего энергопотребления страны. Учитывая постоянный рост цен на энергоносители и достигнутый на сегодняшний день уровень механизации производственных процессов, становится очевидным приоритетное влияние энергетических ресурсов не только на себестоимость произведенной продукции и трудоемкость производства, но и в целом на конечные показатели развития сельского хозяйства. Возросшие требования к топливной экономичности вызывают необходимость улучшения технико-экономических показателей работы машинно-тракторных агрегатов и их энергетических установок, которые представлены двигателями внутреннего сгорания. В этой связи тема диссертационной работы, посвященная повышению топливной экономичности машинно-тракторных агрегатов, является достаточно актуальной, а ее результаты практически значимыми.

Степень разработанности темы. Анализ известных научных исследований в области повышения топливной экономичности МТА показал, что к настоящему времени сформирована определенная теоретическая и экспериментальная база. Определено, что основными требованиями, предъявляемыми к конструкции разрабатываемых сельскохозяйственных машин и двигателей, являются не только обеспечение высокой надежности, универсализации, упрощение и удешевление конструкции, но и повышение их производительности и топливной экономичности. Несмотря на большое методологическое и теоретическое значение научно-исследовательских работ, в них не в полной мере отражены вопросы влияния водной инжекции на повышение топливной экономичности и экологической безопасности двигателей сельскохозяйственных машинно-тракторных агрегатов. Актуальность и недостаточная разработанность данного направления научного поиска обусловили постановку задач и цели исследования.

Цель исследования: повышение топливной экономичности и экологической безопасности при эксплуатации в сельскохозяйственном производстве машинно-тракторных агрегатов, составленных

на базе тракторов класса 1,4 с двигателем 4Ч 11/12,5, путем применения водной инжекции.

Для достижения поставленной цели решали следующие **задачи**:

1. Определить основные параметры распылителя водной форсунки и провести теоретические исследования рабочего процесса дизельного двигателя 4Ч 11/12,5 при применении инжекции воды во впускной коллектор.

2. На базе двигателя Д-240 разработать экспериментальную установку, позволяющую провести комплекс экспериментальных исследований рабочего процесса дизельных двигателей 4Ч 11/12,5 при использовании водной инжекции.

3. Провести лабораторные испытания двигателя и полевые испытания машинно-тракторного агрегата на базе тракторов класса 1,4 с применением водной инжекции.

4. Дать технико-экономическую и экологическую оценку применения водной инжекции для дизельных двигателей в сельскохозяйственном производстве.

Объект исследования: рабочий процесс тракторного дизельного двигателя при применении водной инжекции.

Предмет исследования: закономерности, определяющие взаимосвязь применения водной инжекции с повышением топливной экономичности и экологической безопасности МТА на базе тракторов класса 1,4.

Научная новизна заключается в следующих положениях:

- установлены закономерности, определяющие основные показатели рабочего процесса двигателя внутреннего сгорания при применении водной инжекции;

- уточнена методика теплового расчета дизельного двигателя при применении водной инжекции (на примере дизельного двигателя 4Ч 11/12,5);

- определены основные параметры распылителя водной форсунки, рациональный компонентный состав водотопливной смеси для дизельного двигателя 4Ч 11/12,5 при применении водной инжекции;

- определены технико-экономические, энергетические и экологические показатели использования сельскохозяйственных МТА, составленных на базе тракторов класса 1,4, при применении водной инжекции во впускной коллектор дизельного двигателя 4Ч 11/12,5.

Теоретическая и практическая значимость работы. Установлены теоретические и экспериментальные закономерности, позволя-

ющие определить эффективные показатели работы дизельного двигателя 4Ч 11/12,5 при применении водной инжекции (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016611249 от 28 января 2016 г.).

Предложены новые технические решения, которые путем применения водной инжекции позволяют повысить топливную экономичность и экологическую безопасность сельскохозяйственных машинно-тракторных агрегатов, составленных на базе тракторов класса 1,4 (патент на полезную модель № 166572 от 14.11.2016 г.).

Результаты исследований приняты к внедрению Министерством сельского хозяйства Челябинской области, ФГУП «Учебно-опытное хозяйство Тюменской государственной сельскохозяйственной академии» (ФГУП УЧХОЗ Тюменской ГСХА), ООО «Зерноток» Омутинского района Тюменской области, ООО «БелАн» Тугулымского района Свердловской области, а также используются в учебном процессе ФГБОУ ВО ГАУ Северного Зауралья, ФГБОУ ВО Южно-Уральский ГАУ.

Методология и методы исследования. При выполнении диссертационной работы использовались общенаучные и частные методы исследования, а также методы математического моделирования, совокупность которых соответствовала целям и задачам исследования. В основу проведения экспериментальных исследований легли методики, изложенные в государственных стандартах, распространяющихся на испытания и эксплуатацию сельскохозяйственных машин и тракторов. Применены методики планирования многофакторных экспериментов с последующей обработкой результатов методами регрессионного анализа с использованием программных продуктов Microsoft Excel и Statistica.

Положения, выносимые на защиту:

1. Результаты теоретических исследований по определению индикаторных показателей рабочего процесса дизельного двигателя при применении водной инжекции и их трансформация в эффективные показатели работы сельскохозяйственных машинно-тракторных агрегатов.

2. Уточненная методика теплового расчета дизельного двигателя 4Ч 11/12,5 при применении водной инжекции.

3. Основные параметры конструкции распылителя водной форсунки, рациональный компонентный состав водотопливной смеси для дизельного двигателя при применении водной инжекции.

4. Техничко-экономические, энергетические и экологические показатели использования машинно-тракторных агрегатов на базе тракторов класса 1,4 при применении водной инжекции.

Степень достоверности и апробация результатов исследования подтверждаются корректным использованием математического аппарата и адекватностью разработанных моделей. Достоверность научных результатов и положений подтверждена экспериментальными исследованиями в лабораторных, полевых и производственных условиях.

Основные положения диссертационной работы доложены, обслужены и одобрены на научно-технических конференциях ФГБОУ ВО ГАУ Северного Зауралья (г. Тюмень, 2009...2016 гг.), ФГБОУ ВО Южно-Уральский ГАУ «Достижения науки – агропромышленному производству» (г. Челябинск, 2009...2016 гг.), на Международной научно-практической конференции 17 апреля 2014 г. «Роль науки в развитии общества» ФГБОУ ВО БашГУ (г. Уфа).

Публикации результатов исследований. По материалам исследования опубликовано 14 научных работ, в том числе 6 в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК Министерства образования и науки РФ. Получен патент РФ на полезную модель и свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и приложений. Основная часть диссертации изложена на 162 страницах машинописного текста, содержит 56 иллюстраций и 38 таблиц. Список литературы содержит 153 наименования, из них 8 на иностранных языках.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы исследования, степень ее разработанности, сформулированы цель и задачи диссертационной работы, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, представлены методология и методы диссертационного исследования, положения, выносимые на защиту, степень достоверности и апробация полученных результатов.

В **первой главе** «Состояние вопроса, цель и задачи исследования» рассмотрены основные пути повышения топливной экономич-

ности при эксплуатации машинно-тракторных агрегатов в сельском хозяйстве, преимущества и недостатки использования альтернативных топлив и добавок к основному топливу. В качестве наиболее перспективного пути повышения топливной экономичности и экологической безопасности работы дизельных двигателей сельскохозяйственных МТА предложено использование воды как добавки к основному топливу путем ее инжекции во впускной коллектор. Применение предложенного способа подачи воды не требует изменения конструкции двигателя и существенно расширяет сферу применения водной инжекции на другие модели двигателей.

Анализ литературных источников показал, что в области исследования влияния водной инжекции на повышение топливной экономичности и экологической безопасности двигателей машинно-тракторных агрегатов сформирована определенная теоретическая и экспериментальная база. Значительный вклад в решение указанных проблем внесли отечественные ученые: В. С. Авдуевский, В. В. Бледных, О. И. Быстров, Г. В. Веденяпин, М. Б. Гуревич, Н. Ф. Кайдаш, В. С. Кукис, В. Н. Кычев, А. В. Николаенко, А. С. Орлин, Р. Ю. Сакулин, И. И. Сторожев, К. В. Трелина и многие другие, а также их зарубежные коллеги Б. Льюис, Ю. Мацкерле, Е. Прескотт, Е. Хайвс, К. Циннер, Г. Эльбе и другие. Представленные работы имеют большое методологическое и теоретическое значение, однако в них не в полной мере отражены вопросы влияния водной инжекции на повышение топливной экономичности и экологической безопасности двигателей сельскохозяйственных машинно-тракторных агрегатов.

Вторая глава *«Теоретические исследования повышения топливной экономичности машинно-тракторных агрегатов посредством водной инжекции»* посвящена исследованию теории парообразования воды в цилиндре дизельного двигателя, исследованию теории рабочего процесса в дизельном двигателе внутреннего сгорания при применении водной инжекции, оценке влияния водной инжекции на эффективные показатели работы двигателя трактора в составе МТА.

Исследования теорий горения углеводородных топлив в присутствии воды (Б. Льюис, Г. Эльбе, А. В. Горячкин, В. Р. Ведрученко, К. В. Трелина и другие) показывают, что вода оказывает существенное каталитическое влияние как на процесс горения топлива, так и на снижение вредных выбросов с отработавшими газами. В результате анализа и обработки известных данных о физических свойствах воды

нами было установлено, что в диапазоне температур от 0 до 100 °С (диапазон температур внутри цилиндра дизельного двигателя – от 20 до 3500 °С) изменения удельной теплоемкости воды не превышают 1 % (0,95%). Таким образом, при проведении теплового расчета дизельного двигателя в данном диапазоне температур удельную теплоемкость воды можно принять постоянной, равной 4,1868 кДж/(кг·К), или 1 ккал/(кг·К).

Определено, что удельная теплота парообразования воды при кипении составляет около 2256 кДж/кг. Однако для технических расчетов рабочих процессов в ДВС удельную теплоту парообразования воды мы приняли равной 2512 кДж/кг в зависимости от влияния переменного давления (рисунки 1 и 2) и других неучтенных факторов.

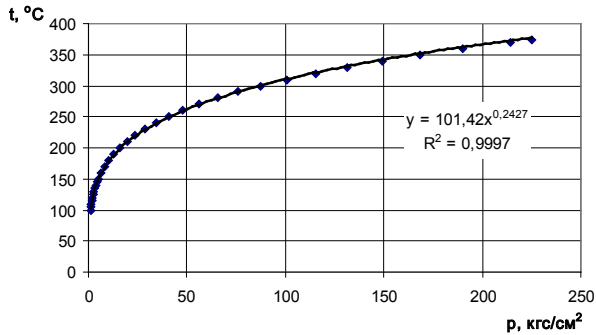


Рисунок 1 – Зависимость температуры насыщенного водяного пара от величины абсолютного давления при температуре свыше 100 °С

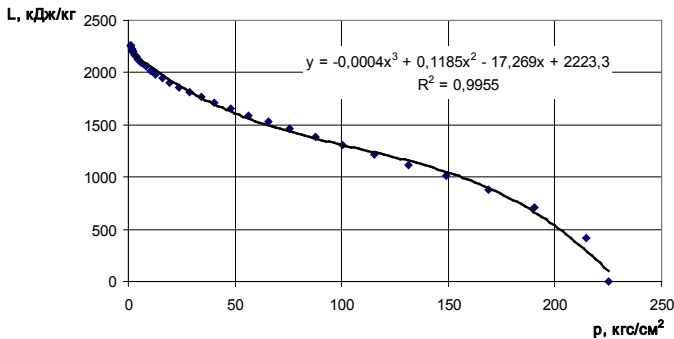


Рисунок 2 – Зависимость удельной теплоты парообразования от величины абсолютного давления при температуре свыше 100 °С

Приведенные выше результаты собственных теоретических исследований на основе зависимости Т. Холбера позволили определить минимальный диаметр капли воды, способной испариться в газовой среде в течение одного такта работы дизельного двигателя на номинальном режиме:

$$d = \sqrt{\frac{t_t \cdot 8 \cdot \lambda_r \cdot \Delta t}{3600 \cdot \rho_b \cdot L}}, \text{ м}, \quad (1)$$

где t_t – время, затраченное на совершение одного такта работы четырехтактного дизельного двигателя, с;

λ_r – теплопроводность газа, Дж/м²·К;

Δt – средняя разница температуры между газом и водой, К;

ρ_b – плотность воды, кг/дм³;

L – удельная энергия парообразования, кДж/кг.

Определено, что минимальный диаметр капли воды применительно к дизельному двигателю 4Ч 11/12,5 равен $3,95 \cdot 10^{-4}$ м. При разработке технического решения водного инжектора полученный показатель выступил в качестве исходного (патент на полезную модель № 166572 от 14.11.2016 г.).

При проведении теоретических исследований рабочего процесса в дизельном ДВС при применении водной инъекции было отмечено, что присутствие значительного количества воды в составе свежего заряда приведет к изменению его средней мольной теплоемкости. Поэтому был введен коэффициент, учитывающий присутствие воды:

$$\gamma_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{m_{\text{H}_2\text{O}} \cdot i}{\rho_k \cdot V_h}, \quad (2)$$

где $m_{\text{H}_2\text{O}}$ – масса цикловой подачи воды, мг/цикл;

i – число цилиндров в двигателе;

ρ_k – плотность свежего заряда, мг/л;

V_h – рабочий объем цилиндров двигателя, л.

Тогда среднюю мольную теплоемкость рабочей смеси в конце сжатия определяем:

$$\begin{aligned} (mc'_V)_{t_0}^t &= \left(\frac{1}{1 + \gamma_r + \gamma_{\text{H}_2\text{O}}} \right) \times \\ &\times \left[(mc_V)_{t_0}^t + \gamma_r (mc''_V)_{t_0}^t + \gamma_{\text{H}_2\text{O}} (mc''_V)_{t_0}^t \right], \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль} \cdot \text{град}}; \end{aligned} \quad (3)$$

$$(mc_p'')_{t_0}^{t_z} = (mc_p'')_{t_0}^{t_c} + 8,315, \quad (4)$$

где 8,315 – универсальная газовая постоянная, кДж/(кмоль·град).

Для дизельных двигателей, работающих по циклу со смешанным подводом теплоты, уравнение сгорания имеет вид:

$$\xi_z H_{\text{раб.см}} + \left[(mc_p'')_{t_0}^{t_c} + 8,315\lambda \right] \cdot t_c + 273 \cdot 8,315 \cdot (\lambda - \mu) = \mu (mc_p'')_{t_0}^{t_z} t_z, \quad (5)$$

где $\lambda = \frac{P_z}{P_c}$ – степень повышения давления.

С учетом вышеизложенного показатель адиабаты расширения был определен в результате решения системы уравнений:

$$k_2 = 1 + \frac{\lg T_z - \lg T_b}{\lg \delta};$$

$$k_2 = 1 + \frac{8,315}{(mc_p'')_{t_b}^{t_z}}. \quad (6)$$

Таким образом, введение коэффициента, учитывающего присутствие воды в составе свежего заряда, позволило обосновать повышение индикаторного давления в цилиндре двигателя при применении водной инъекции.

С учетом рекомендаций О.И. Быстрова, И.И. Сторожева на этапе расчета для двигателя 4Ч 11/12,5 значение коэффициента присутствия воды на номинальном режиме было принято равным 0,0127. Оптимальный объем воды, подаваемой в цилиндры двигателя, при этом должен составлять около 30% от цикловой подачи дизельного топлива. Значение средней мольной теплоемкости рабочей смеси установлено 22,417 кДж/(кмоль·град).

В таблице 1 представлены эффективные показатели работы двигателя 4Ч 11/12,5 на номинальном режиме, полученные в ходе математического моделирования.

Таким образом, в результате теоретических исследований установлено, что введение в топливовоздушную смесь 30% воды позволит увеличить номинальную эффективную мощность дизельного двигателя 4Ч 11/12,5 (Д-240) на 10,69 кВт, или на 19,38% (с 55,15 до 65,84 кВт), при соответствующем снижении удельного эффективного расхода топлива на 45 г/(кВт·ч), или на 15,85%.

Таблица 1 – Результаты сравнительного расчета эффективных показателей двигателя 4Ч 11/12,5 на номинальном режиме

Параметры	Дизельное топливо	Применение водной инъекции
Эффективная мощность двигателя, кВт	55,15 ^{+3,5}	65,84
Эффективный крутящий момент двигателя, Нм	239	286
Среднее индикаторное давление, МПа	0,831	0,954
Среднее эффективное давление, МПа	0,633	0,756
Среднее давление механических потерь, МПа	0,198	0,198
Индикаторный КПД двигателя	0,391	0,448
Эффективный КПД двигателя	0,298	0,355
КПД механических потерь	0,762	0,792
Удельный эффективный расход топлива, г/(кВт·ч)	284	239
Часовой расход топлива, кг/ч	15,7	15,7

Вместе с тем данный процесс изучен недостаточно полно, характеризуется сложностью влияния большого количества факторов, методики расчетов отсутствуют. В этой связи требуется экспериментальная проверка правомочности принятых допущений и выдвинутых гипотез.

В **третьей главе «Методика проведения экспериментальных исследований»** представлены программа и методики проведения лабораторных и полевых экспериментальных исследований, а также методика обработки результатов замеров.

Экспериментальные исследования проведены в период 2010–2014 гг. на базе Механико-технологического института и учебно-опытного хозяйства ФГБОУ ВО «Государственный аграрный университет Северного Зауралья». Хозяйственные испытания различных машинно-тракторных агрегатов, составленных на базе тракторов МТЗ-80/82 в условиях рядовой эксплуатации, осуществляли на территории Тюменской, Свердловской и Челябинской областей.

Экспериментальные исследования проводили в два этапа:

- лабораторные исследования на модернизированном торозном стенде КИ-1363В включали в себя: серию поисковых экспериментов по определению рационального состава водотопливной смеси; снятие нагрузочных и внешних скоростных характеристик серийного и модернизированного двигателя Д-240 с использованием индицирования и замером экологических показателей;

– полевые испытания проводили на посевном МТА в составе трактора МТЗ-82, оснащенного серийным и модернизированным двигателем Д-240, и стерневой сеялки-культиватора СЗС-2,1 на стерне колосовых культур по двухуровневому плану второго порядка Бокса-Бенкина.

В основу разработанных методик лабораторных и полевых экспериментальных исследований были положены требования государственных стандартов и других нормативных документов, распространяющихся на испытания сельскохозяйственных машин, тракторов и их двигателей при определении технико-экономических и экологических показателей их работы.

Полученные результаты замеров обобщали в виде сводных протоколов испытаний, таблиц и графиков, аппроксимировали уравнениями регрессии в программной среде Microsoft Excel. При обработке экспериментальных данных были использованы известные методы теории вероятностей и математической статистики.

В четвертой главе «*Результаты экспериментальных исследований*» представлены результаты экспериментальных исследований влияния водной инъекции на технико-экономические и экологические показатели работы машинно-тракторных агрегатов на базе тракторов класса 1,4.

В результате проведения поисковых экспериментальных исследований установлено, что оптимальное значение цикловой подачи воды составляет 27...32% от цикловой подачи дизельного топлива (рисунок 3).

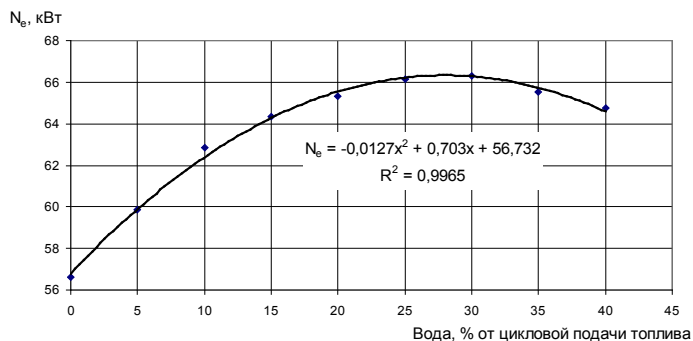


Рисунок 3 – Изменение эффективной мощности двигателя 4Ч 11/12,5 в зависимости от количества подаваемой воды

Вследствие применения водной инжекции произошло увеличение эффективной мощности: на номинальном режиме – на 10,84 кВт (на 19,59%); на режиме максимального крутящего момента – на 8,23 кВт (на 20,50%) (рисунок 4).

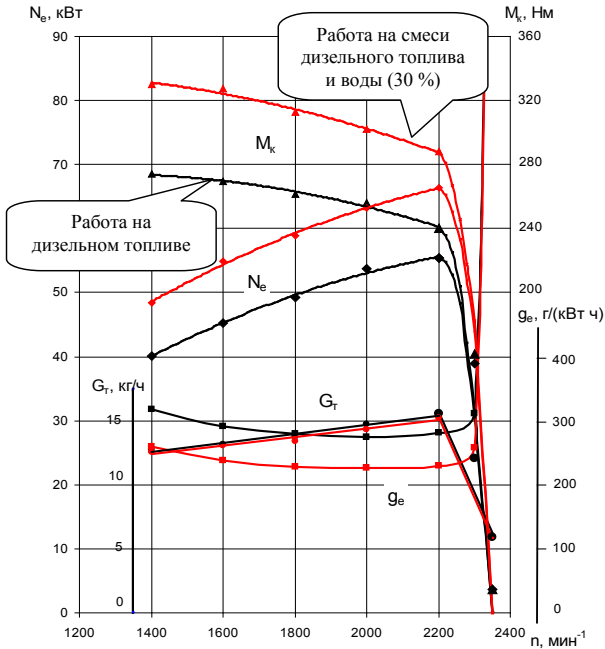


Рисунок 4 – Совмещенная регуляторная внешняя скоростная характеристика двигателя 4Ч 11/12,5

С целью наглядного представления об экономии дизельного топлива при использовании водной инжекции по данным внешних скоростных характеристик была построена комбинированная характеристика двигателя 4Ч 11/12,5 по расходу дизельного топлива в зависимости от эффективной мощности (рисунок 5). Анализ представленной характеристики показывает, что полученные экспериментальные данные с 99%-й доверительной вероятностью могут быть описаны линейными уравнениями. На основании сравнения полученных уравнений можно заключить, что при применении водной инжекции с долей воды, равной 30%, относительная экономия дизельного топлива достигает 36 г/кВт·ч эффективной мощности.

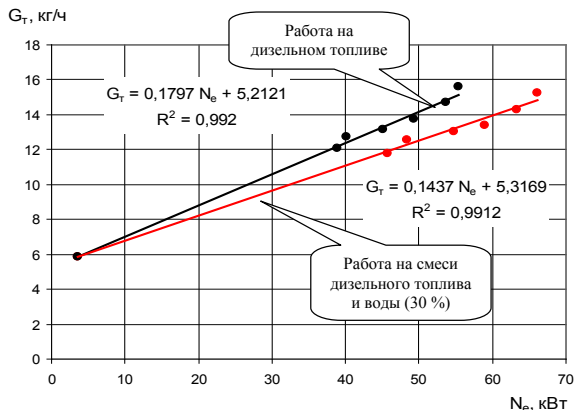


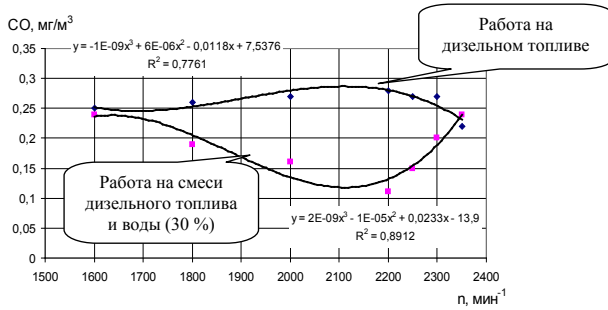
Рисунок 5 – Характеристика двигателя 4Ч 11/12,5 по расходу дизельного топлива в зависимости от эффективной мощности

В качестве экологических показателей оценки воздействия водной инжекции на работу двигателя 4Ч 11/12,5 были выбраны (рисунок 6):

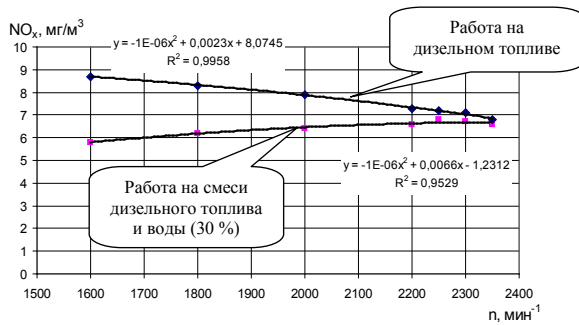
- содержание CO в отработавших газах двигателя, мг/м³;
- содержание NO_x в отработавших газах двигателя, мг/м³;
- дымность отработавших газов, %.

Установлено, что наибольший экологический эффект от применения водной инжекции наблюдается по отношению к оксиду углерода, снижение которого на номинальном режиме работы двигателя достигает 0,17 мг/м³ (снижение на 39,30%). Снижение выбросов оксидов азота на режиме максимального крутящего момента достигает 2,90 мг/м³ (снижение на 33,30%). Максимальное снижение дымности отработавших газов достигает 0,20% (снижение на 8,33%).

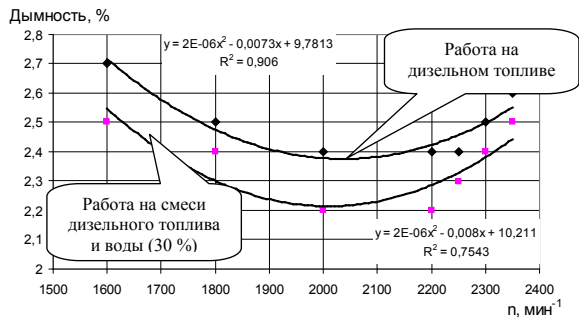
В результате обработки данных индицирования двигателя 4Ч 11/12,5 было установлено, что при использовании водной инжекции (30% от цикловой подачи дизельного топлива) отмечено устойчивое повышение среднего индикаторного давления на 18...22%. На рисунке 7 представлены данные, полученные методом наложения идентичных рабочих процессов на установившемся скоростном режиме. Вторым положительным фактором является «смягчение» работы двигателя, которое объясняется уменьшением скорости нарастания и снижения индикаторного давления (в среднем на 5...15%) в сравнении с работой на дизельном топливе.



а



б



в

Рисунок 6 – Влияние водной инъекции на содержание вредных выбросов в отработавших газах дизельного двигателя Д–240:

а – CO; б – NO_x; в – дымности

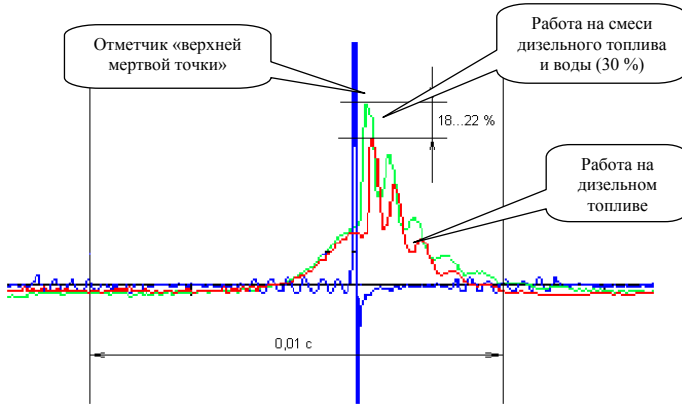


Рисунок 7 – Сравнение идентичных рабочих процессов на установившемся скоростном режиме методом наложения

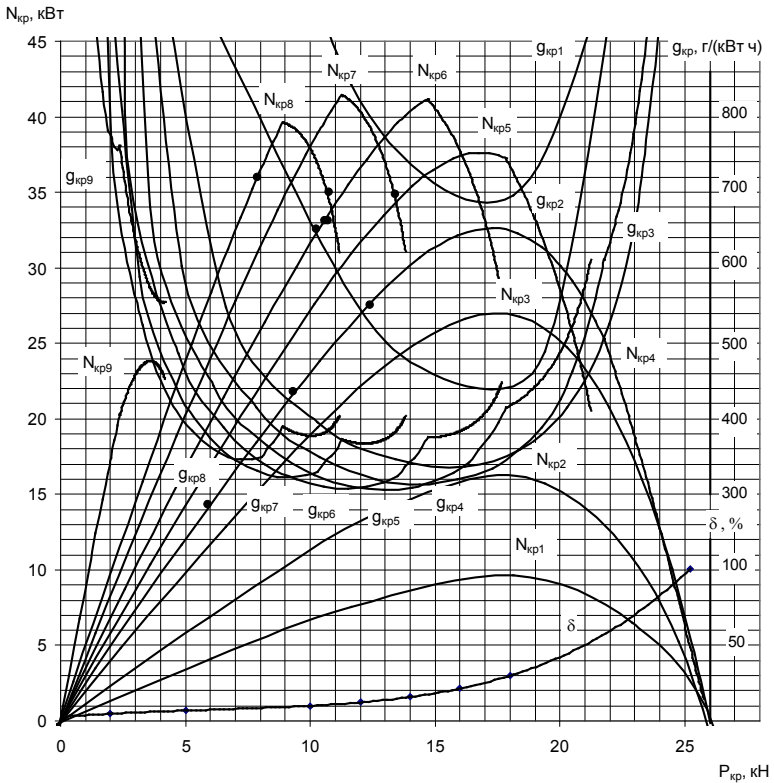
Полученные результаты теоретических и экспериментальных исследований позволили провести математическое моделирование рабочего процесса в цилиндре двигателя при использовании водной инжекции.

Рост индикаторного давления свидетельствует о том, что объем совершенной работы газов также увеличился. Причем рост индикаторного давления произошел в той части индикаторной диаграммы, где давление газов наиболее эффективно трансформируется в индикаторный крутящий момент двигателя.

Полевые испытания машинно-тракторного агрегата в составе трактора МТЗ-82 с отключенным приводом переднего моста и стерневой сеялки-культиватора СЗС-2,1 проводили по методике полного факторного эксперимента согласно двухуровневому плану второго порядка Бокса-Бенкина, что позволило оптимизировать объем экспериментальных исследований, а также повысить их точность и повторяемость.

На рисунке 8 представлена тяговая характеристика трактора МТЗ-82 с двигателем Д-240, оснащенным устройством для водной инжекции. Анализ полученной тяговой характеристики показывает, что режим максимальной тяговой мощности не совпадает с режимом максимальной топливной экономичности. Смещение режима максимальной топливной экономичности на основных рабочих передачах составляет от 14 до 22% в сторону уменьшения тягового

усилия на крюке трактора. Данное обстоятельство объясняется заводской настройкой всережимного регулятора топливного насоса двигателя. Максимальная тяговая мощность трактора (на почвенном фоне «стерня колосовых») получена на 6-й и 7-й передачах и составляет 41,12 и 41,43 кВт, соответственно. Относительное увеличение максимальной тяговой мощности на вышеназванных передачах составляет 14,11 и 18,36%, соответственно, при относительном снижении удельного тягового расхода топлива – 15,33 и 16,01%.



Примечание: 1 – точками обозначены результаты экспериментальных исследований, проведенные по плану второго порядка Бокса-Бенкина;
2 – почвенный фон – «стерня колосовых»

Рисунок 8 – Тяговая характеристика трактора МТЗ-82 с двигателем Д-240, оснащенный устройством для водной инъекции

Эффективность использования трактора в тяговом режиме оценивается условным тяговым КПД (рисунок 9).

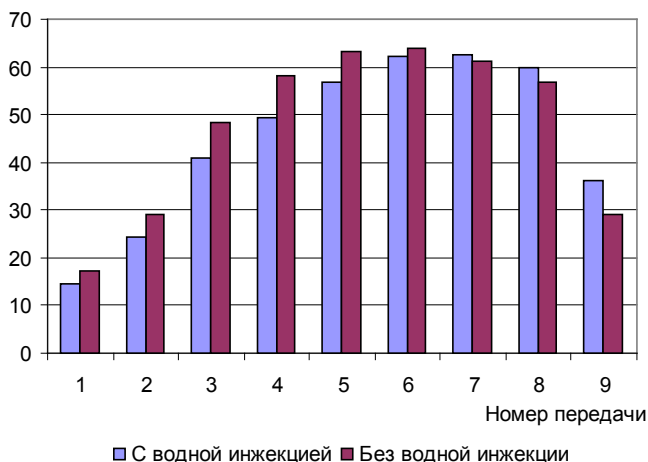


Рисунок 9 – Изменение максимальных значений условного тягового КПД трактора МТЗ-82 (почвенный фон – стерня колосовых)

Анализ показывает, что значения условного тягового КПД для трактора МТЗ-82 с двигателем, оснащенный устройством для водной инжекции во впускной коллектор, на низших передачах (до 5-й передачи включительно) оказываются ниже, чем у серийного трактора. Данное обстоятельство обусловлено низкими тягово-сцепными свойствами тракторов МТЗ-80/82. В качестве путей повышения эффективности работы тракторов МТЗ-80/82 можно рекомендовать их использование на транспортных работах, а при выполнении полевых работ – применять штатные устройства по увеличению сцепного веса (например, ГСВ) или агрегатирование с тягово-приводными сельхозмашинами, у которых часть мощности двигателя трактора реализуется через вал отбора мощности (ВОМ).

В пятой главе «Оценка эффективности применения водной инжекции при эксплуатации мобильных сельскохозяйственных машинно-тракторных агрегатов» представлены результаты экономической, энергетической и экологической оценки эффективности использования результатов диссертационного исследования (таблица 2).

Таблица 2 – Результаты экономической, энергетической и экологической оценки эффективности использования водной инъекции при эксплуатации МТА на базе тракторов МТЗ-80/82

Параметры	Вариант 1	Вариант 2
Потенциальный годовой экономический эффект, тыс. руб./год	189,55	95,75
Годовой экономический эффект с учетом климатических условий Российской Федерации, тыс. руб./год	132,70	67,00
Срок окупаемости дополнительных капитальных вложений, лет	0,13	0,26
Верхний предел цены трактора, тыс. руб.	1 790,00	1 260,00
Потенциальный годовой энергетический эффект, МДж/год	144 054,58	147 227,33
Годовой энергетический эффект с учетом климатических условий Российской Федерации, МДж/год	100 838,20	103 059,13
Потенциальный годовой экологический эффект, руб./год	447,24	1018,13
Годовой экологический эффект с учетом климатических условий Российской Федерации, руб./год	313,07	712,69

Примечание: Вариант 1 – при увеличении производительности (за счет увеличения рабочей скорости); Вариант 2 – при неизменной производительности (при невозможности увеличения рабочей скорости).

На основании представленных данных можно заключить, что применение водной инъекции приводит к увеличению мощности дизеля и, как следствие, к повышению эффективности использования машинно-тракторных агрегатов, что подтверждается улучшением экономических, энергетических и экологических показателей работы МТА.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена важная научно-техническая задача по повышению топливной экономичности машинно-тракторных агрегатов за счет применения водной инъекции во впускной коллектор дизельного двигателя. Представлены новые научно обоснованные технические разработки, направленные на повышение эффективной мощности двигателя и снижение удельного эффективного расхода дизельного топлива. На основании проведенных исследований можно сделать следующие основные выводы:

1. В результате теоретических исследований рабочего процесса дизельного двигателя при применении водной инжекции установлено, что максимальный размер капли воды не должен превышать 0,39 мм, что достигается применением инжектора с диаметром распылителя форсунки 0,3...0,4 мм при давлении не ниже 0,2 МПа.

2. В результате математического моделирования установлено, что на номинальном режиме работы дизельного двигателя 4Ч 11/12,5 введение в топливовоздушную смесь 30% воды от цикловой подачи дизельного топлива позволяет увеличить эффективную мощность на 10,69 кВт, или на 19,38% (с 55,15 кВт до 65,84 кВт). Результаты экспериментальной проверки показали увеличение эффективной мощности на аналогичном режиме до 65,99 кВт (на 19,59%). Ошибка расчета среднего индикаторного давления по предложенной методике составляет 3,95%, что говорит о приемлемости ее использования в практических целях.

3. Разработанная экспериментальная установка позволила провести индцирование полномасштабного дизельного двигателя 4Ч 11/12,5 при применении водной инжекции. Результаты индцирования показали устойчивое повышение индикаторного давления в среднем на 18...22%. Выявлено «смягчение» работы исследуемого двигателя, которое объясняется уменьшением скорости нарастания и снижения индикаторного давления (в среднем на 5...15%) в сравнении с работой на дизельном топливе.

4. Экспериментально установлено, что наибольший прирост эффективной мощности дизельного двигателя 4 Ч 11/12,5 наблюдается при подаче воды в объеме, равном 27...32% от объема цикловой подачи дизельного топлива. При использовании водной инжекции относительная экономия дизельного топлива достигает 36 г/кВт·ч эффективной мощности. Кроме того, установлено, что с увеличением объема подаваемой воды температура отработавших газов снижается со средней интенсивностью около 1 °С на 1% подачи воды, в зависимости от режима работы двигателя. Наибольшее снижение температуры отработавших газов отмечено на режиме максимального крутящего момента.

5. В результате тяговых испытаний, проведенных на почвенном фоне «стерня колосовых», максимальная тяговая мощность трактора МТЗ-82 с отключенным приводом переднего моста получена на 6-й и 7-й передачах – 41,12 и 41,43 кВт соответственно, относительное увеличение – 14,11 и 18,36% соответственно.

6. Использование универсально-пропашных тракторов тягового класса 1,4 с двигателями, оснащенными устройствами для водной инъекции, в сельском хозяйстве Российской Федерации обеспечивает получение годового экономического эффекта до 132 700 рублей на один трактор в год. Годовой энергетический эффект от применения водной инъекции находится в пределах от 101 000 до 103 000 МДж/год. Годовой экологический эффект, обусловленный снижением выбросов в связи с экономией дизельного топлива, достигает 700 рублей на один трактор в год. Кроме того, при применении водной инъекции на номинальном режиме работы двигателя наблюдается снижение выбросов оксида углерода на $0,17 \text{ мг/м}^3$ (снижение на 39,30%). Уменьшение выбросов оксидов азота на режиме максимального крутящего момента – на $2,90 \text{ мг/м}^3$ (снижение на 33,30%). Максимальное снижение дымности отработавших газов – на 0,20% (снижение на 8,33%).

Рекомендации производству

Применение водной инъекции является эффективным способом, позволяющим повысить топливную экономичность и экологическую безопасность двигателей сельскохозяйственных машинно-тракторных агрегатов, составленных на базе тракторов класса 1,4. При разработке конструкции водной форсунки рекомендуется использовать патент на полезную модель № 166572 от 14.11.2016 г., полученный автором в процессе проведения теоретических и экспериментальных исследований. При этом рациональный объем подаваемой через инжектор воды составляет 27...32% от объема цикловой подачи дизельного топлива.

Перспективы дальнейшей разработки темы

В качестве перспектив дальнейшей разработки темы следует указать ресурсные испытания двигателей сельскохозяйственных машинно-тракторных агрегатов при использовании водной инъекции, а также дальнейшее уточнение предложенных математических моделей (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016611249). Материалы проведенных исследований могут быть полезны научно-исследовательскими и проектно-технологическими организациями при разработках перспективных систем питания энергетических установок мобильных сельскохозяйственных МТА.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Романов, С. В. Экономическая эффективность применения водной инъекции при эксплуатации тракторов МТЗ-80/82 [Текст] / С. В. Романов, Г. М. Романова // Экономика и предпринимательство. – 2014. – № 11–4. – С. 689–693.
2. Старцев, А. В. Повышение эффективности работы дизельного двигателя за счет использования водной инъекции [Текст] / А. В. Старцев, С. В. Романов // Агропродовольственная политика России. – 2014. – № 12. – С. 67–70.
3. Романов, С. В. Повышение топливной экономичности машинно-тракторных агрегатов на базе тракторов МТЗ-80/82 при использовании водной и водоспиртовой инъекции [Текст] / С. В. Романов, Д. В. Вагин // Международный технико-экономический журнал. – 2015. – № 1. – С. 90–94.
4. Вагин, Д. В. Экономическая оценка эффективности использования водной и водоспиртовой инъекции при эксплуатации машинно-тракторных агрегатов [Текст] / Д. В. Вагин, С. В. Романов // Международный технико-экономический журнал. – 2015. – № 1. – С. 18–22.
5. Старцев, А. В. Повышение топливной экономичности сельскохозяйственных агрегатов на базе тракторов МТЗ-80/82 путем применения водной инъекции [Текст] / А. В. Старцев, С. В. Романов // Агропродовольственная политика России. – 2015. – № 1. – С. 16–19.
6. Старцев, А. В. Экономическая оценка эффективности использования водной и водоспиртовой инъекции в дизельных двигателях [Текст] / А. В. Старцев, О. Н. Вагина, С. В. Романов, Д. В. Вагин // АПК России. – 2015. – Т. 74. – С. 183–191.

Публикации в других изданиях

7. Романов, С. В. Влияние температуры воздуха на массу выброса вредных веществ двигателем внутреннего сгорания в период прогрева [Текст] / С. В. Романов // Сборник материалов конференции молодых ученых «Научно-техническое творчество молодежи – агропромышленному комплексу Урала и Сибири». – Тюмень, 2010. – Ч. 2. – С. 147–152.
8. Романов, С. В. Повышение топливной экономичности дизельного двигателя путем использования водотопливных эмульсий

и водной инжекции [Текст] / **С. В. Романов** // Роль науки в развитии общества : сб. стат. Междунар. науч.-практ. конф. (17 апреля 2014 г.) / отв. ред. А. А. Сукиасян. – Уфа : Аэтерна, 2014. – Ч. 2. – С. 63–65.

9. Старцев, А. В. Парообразование воды в цилиндре дизельного двигателя Д-240 при использовании водной инжекции [Текст] / А. В. Старцев, **С. В. Романов**, Д. В. Вагин // Сборник стат. Междунар. науч.-практ. конф. (17 апреля 2014 г.). – Уфа : Аэтерна, 2014. – Ч. 2. – С. 66–70.

10. Романов, С. В. Повышение топливной экономичности дизельного двигателя путем использования воды [Текст] / **С. В. Романов** // Материалы ЛПМ Междунар. науч.-техн. конф. «Достижения науки – агропромышленному производству». – Челябинск : ЧГАА, 2014. – Ч. 3 – С. 180–185.

11. Старцев, А. В. Теоретические аспекты парообразования воды в цилиндре дизельного двигателя Д-240 [Текст] / А. В. Старцев, **С. В. Романов**, Д. В. Вагин // Материалы ЛПМ Междунар. науч.-техн. конф. «Достижения науки – агропромышленному производству». – Челябинск : ЧГАА, 2014. – Ч. 3. – С. 186–192.

12. Романов, С. В. Альтернативное топливо [Текст] / **С. В. Романов** // Вестник государственного аграрного университета Северного Зауралья. – 2014. – Т. 4(27). – С. 68–72.

Авторские свидетельства, патенты

13. А. с. о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016611249. Расчет эффективных показателей работы дизельного двигателя внутреннего сгорания 4Ч 11/12,5 при инжекции воды во впускной коллектор [Текст] / А. В. Старцев, **С. В. Романов**. № 2016611249 ; заявл. 28.01.2016 г.

14. Пат. на полезную модель № 166572. Устройство для подачи водоспиртовой смеси в дизельный двигатель внутреннего сгорания 4Ч 11/12,5 [Текст] / А. В. Старцев, **С. В. Романов**, Д. В. Вагин. № 166572 ; заявл. 14.11.2016 г.

Подписано в печать 11.04.2017. Формат 60×84/16
Гарнитура Times. Печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ № КЗ-4.

Отпечатано в ИПЦ ФГБОУ ВО Южно-Уральский ГАУ
454080, г. Челябинск, ул. Энгельса, 83