

ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ И ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ГАЗОВОГО ТОПЛИВА ДЛЯ ПИТАНИЯ ДИЗЕЛЕЙ

П. Ю. МАЛЫШКИН, А. Н. КАРТАШЕВИЧ

УО «Белорусская государственная орденов Октябрьской Революции
и Трудового Красного Знамени сельскохозяйственная академия»,
г. Горки, Республика Беларусь, 213407, e-mail: pavelm36@yandex.by

(Поступила в редакцию 10.05. 2023)

В статье приведены модели сельскохозяйственной техники, работающей на газомоторном топливе, производимые ведущими машиностроительными заводами страны.

Описана стратегия применения газового топлива для транспорта агропромышленного комплекса Республики Беларусь, позволяющая снизить эксплуатационные затраты на топливо при эксплуатации машинно-тракторного парка предприятий.

В Республике Беларусь, из-за недостаточно развитой инфраструктуры газонаполнительных компрессорных станций, для питания сельскохозяйственной техники предпочтительно, не полностью переводить ее на газовое топливо, а использовать газ как добавку для питания техники имеющей дизельную силовую установку.

Представлена методика, проведена оценка экологической и экономической эффективности применения различных видов альтернативных топлив с использованием программы «РЭЭИГГ-ДВС».

Объект исследования – дизельный двигатель Д-245.5S2, оснащенный электронной системой впрыска газового топлива во впускной коллектор. Работа двигателя осуществляется на дизельном топливе и СУГ. Работа двигателя на номинальном режиме и настроенной электронной системой впрыска газового топлива, гораздо эффективнее. Суммарный удельный эффективный расход топлива снижается с 223,1 до 219 г/кВт·ч, то есть на 1,8 %, при этом часовой расход дизельного топлива за счет замещения его газовым снижается на 22 %. В итоге такое решение обеспечивает снижение токсичности отработавших газов на 53,6 % и позволяет получить экологический эффект от снижения ущерба, наносимого окружающей среде, в размере 1040,80 руб на 1000 часов. Денежные затраты на топливо снижаются на 4,5 %, а расчетный годовой экономический эффект составляет 2901,15 руб. на 1000 часов работы дизеля.

Ключевые слова: *дизель, газовое топливо, СУГ (сжиженный углеводородный газ), экологический эффект, экономический эффект.*

The article contains models of agricultural machinery running on gas, produced by the country's leading machine-building plants.

The strategy of using gas fuel for transport of the agro-industrial complex of the Republic of Belarus is described, which allows to reduce operating costs on fuel during operation of the machine and tractor park of enterprises.

In the Republic of Belarus, due to the insufficiently developed infrastructure of gas-filling compressor stations, it is preferable not to completely transfer it to gas fuel for feeding agricultural equipment, but to use gas as an additive for feeding equipment having a diesel power plant.

The methodology was presented, the environmental and economic efficiency of the use of various types of alternative fuels was assessed using the REEIGG-ICE program.

The subject of the study is a diesel engine equipped with D-245.5S2 electronic system for injecting gas fuel into the intake manifold. Engine operation is carried out on diesel fuel and LPG. The operation of the engine in rated mode and tuned electronic gas fuel injection system is much more efficient. The total specific effective fuel consumption decreases from 223.1 to 219 g/kWh, that is, by 1.8 %, while the hourly consumption of diesel fuel due to its replacement with gas is reduced by 22 %. As a result, such a solution ensures a decrease in the toxicity of exhaust gases by 53.6 % and allows obtaining an environmental effect from reducing the damage caused to the environment in the amount of 1040.80 rubles for 1000 hours. The cost of fuel is reduced by 4.5 %, and the estimated annual economic effect is 2901.15 rubles. for 1000 hours of diesel operation.

Key words: *diesel engine, gas fuel, LPG (Liquified Petroleum Gas), environmental effect, economic effect.*

Введение

В Республике Беларусь с каждым годом неуклонно растет потребление дизельного топлива (ДТ) транспортными средствами всех видов экономической деятельности. При этом мировые запасы нефти при текущем потреблении топливно-энергетических ресурсов заметно истощаются. Поэтому одним из актуальных вопросов современности является постепенный переход к применению альтернативных топлив, способных частично и (или) полностью заменить традиционные для питания двигателя внутреннего сгорания (ДВС). В числе таких альтернативных топлив в настоящее время рассматриваются газовые топлива, спирты, водородные, эфиры и др., которые позволяют не только снизить зависимость от импортируемого топлива, но и улучшить экологические показатели двигателей [1].

Применение альтернативных источников энергии интересовало ученых и инженеров-конструкторов на протяжении всего развития и совершенствования ДВС. При этом с каждым годом расширяется сфера применения автотракторной и специальной техники, увеличивается единичная мощность и расширяется сфера применения машин. Конструкции ДВС должны подчиняться совре-

менным требованиям норм по охране окружающей среды. Эти требования касаются как самих двигателей, так и применяемых в них топлив [2].

Целью данного исследования является анализ сферы использования газовых топлив и оценка экологической и экономической эффективности применения их в качестве газомоторного топлива для сельскохозяйственной техники.

Основная часть

Существенного экономического результата в совершенствовании рабочего процесса ДВС можно добиться, если обеспечить эффективную работу ДВС на дешевых и малоэнергозатратных в производстве видах топлива. Примером такой замены в сфере нефтяных топлив может быть полное и (или) частичное замещение дизельного топлива газовым [2].

Минский тракторный и Минский моторный заводы накопили большой опыт по созданию тракторов и двигателей, работающих на газомоторном топливе. Первыми проектами стали газодизельные варианты БЕЛАРУС-82.1ГД с двигателем ММЗ ГД-243, БЕЛАРУС-92П, БЕЛАРУС-320.4М с двигателем ММЗ-3ЛГД, БЕЛАРУС-1221.2 с двигателем Д-260.2-846, работающие с использованием 30 % дизельного топлива (запальная доза) и 70 % компримированного природного газа (КПГ). Дальнейшее развитие техники привело к созданию газопоршневых моделей БЕЛАРУС-1221.2 с двигателем МТ05.15-50, БЕЛАРУС-1221.3 с двигателем ММЗ-262 и БЕЛАРУС-2022.3 ММЗ-262 CNG/LNG. На ОАО «Гомсельмаш» создан зерноуборочный комбайн КЗС-4118К с газопоршневым двигателем Cummins GSM-ISG12-G-350.

Рассмотренные модели газовой сельскохозяйственной техники в первую очередь ориентированы на российский рынок с широко развитой инфраструктурой газовых заправок природным газом, так как они имеют возможность работать на полностью заправленном модуле КПГ при номинальной нагрузке порядка 6–7 часов.

Для Республики Беларусь применять сельскохозяйственную технику с большим потреблением природного газа, с экономической точки зрения, невыгодно на сегодняшний день, из-за недостаточно развитой инфраструктуры газонаполнительных компрессорных станций (АГНКС), их количество составляет 25 ед., т.е. 2 % от общего количества газозаправочных станций, а для заправки сжиженным углеводородным газом (СУГ) имеется 356 АГЗС [2]. Кроме этого, сжиженный углеводородный газ менее опасен при эксплуатации, так как хранится в баллонах при давлении не более 1,6 МПа, и его можно перевозить автогазовозами на расстояние до 500 км. Основные технико-экономические показатели топлив представлены в табл. 1.

Таблица 1. Технико-экономические показатели топлив [1, 2]

Вид топлива	Низшая теплота сгорания, МДж/кг	Стоимость топлива руб/л (руб/м ³)	Плотность топлива, кг/м ³	Стоимость топлива, руб/кг	Удельная стоимость топлива, руб/100 МДж
Природный газ	49,85	1,06	424	2,50	5,02
СУГ	45,81	1,28	542	2,36	5,15
Дизельное топливо	44,5	2,46	750	3,28	7,37
Бензин	42,5	2,46	835	2,95	6,94
Водород	120,1	2,05	89	23,03	19,18
Метанол	18	12,0	796	15,08	83,78

Стоит отметить, что удельная стоимость СУГ на 2,6 % выше, чем природного газа и на 35 % ниже, чем у ДТ. А с учетом распространённости его с уверенностью можно считать одним из наиболее перспективных топлив, на сегодняшний день, для питания самоходной сельскохозяйственной техники.

В Республике Беларусь природный газ (метан) широко используется в качестве газомоторного топлива, для питания техники, работающей по маршруту и имеющей возможности быстро добраться до АГНКС. На нем достаточно эффективно эксплуатируются легковые автомобили, пассажирский автотранспорт, коммунальная, грузовая, специальная техника и даже карьерные самосвалы. Компримированный природный газ (КПГ) не подвергается химической переработке, а только сжимается компрессорами, что значительно удешевляет процесс его производства. Поэтому стоимость ГТ всегда будет ниже нефтяных видов.

При этом, как показали проведенные исследования, для самоходной сельскохозяйственной техники [3–7] добавка СУГ в количестве 20–30 % от ДТ позволяет улучшить топливно-экономические показатели дизеля и не создает трудностей с размещением газовых емкостей на технике, так как не требуется больших запасов СУГ.

В тоже время не требуется значительных средств и времени на переоборудование дизельной техники, находящейся в эксплуатации, для оснащения и настройки газовой системой питания.

Однако в настоящее время не разработано единой методики, позволяющей проводить комплексную оценку сравнительной экономической эффективности применения различных видов альтернативных топлив. Экономический эффект за счет применения разработанной системы подачи газового топлива для дизеля [8] будет обусловлен замещением ДТ газовым топливом и снижением нагрузки на окружающую среду за счет уменьшения выбросов токсичных компонентов с отработавшими газами (ОГ). Материальные затраты при применении системы регулирования в первую очередь связаны с изготовлением, монтажом и обслуживанием системы в процессе эксплуатации двигателя трактора.

Экологический эффект от снижения ущерба, наносимого ОГ окружающей среде, при эксплуатации двигателя с системой подачи газового топлива по сравнению с двигателем без системы можно определить по методике [9], переложенной на алгоритмический язык, по программе «РЭЭИГТ-ДВС» [10], которая подходит для расчета экологической эффективности применения промышленных и природных газов для ДВС. В основе методики [9] заложено снижение токсичности по показателю K , равному денежным расходам, связанным с применением каждого из методов, отнесенным к 1 % снижения токсичности отработавших газов и рассчитывается по формуле:

$$K = \frac{C_n}{\eta_i}, \quad (1)$$

где C_n – стоимость расходов, связанных с применением системы подачи ГТ; η_i – эффективность снижения концентрации i – го токсичного компонента.

Стоимость расходов, связанных с применением системы подачи газового топлива, рассчитывается по формуле:

$$C_n = a \cdot C_1 + b \cdot \Delta G_T \cdot T + C_2, \quad (2)$$

где C_1 – стоимость системы подачи газового топлива, $C_1 = 2276,00$ руб; a – коэффициент годовой сменности устройства, равный годовому пробегу или наработке машины; ΔG_T – изменение потребления дизелем топлива, кг/ч; T – время эксплуатации машины, ч; b – стоимость 1 кг топлива, руб; C_2 – стоимость эксплуатации, обслуживания и ремонта конструктивных нововведений, руб.

Эффективность снижения концентрации i -го токсичного компонента рассчитывается по формуле:

$$\eta_i = (C_{i1} - C_{i2}) / C_{i1} \cdot 100 \%, \quad (3)$$

где C_{i1} , C_{i2} – соответственно, концентрации i -го компонента без применения и с применением метода снижения токсичности, %.

Эффективность применения альтернативного топлива дополнительно можно оценить по снижению экономического ущерба, наносимого народному хозяйству страны загрязнением окружающей среды [9].

Материальный ущерб от загрязнения атмосферы для каждого источника можно определить по формуле:

$$Y = \gamma \cdot \sigma \cdot f \cdot M, \text{ руб/год}, \quad (4)$$

где γ – относительный коэффициент ущерба, руб /усл. кг; σ – безразмерная величина, как показатель относительной опасности загрязнения воздуха; f – поправочный коэффициент, учитывающий характер рассеяния примеси в атмосфере, для автотранспорта $f = 10$; M – приведенная масса годового выброса загрязнений, усл. кг/год.

Приведенная масса годового выброса загрязнений, определяемая по формуле:

$$M = \sum A_i \cdot m_i, \quad (5)$$

где A_i – показатель относительной агрессивности загрязнений i -го вида, усл.кг/кг; m_i – масса годового выброса загрязнений i -го вида в год, кг/год.

Значение A_i определяется по формуле:

$$A_i = a_i \cdot a_j \cdot \delta_i, \text{ усл.кг/кг}, \quad (6)$$

где a_i – показатель относительной опасности присутствия примеси в воздухе, вдыхаемом человеком; a_j – поправка, учитывающая вероятность накопления исходной примеси или вторичных загрязнителей в компонентах окружающей среды и в цепях питания, а также поступления примеси в организм человека неингаляционным путем; δ_i – поправка, учитывающая действие на различные реципиенты, помимо человека.

Принимаем значения постоянных величин и поправок по рекомендации методики [9].

Годовой экономический эффект при эксплуатации двигателя с системой подачи газового топлива по сравнению с двигателем без системы можно определить по формуле:

$$\mathcal{E}_{\text{гз}} = (G_{\text{ДТг}} - G_{\text{ДТ+Гг}}) \cdot \mathcal{C}_{\text{ДТ}} - G_{\text{Гг}} \cdot \mathcal{C}_{\text{Г}} + \mathcal{Y} - \frac{C_1 \cdot H_{\text{Г}}}{T_{\text{р}}} - \mathcal{Z}_{\text{ТОиР}}, \quad (7)$$

где $G_{\text{ДТг}}$ и $G_{\text{ДТ+Гг}}$ – годовые расходы ДТ двигателем без системы подачи газового топлива и двигателя, оснащенного системой подачи газового топлива, кг; $G_{\text{Гг}}$ – годовой расход газового топлива двигателем, оснащенного системой подачи газового топлива, кг; $\mathcal{C}_{\text{ДТ}}$ и $\mathcal{C}_{\text{Г}}$ – комплексная цена дизельного и газового топлив, руб/кг; \mathcal{Y} – годовой экологический эффект, руб.; C_1 – балансовая стоимость системы подачи газового топлива, руб.; $H_{\text{Г}}$ – годовая наработка двигателя, ч; $T_{\text{р}}$ – планируемый ресурс системы подачи газового топлива, ч; $\mathcal{Z}_{\text{ТОиР}}$ – повышение затрат на ТО и ремонт, руб.

Повышение затрат на ремонт и ТО рассчитали исходя из стоимости устанавливаемой системы подачи газового топлива:

$$\mathcal{Z}_{\text{ТОиР}} = \frac{C_{\text{Г}} \cdot r_{\text{тр}}}{100}, \quad (8)$$

где $r_{\text{тр}}$ – норматив затрат на ТО и ремонт техники, $r_{\text{тр}} = 11,5 \%$.

Технико-экономические показатели и результаты расчета экономической эффективности применения газового топлива для питания дизеля трактора представлены в табл. 2.

Таблица 2. Технико-экономические показатели и результаты расчета экономической эффективности применения ГТ на дизеле

Показатели	Обозначение	Значение	
		ДТ	ДТ+СУГ
Модель ДВС:		Д-245.5S2	
Номинальная мощность, кВт	N_e	70	70
Удельный суммарный расход топлива, г/кВт·ч	g_e	223,1	219,0
Балансовая стоимость средства для подачи ГТ C_1 , руб.	C_1	–	2276
Повышение затрат на ТО и ремонт, руб	$\mathcal{Z}_{\text{ТОиР}}$	–	26,2
Стоимость расходов, связанных с применением альтернативного топлива, руб	$\mathcal{C}_{\text{П}}$	–	13009,2
Концентрация NO_x в ОГ, ppm	\mathcal{C}_{NO_x}	470	490
Концентрация S в ОГ, %	\mathcal{C}_S	28,0	13,0
Концентрация $S_n H_m$ в ОГ, ppm	$\mathcal{C}_{S_n H_m}$	5	114
Годовая наработка, ч	$H_{\text{Г}}$	1000	1000
Планируемый ресурс, ч	$T_{\text{р}}$	10000	10000
Годовой расход ДТ, кг	$G_{\text{ДТг}}$	15900	12670
Годовой расход ГТ, кг	$G_{\text{Гг}}$	–	3204,08
Комплексная цена топлива, руб/кг	\mathcal{C}	2,946	2,818
Затраты на топливо, руб	$\mathcal{Z}_{\text{т}}$	46843,11	44729,01
Экономия затрат на топливо, руб		–	2114,11
Экономия удельных затрат на топливо, руб/ч		–	2,11
Эффективность снижения токсичности ОГ для S , %	η_i	–	53,6
Значение показателя K при снижении S в ОГ, руб/%	\mathcal{K}		210,47
Годовой экологический эффект, руб.	\mathcal{Y}	–	1040,80
Годовой экономический эффект, руб.	$\mathcal{E}_{\text{гз}}$	–	2901,15

При расчете годового расхода ДТ и ГТ при использовании системы подачи газового топлива учитываем время работы дизеля на номинальном режиме.

Годовой расход ДТ и ГТ при работе дизеля рассчитаем по формуле:

$$G_{\text{ДТг}} = G_{\text{ДТ}} \cdot H_{\text{Г}}, \quad (9)$$

$$G_{\text{Гг}} = G_{\text{Г}} \cdot H_{\text{Г}}, \quad (10)$$

где $G_{дт}$ – часовой расход ДТ на номинальном режиме при работе дизеля без системы подачи газового топлива, кг/ч; G_T – расход газа двигателем, оснащенный системой подачи газового топлива, кг/ч.

Применение сжиженного углеводородного газа как добавки для питания дизеля позволяет снизить суммарный удельный эффективный расход топлива с 223,1 до 219 г/кВт·ч, т. е. на 1,8 % и часовой расход дизельного топлива на 22 % при сохранении эффективной мощности. Такое решение обеспечивает снижение токсичности отработавших газов на 53,6 % и позволяет получить экологический эффект от снижения ущерба, наносимого окружающей среде, в размере 1040,80 рублей за 1000 часов работы на номинальном режиме. Кроме этого, снижаются на 4,5 % (2,11 руб/ч) удельные затраты на топливо, а расчетный годовой экономический эффект составляет 2901,15 руб. на 1000 часов работы дизеля.

Заключение

1. Для Республики Беларусь, имеющей более 350 автомобильных газозаправочных станций, целесообразно использовать сжиженный углеводородный газ как добавку для питания дизелей различной промышленной и сельскохозяйственной техники, работающей вблизи АГЗС.

2. Применение СУГ как добавки для питания дизеля, работающего на номинальном режиме, позволяет снизить расход дизельного топлива на 22 %, тем самым снизить денежные затраты на топливо на 4,5 %, или 2,11 руб/ч, при стоимости дизельного и газового топлива 2,46 и 1,28 рубля за литр соответственно.

3. Годовой экономический эффект от применения газового топлива составил 2901,15 рубля в расчете на 1000 ч работы дизеля, из которых экологический эффект составляет 1040,80 рублей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Альтернативные виды топлива для двигателей: монография / А. Н. Карташевич [и др.]. – Горки: БГСХА, 2012. – 376 с.
2. Газовые заправки [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.belarusinfo.by> – Дата доступа: 1.05.2023.
3. Карташевич, А. Н. Влияние подачи газового топлива на экологические показатели дизеля / А. Н. Карташевич, П. Ю. Малышкин // Вестник БГСХА. – 2013. – №3. – С. 110–115.
4. Карташевич, А. Н. Исследование эксплуатационных и экологических показателей колесного трактора с подачей газового топлива / А. Н. Карташевич, П. Ю. Малышкин // Вестник БарГУ. Барановичи. – 2014. – №1. – С. 65–68.
5. Карташевич, А. Н. Улучшение энергетических свойств колесного трактора при работе на смешанном дизельно-газовом топливе / А. Н. Карташевич, П. Ю. Малышкин // Агропанорама. – 2020. – № 4 – С. 36–40.
6. Малышкин, П. Ю. Оптимизация подачи газового топлива для тракторного дизеля / П. Ю. Малышкин // Вестник БГСХА. – 2022. – № 4. – С. 168–172.
7. Исследования тракторного дизеля при подаче газа с использованием планирования эксперимента / П. Ю. Малышкин, А. Н. Карташевич, С. А. Плотников, М. В. Симонов // Вестник БГСХА. – 2019. – № 2. – С. 239–243.
8. Электронная система впрыска газового топлива в дизель: пат. 10060 Респ. Беларусь, МПК F 02M 43/00 / А. Н. Карташевич, П. Ю. Малышкин, заявитель Белорус. гос. с-х. академия. № u 20130295; заявл. 05.04.2013; опубл.: 30.04.2014. // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2014. № 2 – С. 150.
9. Временная типовая методика определения экономической эффективности осуществления природоохранных мероприятий и оценки экономического ущерба, причиняемого народному хозяйству загрязнением окружающей среды / А. С. Быстров, В. В. Баранкин, М. А. Виленский [и др.]. – М.: Экономика, 1986. – 96 с.
10. Плотников, С. А. Расчет экономической эффективности использования генераторного газа в ДВС («РЭЭИГГ-ДВС») / С. А. Плотников, Ю. В. Ланских, В. А. Подгорный, А. С. Зубакин, П. Ю. Малышкин // Свидетельство об офиц. регистр. прогн. для ЭВМ № 2018618558 от 16.07.2018.