

УДК 623.427.422:621.433

УЛУЧШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОЛЕСНОГО ТРАКТОРА ПРИ РАБОТЕ НА СМЕШАННОМ ДИЗЕЛЬНО-ГАЗОВОМ ТОПЛИВЕ

А.Н. Карташевич,

зав. каф. тракторов, автомобилей и машин для агрообустройства БГСХА, докт. техн. наук, профессор

П.Ю. Малышкин,

ст. преподаватель каф. тракторов, автомобилей и машин для агрообустройства БГСХА

В статье представлены результаты исследований энергетических свойств работы колесного трактора тягового класса 1,4 на смешанном дизельно-газовом топливе с использованием разработанной газовой системы питания. Описана экспериментальная установка и методика проведения исследований. Применение смешанного дизельно-газового топлива позволило улучшить основные энергетические свойства колесного трактора, при этом суммарный погектарный расход дизельного и газового топлива при работе машинно-тракторного агрегата «Беларус-922» с плугом ПЛН-3-35 снизился на 1,90 %, а при работе с АКШ-3,6-01 – на 0,89 % при сохранении производительности.

Ключевые слова: колесный трактор, смешанное дизельно-газовое топливо, расход топлива, экологические показатели.

The article presents the results of research on the energy properties of a 1.4-class wheeled tractor running on mixed diesel-gas fuel using the developed gas supply system. The experimental setup and research methodology are described. The use of mixed diesel-gas fuel allowed to improve the main energy properties of the wheeled tractor, while the total per-hectare consumption of diesel and gas fuel when working with the Belarus - 922 tractor unit with the plough PLN-3-35 decreased by 1.90 %, and when working with the automatic transmission system-3,6-01 – by 0.89 % while maintaining performance.

Keywords: wheeled tractor, mixed diesel-gas fuel, fuel consumption, environmental indicators.

Введение

Развитие колесных тракторов и поршневых двигателей внутреннего сгорания (ДВС) характеризуется непрерывным совершенствованием их конструкций, а также повышением энергетических и эффективных показателей [1, 4].

Во всем мире развитие мобильных энергетических средств происходит, прежде всего, в направлении улучшения их основных топливно-экономических и экологических показателей.

Основными показателями, характеризующими энергетические свойства колесных тракторов, являются производительность и удельный расход топлива, составляющие значительную долю эксплуатационных затрат в себестоимости выполняемых работ.

При этом важное значение имеют требования агроэкологического характера, связанные с засорением атмосферы вредными компонентами, содержащимися в отработанных газах двигателей. Согласно оценкам экспертов, до 75 % всех болезней человека напрямую связано с состоянием окружающей среды и возможностью функционирования биологических связей в природе [6, 7]. Поэтому снижение отрицательного воздействия мобильными энергетическими средствами на окружающую среду – одно из важнейших эксплуатационных требований.

К настоящему времени проведены существенные теоретические и экспериментальные работы по улучше-

нию эффективных и эксплуатационных показателей колесных тракторов и силовых установок. Значительный вклад в развитие теории трактора внесли ученые В.Я. Анилович, И.Б. Барский, Ф.С. Беспялый, Ю.Т. Водолаженко, В.В. Гуськов, А.Н. Карташевич, В.А. Ким, Г.А. Котиев, И.П. Ксенович, Г.М. Кутьков, А.Н. Максименко, А.М. Машенский, К.Г. Попык, И.С. Сазонов, А.В. Савочкин, В.А. Скотников, А.С. Солонский, И.Ф. Троицкий, М.Г. Vekker и другие.

В то же самое время большинство научно-исследовательских работ проводилось только с целью определения возможности работы дизеля на газовых топливах, исследований процесса сгорания, либо улучшения эффективных или экологических показателей работы дизелей. Однако не уделялось должного внимания комплексному рассмотрению вопросов применения газовых топлив на колесных тракторах.

Существенного результата в совершенствовании рабочего процесса ДВС можно было бы добиться, если обеспечить эффективную работу на дешевых и малоэнергосодержащих в производстве видах топлива [2]. Примером такой замены в сфере колесных тракторов может быть замещение дизельного топлива (ДТ) газовым топливом (ГТ) или обеспечение работы силовой установки на смешанном дизельно-газовом топливе (СДГТ).

Достижение высоких эксплуатационных показателей колесных тракторов в значительной степени

определяется характером и эффективностью процессов, протекающих в цилиндрах двигателя. Повышение удельной мощности ограничивается надежностью работы двигателя в связи с увеличением тепловой и механической нагруженности основных деталей цилиндро-поршневой группы и кривошипно-шатунного механизма. Расширение области применения ДВС и ужесточение нормативных требований во всех странах мира требует решения вопросов ограничения дымности и токсичности отработавших газов, возможности работы на альтернативных видах топлива [3].

Основная часть

Использование добавки газа в качестве моторного топлива вносит определенные изменения в показатели процесса сгорания топлива в цилиндрах дизеля [4]. Для выявления влияния газового топлива на экологические и технико-экономические показатели работы силовой установки колесного трактора были проведены экспериментальные исследования в аккредитованной научно-исследовательской лаборатории испытания двигателей внутреннего сгорания и топлив кафедры «Тракторы, автомобили и машины для природообустройства» БГСХА. Экспериментальная установка включала в себя дизель Д-245.5S2 с газовой системой питания [8], электротормозной стенд SAK-N670 (Германия) с балансирной маятниковой машиной RAPIDO, измерительную аппаратуру, описанную в источнике [2].

Для выявления влияния газового топлива на энергетические и экологические показатели колесного трактора были проведены экспериментальные (натурные) исследования, которыми предусматривалось сравнение эффективных и экологических показателей трактора при работе на ДТ и СДГТ. Для этого колесный трактор дополнительно укомплектовывался газовой системой питания (рис. 1) согласно патенту [8], состоящей из га-

зового баллона, редуктора, рампы форсунок, блока управления, пульта управления и датчиков [5].

Для поддержания неизменной скорости и крутящей мощности колесного трактора при работе на СДГТ, оборудованного газовой системой питания [8, 5], необходимо уменьшить номинальную цикловую подачу топлива на величину замещения газом путем переключения топливного насоса высокого давления.

При изменении химического состава и физических свойств применяемого топлива происходит изменение в протекании процессов смесеобразования и сгорания топлива, что повлечет за собой изменение крутящего момента силовой установки, тяговых и топливно-экономических качеств трактора.

Для сохранения мощности двигателя на уровне, установленном заводом-изготовителем, при работе дизеля на ДТ и газе, с достаточной точностью должно выполняться условие:

$$G_r / G_{дт} \approx H_{дт} / H_r,$$

где G_r – часовой расход газового топлива (ГТ);

$G_{дт}$ – часовой расход дизельного топлива (ДТ);

H_r – низшая расчетная теплота сгорания ГТ (пропан-бутановой смеси) $H_r = 45,81$ МДж/кг [9, 11] зависит от состава газа и рассчитывается по зависимости

$$H_r = \sum n_i \cdot H_{ni}, \quad (1)$$

где n_i – i -компонент смеси;

H_{ni} – низшая теплота сгорания 1 кг i -компонента, МДж/кг.

$H_{дт}$ – низшая расчетная теплота сгорания дизельного топлива, $H_{дт} = 42,5$ МДж/кг.

Так, в случае замещения ДТ газовым топливом в количестве 10, 20, 30, 40 % экономия ДТ с учетом низшей теплоты сгорания не будет превышать 10,7; 21,23; 31,6; 41,81 % соответственно.

Кроме этого, проведено теоретическое исследование рабочего процесса дизеля 4ЧН 11,0/12,5 (Д-245.5S2)

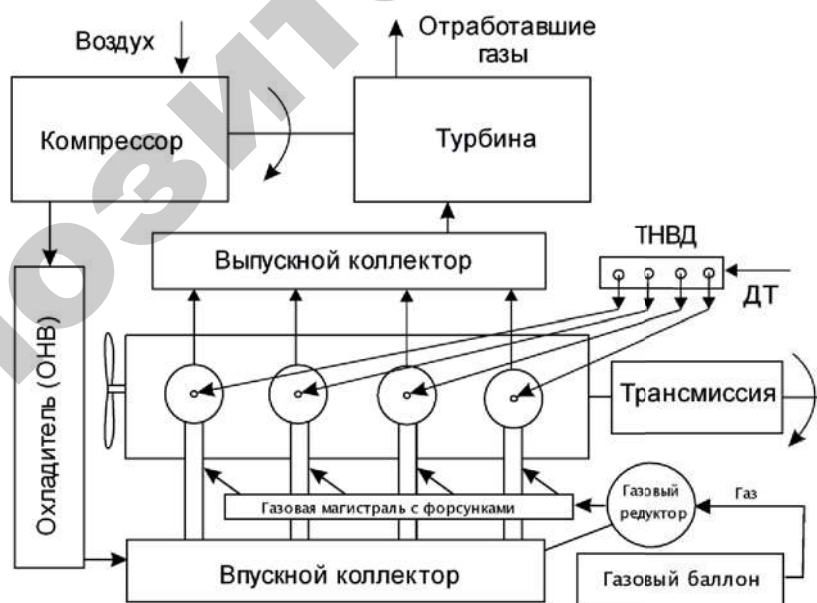


Рисунок 1. Структурная схема силовой экспериментальной установки колесного трактора с газовой системой питания

при работе на СДГТ с использованием программного комплекса «ДИЗЕЛЬ – РК», разработанного в МГТУ им. Н. Э. Баумана, и установлено, что подача ГТ марки ПБА [9] не должна превышать 30 % от ДТ из-за повышения жесткости рабочего процесса до 1,20 МПа/град, что является предельным для дизеля с наддувом.

С учетом работы [15] получена эмпирическая зависимость подачи ГТ от среднего эффективного давления

$$G_{ГТ} = A \cdot p_e^2 + B \cdot p_e + C, \quad (2)$$

где $G_{ГТ}$ – часовой расход газового топлива в долях от ДТ;

p_e – среднее эффективное давление в цилиндре дизеля, 10^{-6} Па;

A, B, C – эмпирические коэффициенты для дизеля 4ЧН 11,0/12,5 (Д-245.5) $A = -2,7; B = 5,4; C = -2,4$.

Испытания колесного трактора «Беларус-922» при работе на СДГТ и разработанной системы подачи ГТ [8] (рис. 2) с трехкорпусным плугом ПЛН-3-35 и комбинированным широкозахватным агрегатом АКШ-3,6-01 проводились на опытном поле «Тушково» Горецкого района Могилевской области на двух операциях: вспашка и предпосевная обработка.

Тяговое сопротивление трактора измерялось динамометрической автосцепкой и измерительным усилителем Spider 8, подключенным к ЭВМ с установленным специализированным программным обеспечением.

Для выполнения исследований в состав экспериментальной установки вошли приборы, представленные в таблице 1.

Перед началом испытаний трактор был укомплектован в соответствии с требованиями завода-изготовителя, было установлено давление в шинах и проверена высота почвозацепов. Дизельное топливо (ДТ-Л-К4) и смазочные материалы, применяемые в тракторе при испытании, соответствуют эксплуатационной документации на трактор. Газовый баллон заправлялся сжиженным автомобильным газом марки ПБА [9].

Электрическое питание приборов осуществлялось от бортовой сети колесного трактора посредством инвертора с максимальной мощностью 1500 Вт. Перед началом испытаний трактор был прогрет под нагрузкой

в течение 30 минут [10]. Для нахождения реальной скорости колесного трактора был размечен зачетный участок длиной 200 м и фиксировалось время движения трактора при прохождении этого участка согласно секундомерам [12].

Среднюю скорость движения агрегата (км/ч) определяли по формуле [12]

$$V_{ср} = 3,6 \frac{S}{\tau_{оп}}, \quad (3)$$

где S – путь, пройденный трактором за опыт, м;
 $\tau_{оп}$ – время опыта, с.



Рисунок 2. Трактор «Беларус-922» с системой подачи газа: 1 – газовый баллон; 2 – выносное заправочное устройство (ВЗУ); 3 – газовый редуктор; 4 – датчик температуры отработанных газов

Среднюю тяговую мощность $N_{ср}$, кВт определяли по формуле:

$$N_{ср} = \frac{P_{кр.ср} \cdot v_{ср.о}}{3600}, \quad (4)$$

где $P_{кр.ср}$ – среднее тяговое усилие, Н;

$v_{ср.о}$ – средняя скорость трактора за пройденный путь, км/ч.

Таблица 1. Приборы и оборудование, входящие в состав экспериментальной установки

Измеряемый параметр	Наименование прибора или оборудования	Марка прибора	Класс точности (погрешность)
Дымность отработавших газов	Дымомер	MDO 2 LON пультом управления	± 1,5 %
Токсичность отработавших газов	Газоанализатор	MGT 5	± 3 %
Частота вращения коленчатого вала	Тахометр	AVL DISpeed 492	± 0,02 %
Расход топлива	Объемный датчик расхода дизельного топлива	ДРТ-5 с терминалом СКРТ 31	± 1 %
Тяговое сопротивление	Динамометрическая автосцепка	–	± 2 %
	Измерительный усилитель	Spider 8	–

Расход ДТ замерялся (л/ч) расходомером топлива ДРТ-5 с отображением на дисплее терминала СКРТ-31, расположенного в кабине трактора.

Часовой расход ДТ $G_{\text{ДТ}}$, кг/ч рассчитывали по формуле:

$$G_{\text{ДТ}} = V_{\text{ДТ}} \cdot \rho_{\text{ДТ}}, \quad (5)$$

где $V_{\text{ДТ}}$ – показания измерителя расхода топлива, л/ч;

$\rho_{\text{ДТ}}$ – плотность дизельного топлива при опыте, $\rho_{\text{ДТ}} = 835 \text{ кг/м}^3$.

Удельный крюковой расход ДТ трактором $q_{\text{ДТ}}$, г/(кВт ч) рассчитывался по формуле:

$$q_{\text{ДТ}} = 1000 \cdot \frac{G_{\text{ДТ}}}{N_{\text{ср}}}, \quad (6)$$

где $N_{\text{ср}}$ – усредненное значение тяговой мощности, кВт.

Погектарный расход ДТ трактором $Q_{\text{ДТ}}$, (кг/га), рассчитывался по формуле:

$$Q_{\text{ДТ}} = \frac{G_{\text{ДТ}}}{W_{\text{ч}}}, \quad (7)$$

где $W_{\text{ч}}$ – часовая производительность агрегата, га/ч.

Массовые выбросы сажи рассчитывались по формуле [13]:

$$E_{\text{с}} = \frac{\pi \cdot C \cdot Q_{\text{ог}} \cdot \alpha \cdot \rho_{\text{с}} \cdot 10^{-3}}{6 \cdot (100 - C) \cdot L_{\text{к}}}, \quad (8)$$

где $Q_{\text{ог}}$ – расход ОГ, $\text{м}^3/\text{ч}$;

C – значение затемнения светового потока в процентах от полного поглощения (оптическая плотность дыма), %;

α – диаметр частиц сажи, $\alpha = 0,047 \text{ м}$;

$\rho_{\text{с}}$ – плотность сажевых частиц, $\rho_{\text{с}} = 1450 \text{ кг/м}^3$;

$L_{\text{к}}$ – длина измерительной камеры дымомера (MDO 2 LON), $L_{\text{к}} = 0,43 \text{ м}$.

Методика расчета массовых выбросов оксидов азота согласно правилам ЕЭК ООН №96 [14].

Испытания машинно-тракторного агрегата (МТА) «Беларус-922» с плугом ПЛН-3-35 на СДГТ (рис. 3) проводились в следующих полевых условиях: предшествующая культура – клевер луговой; предшествующая обработка – первый укос клевера с уборкой его на сено; влажность почвы – 18,2 %; уклон поля – менее 0,3°; средняя твердость почвы на глубине пахотного слоя – 201,1 Н/см².

Испытания МТА «Беларус-922» с АКШ-3,6-01 на СДГТ проводились после вспашки на этом же участке с целью предпосевной подготовки почвы, но при более высокой влажности – 19,4 %.

Работа МТА «Беларус-922» с АКШ-3,6-01 проводилась на второй передаче первого диапазона с включенным мультипликатором, при постоянной частоте вращения коленчатого вала двигателя на уровне 1800 мин⁻¹.

Проведены натурные (эксплуатационные) испытания колесного трактора «Беларус-922» с трехкорпусным плугом ПЛН-3-35 при работе на СДГТ, состоящем из 74 % ДТ и 26 % ГТ (ПБА). Среднее тяговое усилие трактора составило 13,03 кН, при работе на СДГТ – 13,15 кН.

Удельный расход ДТ трактором составил 463,0 г/кВт·ч, при работе на СДГТ – 344,4 г/кВт·ч, т. е. снизился на 25,61 %. Погектарный расход ДТ с установленной системой подачи ГТ при работе с плугом снизился с 15,638 до 11,681 кг/га, т. е. на 25,31 %, а тяговый КПД изменился с 0,501 до 0,503 на 0,4 %. Дымность ОГ дизеля трактора снизилась на 39,3 %, при этом содержание оксидов азота увеличилось на 2,58 %.



Рисунок 3. Работа МТА «Беларус-922» + ПЛН-3-35 при работе на СДГТ

При работе машино-тракторного агрегата «Беларус-922» + АКШ -3,6-01 на ДТ тяговое усилие трактора составило 10,74 кН, а при работе на СДГТ – 10,78 кН.

Погектарный расход ДТ с установленной системой подачи ГТ при работе с АКШ-3,6 снизился с 4,713 до 4,176 кг/га, т.е. на 11,38 %. Суммарный погектарный расход изменился с 4,713 до 4,670 кг/га, т.е. на 0,89 %. Удельный расход ДТ трактором составил 417,0 г/кВт ч, при работе на СДГТ – 367,9 г/кВт.ч, т.е. снизился на 11,76 %.

Анализ результатов натурных испытаний колесного трактора «Беларус-922» при использовании СДГТ при работе с АКШ-3,6-01 показал снижение дымности ОГ на 16,47 % и оксидов азота на 9,31 %. Тяговый КПД изменился с 0,542 до 0,544, т.е. на 0,53 %, что свидетельствует об улучшении сгорания СДГТ в цилиндрах силовой установки колесного трактора.

Заключение

1. Эксплуатационные испытания газовой системы питания, смонтированной на колесном тракторе «Беларус-922» показали ее работоспособность в реальных условиях. При этом погектарный расход топлива при работе на СДГТ уменьшился, как при работе с плугом ПЛН-3-35 на 25,31 %, с 15,638 до 11,681 кг/га, а при работе с АКШ-3,6-01 на 11,38 %, с 4,713 до 4,176 кг/га.

Суммарный погектарный расход дизельного и газового топлива при работе МТА «Беларус-922» с плугом ПЛН-3-35 снизился на 1,90 %, а при работе с АКШ-3,6-01 – на 0,89 %.

2. Выбросы твердых частиц на гектар при работе трактора на СДГТ с плугом ПЛН-3-35 снизились на 37,39 %, а оксиды азота увеличились на 2,49 %. Погектарные выбросы токсичных компонентов колесного трактора при предпосевной обработке почвы на СДГТ показали снижение ТЧ на 15,76 % и оксидов азота на 8,75 %.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Альтернативные виды топлива для двигателей: монография / А.Н. Карташевич [и др.]. – Горки: БГСХА, 2012. – 376 с.

2. Карташевич, А.Н. Влияние подачи газового топлива на экологические показатели дизеля / А.Н. Карташевич, П.Ю. Малышкин // Вестник БГСХА. – 2013. – №3. – С. 110-115.

3. Карташевич, А.Н. ДВС. Основы теории и расчета: учеб. пос. / А.Н. Карташевич, Г.М. Кухаренок. – Горки, 2008. – 312 с.

4. Малышкин, П.Ю. Улучшение эксплуатационных показателей дизелей применением газовых топлив / П.Ю. Малышкин // Конструирование, использование и надежность машин сельскохозяйственного назначения: сб. матер. XXIV межвуз. науч.- практ. конф. – Брянск, 2014. – №3. – С. 60-62.

5. Малышкин, П.Ю. Системы подачи газового топлива в дизель / П.Ю. Малышкин, А.Н. Карташевич // Вестник БГСХА. – 2015. – № 4. – С. 128- 136.

6. EN 12341:2014 «Ambient air. Standard gravimetric measurement method for the determination of the PM 10 or PM2.5 mass concentration of suspended particulate matter».

7. IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. Lyon, France, 2006. – 25 с.

8. Электронная система впрыска газового топлива в дизель: полез. модель ВУ 10060 / А.Н. Карташевич, П.Ю. Малышкин. – Оpubл. 15.01.2014.

9. Паспорт качества сжиженного углеводородного топлива / РУП «Производственное объединение «Белоруснефть». – Речица, 2012 г.

10. Руководство по эксплуатации «Беларус 812/822/912/922 822-0000010РЭ»: утв. ПО «Минский тракторный завод». – Минск, 1999. – 339 с.

11. Карташевич, А.Н. Определение оптимального коэффициента избытка воздуха при работе дизеля на газовом топливе / А.Н. Карташевич, П.Ю. Малышкин // Вестник БГСХА. – 2015. – № 1. – С. 121-126.

12. Тракторы сельскохозяйственные. Определение тяговых показателей: ГОСТ 30745-2001 (ИСО 789-9-90). – Введ. 01.01.2003. – Минск: Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2002. – 12 с.

13. Карташевич, А.Н. Зависимость оптической плотности отработавших газов автотракторных двигателей от массового содержания в них частиц сажи / А.Н. Карташевич, В.А. Белоусов, А.А. Сушнев // Экология и жизнь (наука, образование, культура): междунар. сб. ст. / НовГУ им. Ярослава Мудрого; отв. ред. Н.Н. Семчук. – 1998. – Вып. 4. – С. 6-16.

14. Единообразные предписания, касающиеся официального утверждения двигателей с воспламенением от сжатия для установки на сельскохозяйственных и лесных тракторах и внедорожной подвижной технике в отношении выброса загрязняющих веществ этими двигателями: Правила ЕЭК ООН № 96. – Введ. 05.10.2012. – Минск: Белорус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 2013. – 117 с.

15. Исследования тракторного дизеля при подаче газа с использованием планирования эксперимента / П.Ю. Малышкин [и др.] // Вестник БГСХА. – 2019. – № 2. – С. 239- 243.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 03.06.2020