DOI: https://doi.org/10.17816/0321-4443-623619

Оригинальное исследование

Исследование экологических показателей работы дизеля на биоминеральных топливных смесях

С.А. Плотников[1], А.Н. Карташевич[2], Г.Э. Заболотских[1]

[1] Вятский государственный университет», Киров, Российская Федерация;
[2] Белорусская государственная орденов Октябрьской Революции и Трудового Красного Знамени сельскохозяйственная академия, Горки, Республика Беларусь

АННОТАЦИЯ

Обоснование. Исследования альтернативных видов топлива для автотракторной техники имеют большое значение для развития российского двигателестроения. Эта тенденция находит свое место в Транспортной стратегии Российской Федерации до 2030 года, таким образом, являясь одним из приоритетных направлений. Многие отечественные ученые долгое время занимаются проблемой многотопливности двигателей внутреннего сгорания.

В данной статье рассматривается работа дизеля Д-245.5S2 на биоминеральных топливных смесях (БМТС) на предмет их экологичности по методике Правил ООН №96 (02).

Цель работы — обоснование актуальности применения составов биоминеральных топливных смесей (БМТС) для работы дизельного двигателя в режимах различных нагрузок, опирающееся на сравнение их итогового значения удельного выброса с удельным выбросом токсичных компонентов чистого ДТ согласно методике ЕЭК ООН №96 (02).

Методы. Для приготовления БМТС были использованы следующие компоненты: этанол (Э), сурепное масло (СурМ) и дизельное топливо (ДТ). Биологические компоненты примешивались в разных концентрациях к ДТ. Их соотношение в смеси определялось путем лабораторных исследований физико-химических свойств компонентов. В дальнейшем смеси были подвергнуты стендовым испытаниям на установке оснащённой дизелем Д-245.5S2 с электротормозным стендом RAPIDO SAK N670. Полученные суммарные значения относительных величин исследуемых токсичных компонентов (сажа, монооксид углерода, оксиды азота, углеводороды) за все испытательные циклы (процентов — % и миллионных долей — ppm) были переведены в действительное содержание данных веществ от общего содержания удельного выброса в отработавших газах (согласно Правилам ООН № 96(02) — г/кВт·ч).

Результаты. Установлено, что использование указанных смесей положительно сказывается на экологической составляющей отработавших газов: замечено снижение эмиссии исследуемых токсичных компонентов при работе на БМТС в сравнении с традиционным дизельным топливом.

Заключение. Хотя БМТС показывают сниженные значения эмиссии вредных веществ в выхлопных газах по сравнению с чистым ДТ, они не могут привести дизель к экологическим показателям *Stage II* Правил ЕЭК ООН №96 (02); необходима оптимизация системы топливоподачи, установка дополнительных систем фильтрации отработавших газов.

Ключевые слова: биоминеральная топливная смесь; отработавшие газы; дизельное топливо; монооксид углерода; оксиды азота; углеводороды; сажа.

Как цитировать:
Плотников С.А., Карташевич А.Н., Заболотских Г.Э. Исследование экологических показателей работы дизеля на биоминеральных топливных смесях // Тракторы и сельхозмашины. 2024. Т. 91, № 3. С. 261–269. DOI: https://doi.org/10.17816/0321-4443-623619

Рукопись получена: 20.11.2023 **Рукопись одобрена:** 25.06.2024 **Опубликована online:** 01.07.2024

Статья доступна по лицензии CC BY-NC-ND 4.0 International
© Эко-Вектор, 2024

DOI: https://doi.org/10.17816/0321-4443-623619

Original Study Article

Study of the ecological indicators of diesel engine operation with biomineral fuel mixtures

Sergey A. Plotnikov[1], Anatoly N. Kartashevich[2], Georgy E. Zabolotskikh[1]

[1] Vyatka State University, Kirov, Russian Federation;
[2] Belarusian State Agricultural Academy, Gorki, Republic of Belarus

ABSTRACT

BACKGROUND: Studies of alternative fuels for automobiles and tractors are of great importance for the development of the Russian engine industry. This trend finds its place in the Transport Strategy of the Russian Federation until 2030, thus being one of the priority directions. Many Russian scientists have been dealing with the problem of multi-fuel capability of internal combustion engines for a long time.

This article discusses the operation of the D-245.5S2 diesel engine with biomineral fuel mixtures (BMFM) for their environmental friendliness according to the methodology of UN Regulation No. 96 (02).

AIM: Justification of the relevance of the use of biomineral fuel mixtures (BMFMs) for diesel engine operation in various load modes based on a comparison of their final specific emission value with the specific emission of toxic components of pure diesel fuel according to the UNECE Methodology No. 96 (02).

METHODS: The following components were used for the preparation of BMFMs: ethanol (E), rapeseed oil (RO) and diesel fuel (DF). Biological components were mixed in different ratios to DF. Their ratio in the mixture was determined by laboratory studies of the physicochemical properties of the components. Subsequently, the mixtures were subjected to bench tests at the facility equipped with the D-245.5S2 diesel engine and the RAPIDO SAK N670 electric brake rig. Further, the obtained total values of the relative terms of the studied toxic components (soot, carbon monoxide, nitrogen oxides, hydrogen oxides) for all test cycles (percent — % and millionths — ppm) were converted into the actual content of these substances in the total specific emission in exhaust gases (according to UN Regulation No. 96(02) — g/kWh).

RESULTS: It was found that the use of these mixtures has a positive effect on the environmental component of the exhaust gases: a decrease in the emission of the studied toxic components was observed when operating with the BMFMs in comparison with traditional diesel fuel.

CONCLUSION: Although BMFMs show reduced emission values of harmful substances in exhaust gases compared to pure diesel fuel, they cannot make a diesel engine to satisfy the environmental indicators of the Stage II of the UNECE Regulation No. 96 (02); optimization of the fuel supply system and installation of additional exhaust gas filtration systems are necessary.

Keywords: biomineral fuel mixture; exhaust gases; diesel fuel; carbon monoxide; nitrogen oxides; hydrocarbons; soot.

To cite this article:
Plotnikov SA. Kartashevich AN, Zabolotskikh GE. Study of ecological indicators of diesel engine operation with biomineral fuel mixtures. *Tractors and Agricultural Machinery.* 2024;91(3):261–269. DOI: https://doi.org/10.17816/0321-4443-623619

Received: 20.11.2023 **Accepted:** 25.06.2024 **Published online:** 01.07.2024

moscow polytech
The article can be used under the CC BY-NC-ND 4.0 International license
© Eco-Vector, 2024
ECO•VECTOR

ВВЕДЕНИЕ

В условиях внешнеполитического давления, оказываемого на различные отрасли нашей экономики, промышленности, а также санкций в отношении экспорта зарубежных товаров — в РФ взят курс на обеспечение суверенитета, в том числе и технологического. Под данным термином здесь понимается правительственная программа, предполагающая приоритет замены импорта сельскохозяйственных товаров, оборудования, электроники собственными продуктами, которые предназначаются для госзаказа и для дальнейшего роста отечественного хозяйства.

Одним из приоритетных направлений, необходимых для обеспечения технологического суверенитета является развитие собственного транспорта. Данное направление отражено в актуальной на сегодняшний день Транспортной стратегии РФ до 2030 года [1]. Документ затрагивает рекомендации в области развития транспорта, а также, в качестве составляющей, уделяется внимание переводу доли транспортных средств на альтернативные источники энергии.

Долгое время вопросами, связанными с альтернативными видами топлива, занимаются как отечественные, так и зарубежные ученые, что говорит о неослабевающем научном интересе к обозначенному исследовательскому направлению [2–4].

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью настоящего исследования является обоснование актуальности применения составов биоминеральных топливных смесей (БМТС) для работы дизельного двигателя в режимах различных нагрузок опираясь на сравнение их итогового значения удельного выброса с удельным выбросом токсичных компонентов чистого ДТ согласно методике ЕЭК ООН № 96 (02).

Для достижения данной цели были определены следующие задачи:

1. Оценка работоспособности дизеля на БМТС.
2. Перевод суммарных значений относительных величин исследуемых токсичных компонентов за все испытательные циклы (процентов — % и миллионных долей — ppm) в действительное содержание данных веществ от общего содержания удельного выброса в отработавших газах (согласно Правил ООН № 96(2) — г/кВт·ч) [5].
3. Определение зависимости экологических показателей работы двигателя в зависимости от разных режимов нагрузки.

МЕТОДЫ

Для приготовления БМТС были использованы следующие компоненты: этанол (Э), сурепное масло (СурМ) и дизельное топливо (ДТ). Биологические компоненты примешивались в разных концентрациях к ДТ. Их соотношение в смеси определялось путем лабораторных исследований физико-химических свойств компонентов (плотности, кинематической вязкости и времени стабильности) [6].

На данном этапе лабораторных исследований были определены два принципиальных состава БМТС:

1. БМТС-10, состоящий из 10% Э, 10% СурМ и 80% ДТ;
2. БМТС-25, содержащий 25% Э, 25% СурМ и 50% ДТ.

Для увеличения времени стабильности смесей добавлялся 1% диспергирующей сукцинимидной присадки С-5А от общего содержания смеси [6].

В последующем данные смеси были подвергнуты стендовым испытаниям на установке оснащенной дизелем Д-245.5S2 с электротормозным стендом RAPIDO SAK N670 с балансировочной маятниковой машиной (производство Германия), при помощи которого устанавливалась необходимая нагрузка на коленчатый вал (КВ) двигателя (рис. 1).

Следует отметить также, что в связи с отличными от чистого ДТ физико-химическими свойствами БМТС были изменены установочные углы опережения впрыскивания. В процессе предыдущих стендовых испытаний (ГОСТ 18509-88) на предмет определения рациональных регулировок топливоподающей аппаратуры (ТПА) (ЯЗДА-773-40.28) удалось установить, что оптимальными установочными углами опережения впрыскивания топлива являются: $\Theta_{впр\ ДТ}$ = 18° п.к.в., $\Theta_{впр\ БМТС\text{-}10}$ = 20° п.к.в., $\Theta_{впр\ БМТС\text{-}25}$ = 22° п.к.в. Указанные значения установочных углов опережения впрыскивания позволяют достичь оптимальных показателей в отношении эмиссии вредных веществ в отработавших газах, а также сохранить эффективные показатели при работе дизеля на БМТС.

Снятие экологических показателей отработавших газов фиксировалось с помощью газоанализатора MGT-5 MAHA через выхлопную систему (рис. 2).

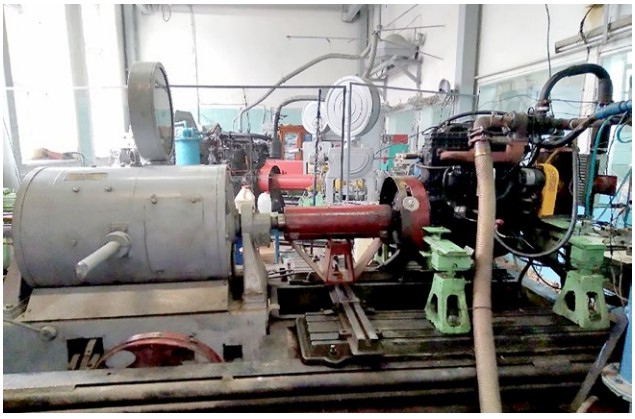

Рис. 1. Электротормозной стенд RAPIDO SAK N670 с балансировочной маятниковой машиной.
Fig. 1. The RAPIDO SAK N670 electric brake rig with a balancing pendulum machine.

DOI: https://doi.org/10.17816/0321-4443-623619

Таблица 1. Диапазоны мощности и значения удельного выброса для двигателей, работающих от сжатия

Table 1. Power ranges and specific emission values for compression-operated engines

Диапазон мощности	Экологический класс	Полезная мощность двигателя, *P*, кВт	Удельный выброс, г/(кВт·ч)			
			Оксид углерода *CO*	Углеводороды *HC*	Оксиды азота NO_x	Твердые частицы PT
E1	Stage II (до 01.09.2023 г.)	130≤P≤156	3,5	1,0	6,0	0,2
E2		156≤P<560	3,5	4,0		0,2
F		75≤P<130	5,0	1,0	6,0	0,3
G		37≤P<75	5,0	1,3	7,0	0,4
D		19≤P<37	5,5	1,5	8,0	0,8
H	Stage IIIA (до 01.09.2023 г.)	130≤P≤560	3,5	4,0		0,2
I		75≤P<130	5,0	4,0		0,3
J		37≤P<75	5,0	4,7		0,4
K		19≤P<37	5,5	4,5		0,6

Рис. 2. Газоанализатор MGT-5 MAHA.
Fig. 2. The MGT-5 MAHA gas analyzer.

Измерение экологических показателей проводилось согласно методике Правил ООН № 96 (02) «Единообразные предписания, касающиеся официального утверждения двигателей с воспламенением от сжатия для установки на сельскохозяйственных и лесных тракторах и внедорожной мобильной технике в отношении выброса загрязняющих веществ этими двигателями» [5]. В соответствии с указанной методикой, было установлено, что паспортные характеристики данного двигателя, относительно номинальной мощности соответствуют диапазону мощности *G* (согласно паспортной документации для дизеля Д-245.5S2 N_e=70±2 кВт) (табл. 1). Определение экологического класса представляется возможным установить только после анализа полученных результатов при стендовых испытаниях двигателя.

Испытательный цикл двигателя данного класса, согласно Правилам ООН № 96(02), подразумевает постепенное снижение скоростного режима двигателя с соответствующим данному режиму снижению нагрузки (крутящего момента) (табл. 2).

Таблица 2. Испытательный цикл дизеля согласно Правилам ООН № 96 (02)

Table 2. Diesel engine test cycle according to UN Regulation No. 96 (02)

Номер режима	Скоростной режим двигателя	Крутящий момент, % от наибольшего на данном скоростном режиме
1	номинальный	100
2	номинальный	75
3	номинальный	50
4	номинальный	10
5	промежуточный	100
6	промежуточный	75
7	промежуточный	50
8	холостого хода	0

Указанная методика исследования экологических показателей предусматривает, что определение количества продуктов сгорания фиксируется в виде удельного выброса (г/(кВт·ч) за весь испытательный цикл (табл. 1).

По мнению А.Р. Кульчицкого на сегодняшний день в системе Минсельхоза, проводящем испытания сельхозтехники, имеются определенные сложности с оборудованием («туннелем»), позволяющим получать данные удельного выброса токсичных веществ [7]. В России станции технического обслуживания оснащены газоанализаторами для измерения концентрации газообразных веществ (оксидов азота, оксидов углерода, суммарных углеводородов).

Таким образом дополнительной задачей, требующей решения, для достижения поставленной цели исследования стал перевод полученных суммарных значений

концентрации токсичных веществ за весь испытательный цикл (%, ppm) в значения удельного выброса (г/(кВт·ч) путем математического расчета полученных данных газоанализатора.

Сначала необходимо было определить эффективный расход топлива g_e (ДТ, БМТС-10 и БМТС-25) и воздуха для достижения эффективной мощности N_e.

Для расчета часового расхода воздуха, необходимого для полного сгорания определенных составов смесей были рассчитаны стехиометрические числа:

- ДТ — 14,6;
- БМТС-10 — 14,03;
- БМТС-25 — 13,16.

С помощью указанных числовых параметров были определены показатели теоретически необходимого расхода воздуха ($L_{теор.}$), связанные с эффективным расходом топлива g_e (при α = 1). Также известно, что дизельные двигатели работают при избыточном количестве воздуха, поступающего в цилиндры (α > 1). В этой связи было рассчитано среднее значение коэффициента избытка воздуха на всех испытательных режимах α = 2. Таким образом, получается, что общее содержание удельного выброса являет собой сумму показателей эффективного расхода топлива g_e с теоретически необходимым удвоенным расходом воздуха ($2L_{теор.}$). Расчеты позволили определить искомые суммарные значения удельного выброса за весь испытательный цикл исходя из концентраций конкретных веществ.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Как представлено в табл. 2, методика испытания дизеля по Правилам ООН № 96 (02) представляет собой восьмирежимный цикл, предполагающий поступательное снижение скоростных режимов от номинального через промежуточный до режима холостого хода. При каждом из скоростных режимов наблюдается снижение оказываемой на двигатель нагрузки. Так, номинальный скоростной режим в зависимости от нагрузки подразделяется еще на четыре режима, промежуточный — на три, а в режиме холостого хода нагрузка на КВ полностью отсутствует.

Снижение нагрузки при каждом из режимов ведет к снижению эффективной мощности и, как следствие — к снижению номинального среднего эффективного давления P_e. Участки графиков, отмеченные серым цветом, показывают переходы на следующие скоростные режимы. Для двигателя Д-245.5S2 в паспортной документации номинальная частота вращения КВ составляет n = 1800 мин$^{-1}$, т.е. именно этот скоростной режим принимается за номинальный. В используемой нами методике испытаний поясняется, что под промежуточным скоростным режимом понимается режим максимального крутящего момента, который имеет место при частоте КВ n = 1400 мин$^{-1}$ [5]. В режиме холостого хода допустимой частотой вращения КВ является n = 700 мин$^{-1}$.

На основе полученных данных были построены графики зависимости концентрации токсичных компонентов сгорания ДТ, БМТС-10 и БМТС-25 от среднего эффективного давления.

График (рис. 3) демонстрирует, что при работе двигателя на составах БМТС наблюдается снижение эмиссии монооксида углерода CO при каждом режиме испытаний. Так, например, в промежуточном режиме работы двигателя при максимальной нагрузке эмиссия монооксида углерода CO в отработавших газах при среднем эффективном давлении P_e = 1.18 МПа для ДТ составляет 0,085%, для БМТС-10 при P_e = 1.12 МПа – 0,07%, а для БМТС-25 при P_e = 1.07 МПа – 0,065%. Таким образом для данного режима среднее эффективное давление P_e с увеличением биологического компонента (СурМ и Э) в смеси снижается приблизительно на 0,065 МПа. Концентрация CO в отработавших газах имеет подобную динамику, т.е. снижается в сравнении с ДТ приблизительно в 1,2 раза для каждой последующей БМТС.

Снижение эмиссии монооксида углерода CO в отработавших газах может быть связано с тем, что БМТС благодаря своим биологическим компонентам, содержат в своем составе больше кислорода, чем минеральное ДТ. При сгорании этих топливных смесей этот кислород участвует в реакции окисления, что как раз и увеличивает полноту сгорания БМТС и, соответственно, снижает эмиссию монооксида углерода CO.

Как видно из графика, концентрация сажи (рис. 4) в отработавших газах с увеличением биологических компонентов в смесях также снижается. Наибольшее значение углерода было отмечено на номинальном скоростном режиме испытаний при 100% от максимального крутящего момента; оно составляет для ДТ, БМТС-10 и БМТС-25 — 18,2%, 14,7% и 12,8%, соответственно. Подобная динамика наблюдается для всех режимов испытательного цикла двигателя.

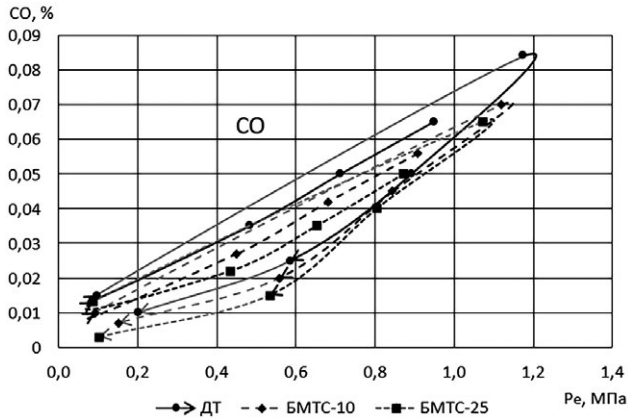

Рис. 3. Нагрузочные характеристики испытательного цикла согласно Правилам ООН №96 (02) (концентрация монооксида углерода CO).

Fig. 3. Load curves of the test cycle according to UN Regulation No. 96 (02) (concentration of carbon monoxide CO).

DOI: https://doi.org/10.17816/0321-4443-623619

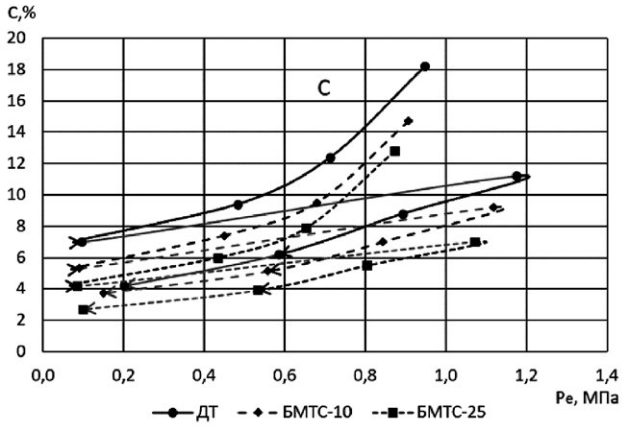

Рис. 4. Нагрузочные характеристики испытательного цикла согласно Правилам ООН №96 (02) (концентрация углерода С).
Fig. 4. Load curves of the test cycle according to UN Regulation No. 96 (02) (carbon concentration C).

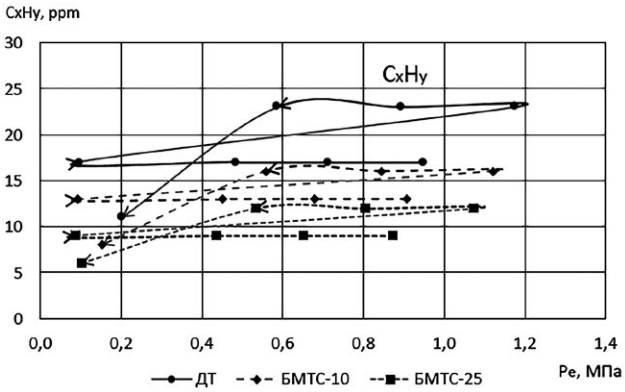

Рис. 5. Нагрузочные характеристики испытательного цикла согласно Правилам ООН №96 (02) (концентрация углеводородов C_xH_y).
Fig. 5. Load curves of the test cycle according to UN Regulation No. 96 (02) (concentration of hydrocarbons C_xH_y).

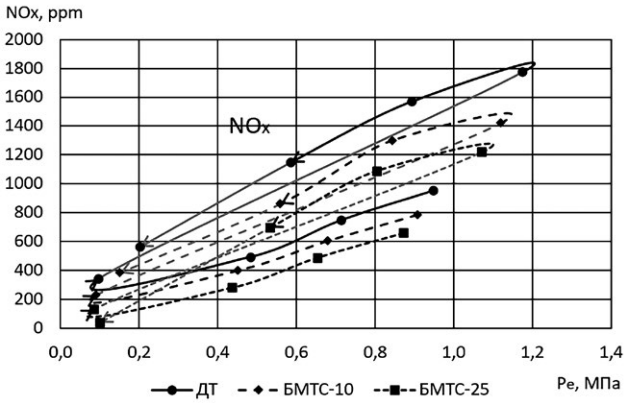

Рис. 6. Нагрузочные характеристики испытательного цикла согласно Правилам ООН №96 (2) (концентрация оксидов азота NO_x).
Fig. 6. Load curves of the test cycle according to UN Regulation No. 96 (2) (concentration of nitrogen oxides NO_x).

Снижение количества углерода в БМТС объясняется тем, что СурМ и Э, входящие в состав этих смесей, содержат меньшее количество атомов углерода С, чем нефть, из которой производится минеральное ДТ (средняя химическая формула для ДТ С12Н24, для Э С2Н5ОН, для СурМ $C_{58.2}H_{103.7}O_6$).

График (рис. 5) наглядно демонстрирует обратно пропорциональную зависимость снижения эмиссии углеводородов в выхлопных газах от увеличения биологического компонента в БМТС на всех режимах работы дизеля. Наибольшее значение содержания углеводородов C_xH_y в отработавших газах зафиксировано на номинальном скоростном режиме работы при 50% от максимальной нагрузки на КВ. Обозначенный режим отмечается низким средним эффективным давлением P_e. При данном режиме минимальное количество углеводородов имеет БМТС-25; при P_e = 0,53 МПа значение эмиссии составляет 12%. Для БМТС-10 — при P_e = 0,56 МПа 16%, а для чистого ДТ при P_e = 0,59 МПа 23%. Динамика снижения эмиссии C_xH_y при увеличении среднего эффективного давления P_e характерна для всех режимов работы дизеля.

Результаты исследования можно объяснить составом БМТС; поскольку биологические компоненты, входящие в состав, содержат большее количество кислорода, имеет место более полное окисление продуктов сгорания и, соответственно, снижение как монооксида углерода СО, так и углеводородов C_xH_y.

Из графика (рис. 6) видно, что при увеличении биологических добавок в БМТС в процессе работы двигателя снижается эмиссия оксидов азота NO_x в отработавших газах по сравнению с минеральным топливом на всех режимах испытательного цикла. Установлено, что наибольшее значение NO_x наблюдается при работе двигателя на промежуточном скоростном режиме с максимальной нагрузкой на КВ. Так, для ДТ при P_e = 1,18 МПа концентрация NO_x составляет 1775 *ppm*, для БМТС-10 P_e = 1,12 МПа — 1420 *ppm*, для БМТС-25 P_e = 1,07 МПа — 1220 *ppm*.

Снижение оксидов азота NOx в отработавших газах в процессе работы двигателя на БМТС по сравнению с ДТ объясняется тем, что указанные топливные смеси содержат меньшее количество атомов азота, чем ДТ. Кроме того, из-за своей биологической составляющей БМТС имеют более высокую температуру воспламенения и более низкий коэффициент избытка воздуха, что также может повлиять на снижение NO_x.

ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты, представленные на рис. 3–6, позволяют рассчитать итоговые значения эмиссии вредных веществ согласно методике Правил ЕЭК ООН №96 (02). Сравнение итогового (суммарного) значения эмиссии СО, C_xH_y, NO_x, С для ДТ, БМТС-10, БМТС-25 отражено на диаграммах (рис. 7).

DOI: https://doi.org/10.17816/0321-4443-623619

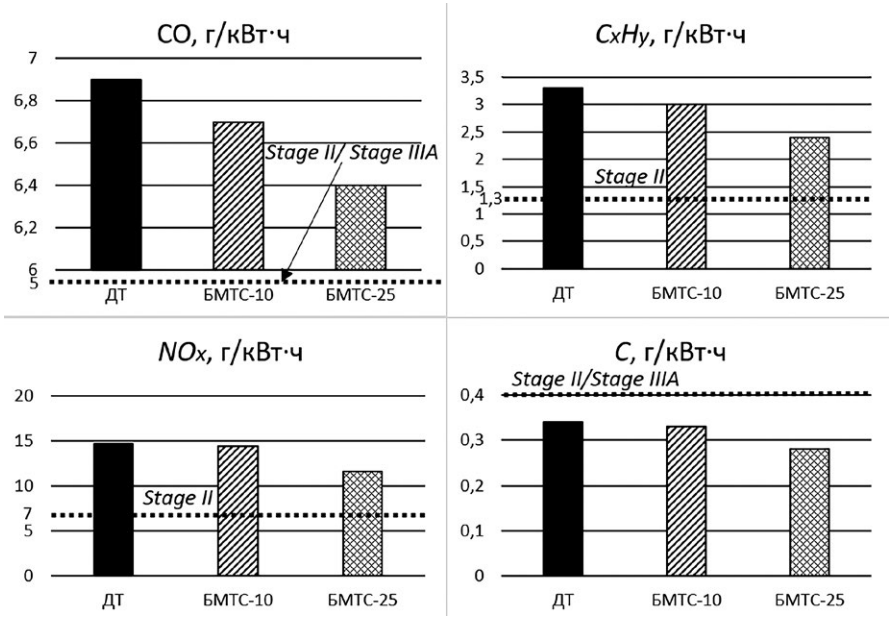

Рис. 7. Суммарные значения удельного выброса токсичных веществ за весь испытательный цикл.
Fig. 7. Total values of specific emission of toxic substances for the entire test cycle.

Данные графиков указывают, что при увеличении концентрации биологического компонента в изучаемых топливах наблюдается снижение эмиссии всех рассматриваемых вредных веществ в отработавших газах (см. рис. 7). Экологическому стандарту *Stage II* дизельный двигатель Д-245.5S.2 при работе на ДТ, БМТС-10, БМТС-25 соответствует только в отношении значений эмиссии углерода. Так, пороговое итоговое значение за весь испытательный цикл по удельному выбросу углерода *C* по методике Правил ЕЭК ООН №96 (02) для двигателей с диапазоном мощности *G* составляет 0,4 г/(кВт·ч). Из диаграммы (см. рис. 7) видно, что значения удельного выброса для ДТ, БМТС-10, БМТС-25 составляют 0,34 г/(кВт·ч), 0,33 г/(кВт·ч), 0,28 г/(кВт·ч), соответственно. В остальных же случаях в отношении эмиссии монооксида углерода (CO), оксидов азота (NO_x) и углеводородов (C_xH_y) полученные значения завышены. В связи с тем, что БМТС по своим характеристикам отличаются от ДТ, для достижения необходимого результата, кроме изменения угла опережения впрыскивания, предположительно, необходимо произвести оптимизацию давления начала впрыскивания топлива форсунками; для чего в последующем произвести индицирование давления в топливопроводе высокого давления для чистого ДТ, БМТС-10 и БМТС-25).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итоги проделанной работы позволяют заключить следующее:

1. Использование БМТС в качестве топлива не вызывает сбоев в работе двигателя.
2. Увеличение содержания биологических компонентов в БМТС значительно снижают общую токсичность отработавших газов; но при этом также, из-за снижения среднего эффективного давления, незначительно снижается эффективная мощность.
3. Хотя БМТС показывают сниженные значения эмиссии вредных веществ в выхлопных газах по сравнению с чистым ДТ, они не могут привести дизель к экологическим показателям Stage II Правил ЕЭК ООН № 96 (02) для всех компонентов; необходима оптимизация системы топливоподачи, установка дополнительных систем фильтрации отработавших газов.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. С.А. Плотников — общее руководство, постановка задач исследования; А.Н. Карташевич — теоретический анализ, формулировка выводов; Г.Э. Заболотских — проведение стендовых испытаний. Авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям *ICMJE* (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликтов интересов, связанных с проведенным исследованием и публикацией настоящей статьи.

Источник финансирования. Финансирование при проведении исследования осуществлялось согласно договору о взаимном сотрудничестве между УО «Белорусская государственная орденов Октябрьской Революции и Трудового Красного Знамени сельскохозяйственная академия» (РБ, г. Горки) и ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет» (РФ, г. Киров).

ADDITIONAL INFORMATION

Authors' contribution. S.A. Plotnikov — general guidance, formulation of research objectives; A.N. Kartashevich — theoretical analysis, formulation of conclusions; G.E. Zabolotskikh — conducting bench tests. All authors made a substantial contribution to the conception of the work, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the work, final approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the work.

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

Funding source. Funding for the research was carried out in accordance with the agreement on mutual cooperation between the Educational institution "Belarusian State Agricultural Academy" (Gorki, Republic of Belarus) and the Federal Government-financed Educational Institution of Higher Professional Education "Vyatka State University" (Kirov, Russian Federation).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Транспортная стратегия РФ на период до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года. Дата обращения: 10.11.2023. Режим доступа: https://rosavtodor.gov.ru/docs/transportnaya-strategiya-rf-na-period-do-2030-goda-s-prognozom-na-period-do- 2035-goda.

2. Плотников С.А., Карташевич А.Н., Заболотских Г.Э. Влияние нагрузки при работе дизеля на биоминеральных топливных смесях // Вестник транспорта Поволжья. 2023. № 2(98). С. 104–109. EDN: EBFSYS

3. Карташевич А.Н., Плотников С.А. Применение методики планирования эксперимента в исследованиях свойств биотоплив. В кн.: Инновационные решения в технологиях и механизации сельскохозяйственного производства: Сборник научных трудов. Т. 7. Горки: БГСХА, 2022. С. 200–207. EDN: GGLDHI

4. Плотников С.А., Карташевич А.Н., Заболотских Г.Э. Исследование составов и способов подачи новых топлив с добавками сурепного масла в дизель // Инженерные технологии и системы. 2023. Т. 33, № 1. С. 100–113. EDN: VCTHUW doi: 10.15507/2658-4123.033.202301.100-113

5. The United Nations Economic Commission for Europe. Regulation No.24. E/ECE/TRANS/505-Rev.1/Add.23/Rev.2/Amend.1/Amend.2/Amend.3. 5 April 2007. Дата обращения: 10.11.2023. Режим доступа: https://unece.org/fileadmin/DAM/trans/doc/2017/wp29/E-ECE-TRANS-505-Rev.3r.pdf

6. Плотников С.А., Заболотских Г.Э., Кантор П.Я., Втюрина М.Н. Исследование свойств новых топлив для автотракторной техники // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева. 2022. Т. 14, №1. С. 117–125. EDN: JIDORK doi: 10.36508/RSATU.2022.92.31.01

7. Кульчицкий А.Р. О новых требованиях к экологическим показателям сельскохозяйственных тракторов в таможенном союзе // Тракторы и сельхозмашины. 2022. Т. 89, № 3. С. 167–174. doi: 10.17816/0321-4443-106047

REFERENCES

1. The transport strategy of the Russian Federation for the period up to 2030 with a forecast for the period up to 2035. Accessed: 10.11.2023. Available from: https://rosavtodor.gov.ru/docs/transportnaya-strategiya-rf-na-period-do-2030-goda-s-prognozom-na-period-do- 2035-goda

2. Kartashevich AN, Plotnikov SA, Zabolotskikh GE. The influence of load during diesel operation on biomineral fuel mixtures. *Bulletin of transport of the Volga region.* 2023;2(98):104–109. (In Russ).

3. Kartashevich AN, Plotnikov SA. Application of experimental planning methods in research of biofuel properties. In: *Innovative solutions in technologies and mechanization of agricultural production : Collection of scientific papers.* Vol. 7. Gorki: BGSKhA; 2022:200–207. (In Russ). EDN: GGLDHI

4. Plotnikov SA, Kartashevich AN, Zabolotskikh GE. Investigation of compositions and methods of supplying new fuels with additives of essential oil to diesel // *Engineering Technologies and Systems.* 2023;33(1):100–113. (In Russ).

5. The United Nations Economic Commission for Europe. Regulation No.24. E/ECE/TRANS/505-Rev.1/Add.23/Rev.2/Amend.1/Amend.2/Amend.3. 5 April 2007. Accessed: 10.11.2023. Available from:

6. Plotnikov SA, Zabolotskikh GE, Kantor PYa, Vtyurina MN. Investigation of the properties of new fuels for automotive equipment // *Bulletin of the Ryazan State Agrotechnological University named after P. A. Kostychev.* 2022;14(1):117–125. (In Russ). EDN: JIDORK doi: 10.36508/RSATU.2022.92.31.01

7. Kulchitsky AR. On new requirements for environmental indicators of agricultural tractors in the Customs Union. *Tractors and agricultural machinery.* 2022;89(3):167–174. (In Russ). doi: 10.17816/0321-4443-106047

ОБ АВТОРАХ

*** Заболотских Георгий Эдуардович,**
аспирант кафедры «Технология машиностроения»;
адрес: Российская Федерация, 610000, Киров,
ул. Московская, д. 36;
ORCID: 0009-0006-8796-5180;
eLibrary SPIN: 4836-5702;
e-mail: zabolotskikh88@yandex.ru

Плотников Сергей Александрович,
д-р техн. наук,
профессор кафедры «Технология машиностроения»;
ORCID: 0000-0002-8887-4591;
eLibrary SPIN: 4899-9362;
e-mail: plotnikovsa@bk.ru

Карташевич Анатолий Николаевич,
заслуженный работник образования Республики Беларусь,
профессор, д-р техн. наук,
заведующий кафедрой «Тракторы, автомобили и машины
для природообустройства»;
ORCID: 0000-0002-3649-1521;
eLibrary SPIN: 8541-5330;
e-mail: kartashevich@yandex.ru

AUTHORS' INFO

*** Georgy E. Zabolotskikh,**
Postgraduate of the Engineering Technology Department;
address: 36 Moskovskaya street, 610000 Kirov,
Russian Federation;
ORCID: 0009-0006-8796-5180;
eLibrary SPIN: 4836-5702;
e-mail: zabolotskikh88@yandex.ru

Sergey A. Plotnikov,
Dr. Sci. (Engineering),
Professor of the Engineering Technology Department;
ORCID: 0000-0002-8887-4591;
eLibrary SPIN: 4899-9362;
e-mail: plotnikovsa@bk.ru

Anatoly N. Kartashevich,
Honored Worker of Education of the Republic of Belarus,
Professor, Dr. Sci. (Engineering),
Head of the Tractors, Automobiles and Machinery
for Environmental Engineering Department;
ORCID: 0000-0002-3649-1521;
eLibrary SPIN: 8541-5330;
e-mail: kartashevich@yandex.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author