

МЕХАНИЗАЦИЯ И СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 665.753:662.767.2

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНЫХ И ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДИЗЕЛЯ НА СМЕСЯХ ДИЗЕЛЬНОГО ТОПЛИВА С БИОГАЗОМ

А. Н. КАРТАШЕВИЧ, В. А. ШАПОРЕВ

УО «Белорусская государственная сельскохозяйственная академия»,
г. Горки, Республика Беларусь, 213407, e-mail: kartashevich@yandex.ru; vitlik3991@mail.ru

(Поступила в редакцию 13.01.2020)

Статья посвящена исследованиям работы тракторного дизеля 4ЧН 11,0/12,5 (Д-245.5S2) на дизельном топливе и смесях дизельного топлива (ДТ) с биогазом (БГ) – 85 % ДТ + 15 % БГ и 70 % ДТ + 30 % БГ. Исследовались эффективные показатели работы дизеля и показатели его дымности и токсичности при работе на этих составах по нагрузочной характеристике, снятой на номинальном скоростном режиме 1800 мин⁻¹ при рациональном значении угла опережения впрыскивания топлива $\Theta_{оп.впр}=22^\circ$ до в.м.т.

При работе дизеля на смесях 85 % ДТ + 15 % БГ и 70 % ДТ + 30 % БГ имеет место снижение эффективной мощности на 9,23 % и 10,77 %, снижение крутящего момента на 10,59 % и 24,63 %, и снижается КПД на 2,7 % и 5,4 % соответственно в сравнении с показателями работы на чистом ДТ.

Работа дизеля на смесях 85 % ДТ + 15 % БГ и 70 % ДТ + 30 % БГ сопровождается увеличением удельного эффективного расхода теплоты на 78,81 % и 113,45 %, соответственно, по отношению к показателям работы на ДТ во всем диапазоне изменения нагрузки. Количество необходимой теплоты, вводимой в цилиндры дизеля для работы на смесях, увеличивается на 1,87 % и 2,94 %.

Показатели токсичности и дымности дизеля при $n=1800$ мин⁻¹ на смешевых топливах 85 % ДТ + 15 % БГ и 70 % ДТ + 30 % БГ характеризуются снижением выбросов с ОГ частиц сажи на 16,42 % и 41,8 % и снижением оксидов азота на 0,78 % и 1,45 %, а также увеличением выбросов с ОГ диоксида углерода на 12,79 % и 13,87 %, углеводородов на 25 % и 51,66 % и соответственно оксидов углерода на 25 % и 50 %.

Ключевые слова: Дизель, дизельное топливо, биогаз, нагрузка, отработавшие газы, дымность, токсичность.

The article is devoted to studies of operation of tractor diesel 4ChN 11.0 / 12.5 (D-245.5S2) on diesel fuel and mixtures of diesel fuel (DF) with biogas (BG) – 85 % DF + 15 % BG and 70 % DF + 30 % BG. We studied the effective performance of diesel engine and its smoke and toxicity when working on these compounds according to the load characteristic taken at a nominal speed mode of 1800 min⁻¹ with a rational value of the angle of advance of fuel injection $\Theta_{injection\ advance} = 22^\circ$ to top dead centre.

When operating a diesel engine with mixtures of 85 % DF + 15 % BG and 70 % DF + 30 % BG, there is a decrease in effective power by 9.23 % and 10.77 %, a decrease in torque by 10.59 % and 24.63 % and the efficiency decreases by 2.7 % and 5.4 %, respectively, in comparison with the performance in pure diesel fuel.

Diesel operation on mixtures of 85 % DF + 15 % BG and 70 % DF + 30 % BG is accompanied by an increase in the specific effective heat consumption by 78.81 % and 113.45 %, respectively, in relation to the performance on DF in the entire range of load variation. The amount of required heat introduced into diesel cylinders for working on mixtures increases by 1.87 % and 2.94 %.

Diesel toxicity and smoke levels at $n = 1800$ min⁻¹ on mixed fuels 85 % DF + 15 % BG and 70 % DF + 30 % BG are characterized by a 16.42 % and 41.8 % decrease in emissions of soot particles with exhaust gases and a decrease in nitrogen oxides by 0.78 % and 1.45 %, as well as an increase in carbon dioxide emissions by 12.79 % and 13.87 %, hydrocarbons by 25 % and 51.66 % and, respectively, carbon oxides by 25 % and 50 %.

Key words: diesel, diesel fuel, biogas, load, exhaust gases, smokiness, toxicity.

Введение

Основными направлениями по снижению загрязнения окружающей среды при работе автотракторной техники как в Республике Беларусь, так и за рубежом, являются: снижение расхода топлива, улучшение качества рабочего процесса двигателя внутреннего сгорания (ДВС), развитие автотракторной техники, работающей на альтернативных возобновляемых видах топлива [1–4].

Наряду с проблемой снижения выбросов вредных веществ с ОГ в Республике Беларусь существует проблема обеспеченности собственными топливно-энергетическими ресурсами. Особое значение

имеет снижение энергетической зависимости от нефтяного топлива, так как разработка своих запасов нефти не удовлетворяет потребностей республики в углеводородном топливе [5–9].

Снизить негативное воздействие тракторов на окружающую среду и уменьшить зависимость страны от минерального топлива можно, используя смесевое топливо на основе ДТ и биогаза (БГ). Уровень развития сельскохозяйственного производства является основой экономики Республики Беларусь, страна обладает огромным поголовьем крупного рогатого скота, благоприятным климатом и достаточным количеством осадков на её территории. В этой связи очень уместно получение БГ из органических удобрений на основе переработки отходов животноводства, птицеводства, растениеводства, пищевой промышленности и бытовых стоков, разработка прогрессивных биогазовых технологий с улучшенным оборудованием и энергетическими установками с ДВС, работающими на БГ. Все это является весьма актуальной проблемой для Республики Беларусь и для большинства стран мира.

Основная часть

Стендовые испытания дизеля 4ЧН 11,0/12,5 (Д-245.5S2) проводились в БГСХА на кафедре «Тракторы, автомобили и машины для природообустройства» в научно-исследовательской лаборатории «Испытание двигателей внутреннего сгорания».

При проведении исследований ДТ замещалось БГ в процентном отношении по величине суммарной вводимой в цилиндры дизеля теплоты, значение которой оставалось постоянным. Количество содержания БГ, равное 15 % и 30 %, было выбрано из условия наличия необходимого воздуха для обеспечения полноты процесса сгорания. БГ является мало исследованным альтернативным топливом, отсутствуют необходимые теоретические расчеты.

Необходимые данные составов смеси для замещения ДТ на БГ в процентном отношении по величине суммарной вводимой в цилиндры теплоты для дизеля 4ЧН 11,0/12,5 (Д-245.5S2) представлены в таблице. Приведенные данные таблицы рассчитывались при следующих условиях: скоростной режим $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$; угол опережения впрыскивания топлива $\Theta_{\text{оп.впр}} = 22^\circ$ до в.м.т.; нагрузка на динамометре $F = 39 \text{ кг}$; стехиометрическое число для ДТ $l_{\text{ДТ}} = 14,35$ и для БГ $l_{\text{БГ}} = 6,9$; теплота сгорания ДТ $H_{\text{ДТ}} = 42,5 \text{ МДж/кг}$ и БГ $H_{\text{БГ}} = 17,92 \text{ МДж/кг}$.

Данные составов смеси для замещения ДТ на БГ в процентном отношении по величине суммарной вводимой теплоты в цилиндры дизеля 4ЧН 11,0/12,5 (Д-245.5S2)

| $n, \text{ мин}^{-1}$ | 1800 | | | | | | | | |
|---|--------------------|----------------|----------------|----------------|------------------|------------------|------------------|-----------------|--------|
| | 00 | 10 | 15 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | |
| Замещение ДТ на БГ, % | 00 | 10 | 15 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | |
| Номинальная мощность, кВт | 65 ± 4 | | | | | | | | |
| Часовой расход ДТ $G_{\text{ДТ}}$ кг/ч | 16,76 | 15,084 | 14,25 | 13,41 | 11,73 | 10,06 | 8,38 | 6,71 | |
| Часовой расход БГ $G_{\text{БГ}}$ кг/ч ($\text{м}^3/\text{ч}$) | 00 | 3,97 (4,76) | 5,96 (7,15) | 7,95 (9,54) | 11,93 (14,32) | 15,90 (19,10) | 19,87 (23,84) | 23,84 (28,6) | |
| Расход воздуха, кг/ч | $G_{\text{в.ДТ}}$ | 240,50 | 216,46 | 204,44 | 192,43 | 168,33 | 144,30 | 120,25 | 96,29 |
| | $G_{\text{в.БГ}}$ | 00 | 27,39 | 41,13 | 54,86 | 82,32 | 109,71 | 137,10 | 164,5 |
| | $G_{\text{в.ОБЩ}}$ | 240,50 | 247,82 | 251,53 | 255,24 | 262,58 | 269,91 | 277,22 | 284,63 |
| Теплота сгорания ДТ, $H_{\text{ДТ}}$ МДж/кг | 712,30 | 641,07 | 605,5 | 569,93 | 498,52 | 427,38 | 356,13 | 284,18 | |
| Теплота сгорания БГ, $H_{\text{БГ}}$ МДж/кг | 00 | 71,23 | 106,8 | 142,37 | 213,78 | 284,92 | 356,15 | 427,12 | |
| Общая теплота, $N_{\text{общ}}$ МДж/кг | 712,3 | | | | | | | | |
| α | 1,3 | 1,26 | 1,245 | 1,23 | 1,19 | 1,16 | 1,13 | 1,1 | |

Таблица показывает, как изменяются часовой расход ДТ и БГ, расход воздуха, теплота сгорания ДТ и БГ, общая теплота сгорания и коэффициент избытка воздуха от замещения ДТ в процентном отношении по теплоте сгорания БГ. Данные таблицы были использованы при проведении стендовых испытаний, а именно для того, чтобы выдержать на одинаковом уровне подаваемую в цилиндры двигателя общую теплоту сгорания смеси.

На рис. 1 представлена нагрузочная характеристика дизеля 4ЧН 11,0/12,5 при $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$ и рациональном значении угла опережения впрыскивания топлива $\Theta_{\text{оп.впр}} = 22^\circ$ до в.м.т.

Как видно из данных рис. 1, при работе дизеля на номинальном режиме на чистом ДТ значение удельного эффективного расхода теплоты g_e значительно ниже, чем на топливах с добавкой БГ. Так, при нагрузке $p_e = 0,66 \text{ МПа}$ и работе на чистом ДТ удельный эффективный расход теплоты составляет $g_e = 9,44 \text{ МДж/кВт} \times \text{ч}$, при этой же нагрузке для смесей с добавками 15 % БГ и 30 % БГ значения равны, соответственно, $g_e = 16,88 \text{ МДж/кВт} \times \text{ч}$ и $g_e = 20,15 \text{ МДж/кВт} \times \text{ч}$. Тенденция сохраняется во всем диапазоне изменения нагрузки. В процентном выражении этот рост составляет 78,81 % и 113,45 % по отношению к значению теплоты, вводимой с ДТ.

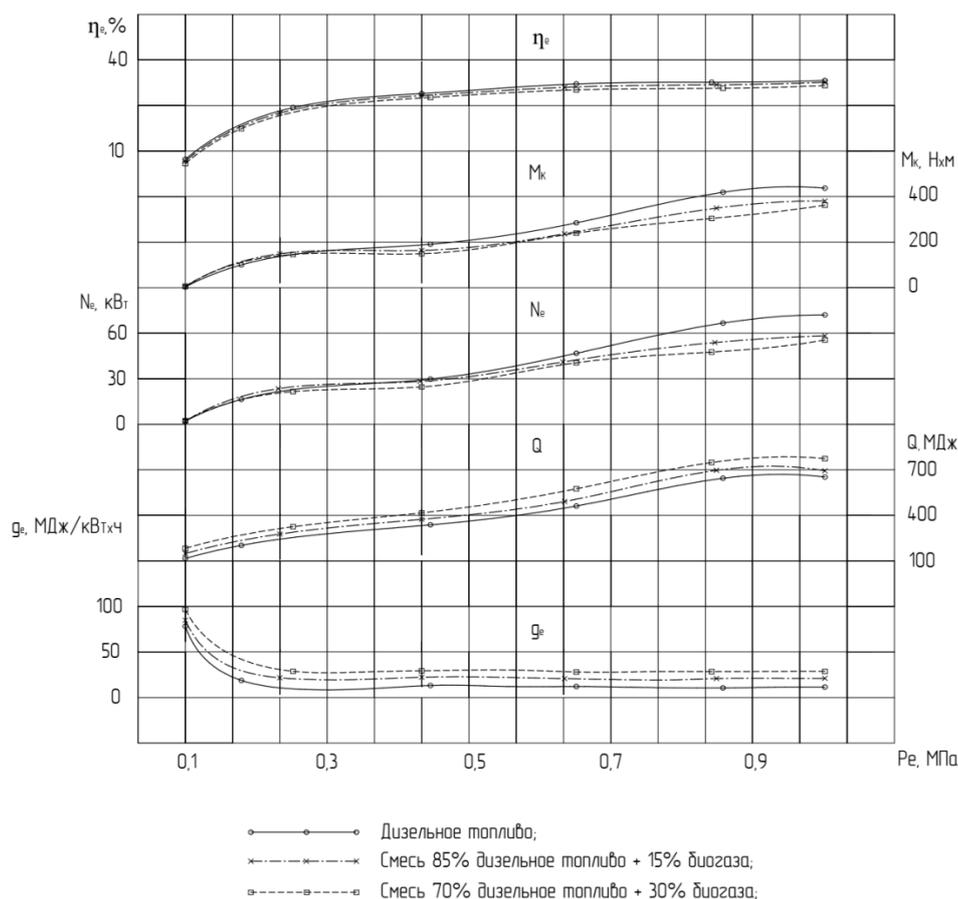


Рис. 1. Нагрузочная характеристика дизеля 4ЧН 11,0/12,5 при $n=1800 \text{ мин}^{-1}$ и рациональном значении угла опережения впрыскивания топлива $\Theta_{\text{оп.впр}}=22^\circ$ до в.м.т.

Характер изменения суммарного значения потребной вводимой теплоты Q_{Σ} в цилиндры дизеля сопровождается её некоторым ростом во всем диапазоне нагрузки p_e . Значения теплоты Q_{Σ} в точках нагрузки $p_e=0,86 \text{ МПа}$, $p_e=0,83 \text{ МПа}$ и $p_e=0,81 \text{ МПа}$ для рассматриваемых составов смесей составляют $Q=686,38 \text{ МДж}$, $Q=699,22 \text{ МДж}$ и $Q=706,56 \text{ МДж}$ соответственно. Увеличение количества потребной вводимой теплоты составляет 1,87 % для состава 85 % ДТ + 15 % БГ и 2,94 % для состава 70 % ДТ + 30 % БГ. Увеличение удельного эффективного расхода теплоты и суммарного потребляемого расхода теплоты, вводимой в цилиндры дизеля, при сохранении мощностных показателей на уровне, установленном заводом-изготовителем, можно объяснить меньшей, чем у ДТ, теплотой сгорания БГ и снижением скорости процесса сгорания смесевого топлива.

Эффективная мощность дизеля растет во всем диапазоне увеличения нагрузки от $p_e=0,1 \text{ МПа}$ до $p_e=0,9 \text{ МПа}$, далее этот рост незначителен. При нагрузке $p_e=0,86 \text{ МПа}$ эффективная мощность дизеля, работающего на ДТ, составляет $N_e=65 \text{ кВт}$. При работе на смесях 85 % ДТ + 15 % БГ и 70 % ДТ + 30 % БГ значение мощности составляет $N_e=59 \text{ кВт}$ и $N_e=58 \text{ кВт}$ при сопоставимой нагрузке $p_e=0,83 \text{ МПа}$ и $p_e=0,81 \text{ МПа}$. Видно, что мощность значительно уменьшается с ростом замещения ДТ биогазом, в сопоставимом выражении это уменьшение составляет 9,23 % и 10,77 %.

Крутящий момент дизеля также, как и эффективная мощность, растет во всем диапазоне увеличения нагрузки. При нагрузке $p_e=0,86 \text{ МПа}$ крутящий момент дизеля, работающего на ДТ составляет $M_k=406 \text{ Н}\cdot\text{м}$. При работе на смесях 85 % ДТ + 15 % БГ и 70 % ДТ + 30 % БГ его значение составляет $M_k=363 \text{ Н}\cdot\text{м}$ и $M_k=306 \text{ Н}\cdot\text{м}$ при сопоставимой нагрузке $p_e=0,83 \text{ МПа}$ и $p_e=0,81 \text{ МПа}$; то есть крутящий момент уменьшается с ростом замещения ДТ биогазом на 10,59 % и 24,63 %.

Значение эффективного КПД при работе дизеля на ДТ с нагрузкой ($p_e=0,86 \text{ МПа}$) составляет 37 %, а при работе на смесях 85 % ДТ + 15 % БГ и 70 % ДТ + 30 % БГ значение максимального эффективного КПД составило $\eta_e=36 \%$ и $\eta_e=35 \%$ при $p_e=0,83 \text{ МПа}$ и $p_e=0,81 \text{ МПа}$. Следовательно, эффективный КПД дизеля снижается с ростом замещения чистого ДТ биогазом на 2,7 % и 5,4 %. Снижение эффективного КПД дизеля на смесях с БГ объясняется низкой теплотворной способностью БГ по сравнению с ДТ.

Содержание токсичных компонентов в отработавших газах дизеля 4ЧН 11,0/12,5 на $n=1800 \text{ мин}^{-1}$ представлены на рис. 2.

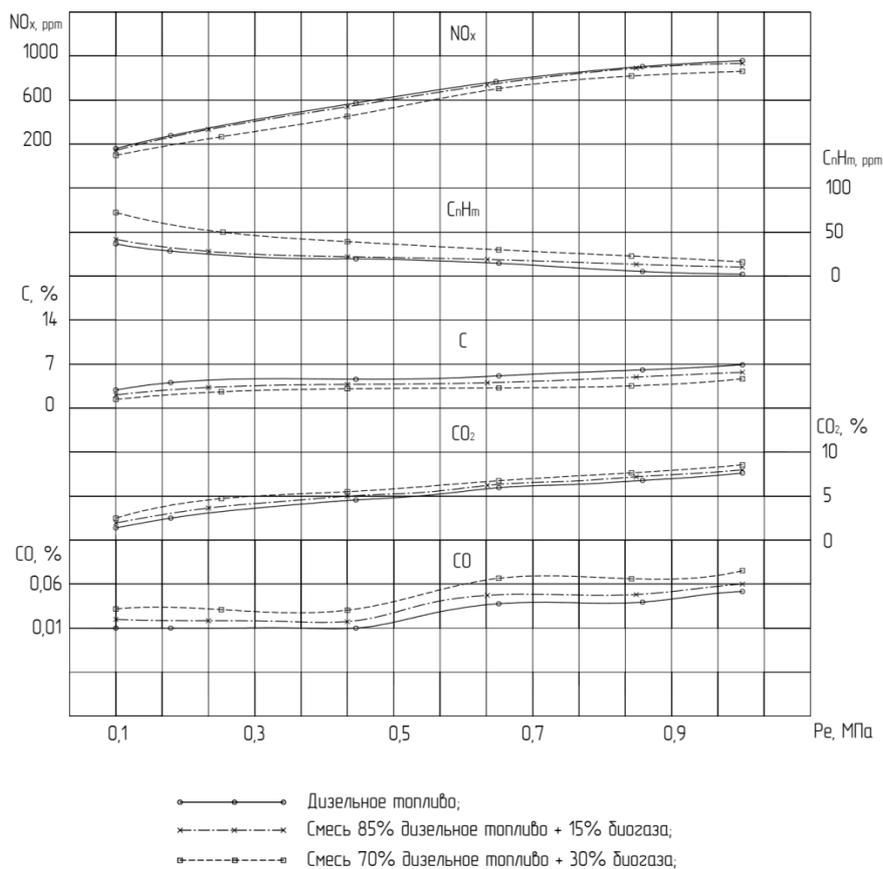


Рис. 2. Показатели токсичности и дымности дизеля 4ЧН 11,0/12,5 при $n=1800 \text{ мин}^{-1}$ и рациональном значении угла опережения впрыскивания топлива $\Theta_{\text{оп.впр}}=22^\circ$ до в.м.т.

Содержание оксидов азота NO_x в ОГ при работе на ДТ и на смесях 85 % ДТ + 15 % БГ и 70 % ДТ + 30 % БГ повышается при увеличении нагрузки во всем диапазоне. При $p_e=0,86 \text{ МПа}$ для чистого ДТ, при $p_e=0,83 \text{ МПа}$ для смеси 85 % ДТ + 15 % БГ, а при $p_e=0,81 \text{ МПа}$ для смеси 70 % ДТ + 30 % БГ содержание оксидов азота NO_x соответственно, составляет 898 ppm, 891 ppm и 885 ppm. Содержание оксидов азота NO_x в ОГ на смеси 85 % ДТ + 15 % БГ меньше чем на чистом ДТ на 0,78 %, а на смеси 70 % ДТ + 30 % БГ меньше ДТ на 1,45 %. Следует помнить, что образование оксидов азота происходит сразу по нескольким механизмам, преобладающая роль каждого из которых существенно зависит от температуры процесса сгорания, наличия свободного кислорода и состава топлива.

При увеличении нагрузки содержание сажи C в ОГ при работе, как на ДТ, так и на смесях 85 % ДТ + 15 % БГ и 70 % ДТ + 30 % БГ возрастает. Уровень сажи C в ОГ дизеля при достижении нагрузки $p_e=0,86 \text{ МПа}$ для чистого ДТ составляет 6,7 %, а для смесей, содержащих 15 % БГ и 30 % БГ при сопоставимой нагрузке $p_e=0,83 \text{ МПа}$ и $p_e=0,81 \text{ МПа}$ содержание сажи в ОГ составляет 5,6 % и 3,9 % соответственно, т.е. с ростом присутствия БГ в смеси топлива содержание сажи в ОГ снижается на 16,42 % и 41,8 %. Можно предположить, что основное влияние на снижение высокотемпературного крекинга углеводородов оказывает снижение локальной и осредненной температуры процесса сгорания.

Из графика показателей токсичности и дымности (рис. 2) видно, что выбросы оксидов углерода CO с ОГ повышаются во всем диапазоне нагрузки и работе на всех составах топлив. При этом добавка БГ увеличивает концентрацию CO в ОГ дизеля. Так, при $p_e=0,86 \text{ МПа}$ и работе на чистом ДТ выбросы CO составляет 0,04 %, а для смеси 85 % ДТ + 15 % БГ и сопоставимой нагрузке $p_e=0,83 \text{ МПа}$ значение выбросов CO равно 0,05%. Для смеси, состоящей из 70 % ДТ + 30 % БГ при нагрузке $p_e=0,81 \text{ МПа}$ выброс CO уже равен 0,06 %. Можно констатировать, что содержание CO в ОГ дизеля при работе на смесях 85 % ДТ + 15 % БГ и 70 % ДТ + 30 % БГ больше, чем на чистом ДТ, примерно на 25 % и 50 %. Рост выбросов оксидов углерода можно объяснить исходным составом используемого топлива.

Работа силовой установки трактора на топливе с добавлением 15 % БГ и 30 % БГ сопровождается незначительным повышением выбросов диоксида углерода CO_2 с ОГ по всему диапазону нагрузки. При $p_e=0,86$ МПа для чистого ДТ, при $p_e=0,83$ МПа для смеси 85 % ДТ + 15 % БГ, а при $p_e=0,81$ МПа для смеси 70 % ДТ + 30 % БГ содержание диоксида углерода CO_2 составляет 6,49 %, 7,32 % и 7,39 %. Выбросы диоксида углерода CO_2 с ОГ увеличиваются с ростом замещения чистого ДТ биогазом, в процентном соотношении составляет 12,79 % и 13,87 %. Данный рост диоксида углерода CO_2 является незначительным, важно помнить, что диоксида углерода является менее опасным для человека с физиологической точки зрения, чем другие нормируемые компоненты ОГ дизеля.

Выбросы несгоревших углеводородов C_nH_m в ОГ дизеля снижаются во всем диапазоне увеличения нагрузки, но с увеличением присутствия БГ в смеси их становится больше в сравнении с работой дизеля на чистом ДТ. Так, при работе дизеля на чистом ДТ выбросы углеводородов C_nH_m составляют 12 ppm при $p_e=0,86$ МПа, а на топливах с добавлением 15 % БГ и 30 % БГ выбросы углеводородов C_nH_m составляют 15 ppm и 23 ppm при сопоставимой нагрузке $p_e=0,83$ МПа и $p_e=0,81$ МПа. В процентном выражении рост выбросов C_nH_m в ОГ применительно к чистому ДТ составляет 25 % и 51,66 %. Данное обстоятельство объясняется малым избытком свободного кислорода, необходимого для окисления, вследствие замещения части поступающего на впуске воздуха биогазом.

Заключение

Анализ нагрузочной характеристики дизеля 4ЧН 11,0/12,5, работающего при $n=1800$ мин⁻¹ на смесях ДТ с БГ, позволяет сделать следующие выводы:

1. Эффективные показатели работы дизеля 4ЧН 11,0/12,5 (Д-245.5S2) на смесях 85 % ДТ + 15 % БГ и 70 % ДТ + 30 % БГ в отличии от работы на чистом ДТ, показывают снижение мощности на 9,23 % и 10,77 %, снижение крутящего момента на 10,59 % и 24,63 % и снижается КПД на 2,7 % и 5,4 %, следовательно это снижение происходит по всему диапазону роста нагрузки.

2. Работа дизеля на смесях 85 % ДТ + 15 % БГ и 70 % ДТ + 30 % БГ характеризуется увеличением удельного эффективного расхода теплоты смеси на 78,81 % и 113,45 % по отношению к работе на чистом ДТ во всем диапазоне изменения нагрузки. Суммарное потребное количество теплоты, вводимой в цилиндры дизеля на смесях 85 % ДТ + 15 % БГ и 70 % ДТ + 30 % БГ выше, чем для чистого ДТ на 1,87 % и 2,94 %, что объясняется снижением показателей теплоиспользования и эффективности рабочего цикла.

3. Показатели токсичности и дымности дизеля 4ЧН 11,0/12,5 при $n=1800$ мин⁻¹ на смесевых топливах 85% ДТ + 15% БГ и 70% ДТ + 30% БГ характеризуются снижением выбросов с ОГ частиц сажи на 16,42% и 41,8% и снижением оксидов азота на 0,78% и 1,45%, а также увеличением выбросов с ОГ диоксида углерода на 12,79% и 13,87%, углеводородов на 25% и 51,66% и, соответственно оксидов углерода на 25 % и 50 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. Альтернативные виды топлива для двигателей: монография / А. Н. Карташевич, В. С. Товстыка, П. Ю. Малышкин [и др.]. – Горки, БГСХА, 2013. – 376 с.

2. Карташевич, А. Н. Возобновляемые источники энергии: науч.-практ. пособие / А. Н. Карташевич, В. С. Товстыка – Горки: БГСХА, 2008. – 261 с.

3. Карташевич, А. Н. Тракторы и автомобили. Газовое оборудование для автотракторной техники: курс лекций / А. Н. Карташевич, П. Ю. Малышкин, А. А. Сысоев. – Горки: Белорусская государственная сельскохозяйственная академия, 2012. – 86 с.

4. Кульчицкий, А. Р. Токсичность автомобильных и тракторных двигателей: учеб. пособие для высш. школы / А. Р. Кульчицкий. – 2-е изд. – М.: Академический Проект, 2004. – 400 с

5. Карташевич, А. Н. Определение рациональных регулировок дизеля 4ЧН 11,0/12,5 для работы на смесях дизельного топлива с биогазом / А. Н. Карташевич // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. – 2019. – № 1. – С. 149–153.

6. Плотников, С. А. Разработка числовых методов определения свойств новых топлив / А. Плотников, А. Н. Карташевич // Вестник машиностроения. – 2018. – № 3. – С. 7–10.

7. Карташевич, А. Н. Альтернативные топлива для автотракторной техники: курс лекций / А. Н. Карташевич, А. В. Гордеенко, В. С. Товстыка, П. Ю. Малышкин. – Горки: БГСХА, 2013. – 60 с.

8. Kartashevich A. N. Flammability of New Diesel Fuels./ S. A. Plotnikov // Russian Engineering Research, 2018 – Vol. 38 – No. 6, pp. 424–427.

9. Карташевич, А. Н. Показатели работы тракторного дизеля на рапсовом масле. / А. Н. Карташевич, С. А. Плотников, В. С. Товстыка // Двигателестроение. – 2011. – № 2. – С. 39–41.