

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ БИОГАЗА НА ЭФФЕКТИВНЫЕ И ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ДИЗЕЛЯ 4ЧН 11,0/12,5

В. А. ШАПОРЕВ, А. Н. КАРТАШЕВИЧ

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

(Поступила в редакцию 13.01.2020)

В статье приведены результаты стендовых испытаний дизеля 4ЧН 11,0/12,5 (D-245.5S2) при работе на чистом дизельном топливе и на смесях 85 % дизельного топлива (ДТ) + 15 % биогаза (БГ) и 70 % ДТ + 30 % БГ. Исследовались эффективные показатели работы дизеля и показатели его дымности и токсичности при работе на этих смесях по нагрузочной характеристике, снятой при частоте 1400 мин⁻¹, соответствующей режиму максимального крутящего момента дизеля.

По результатам стендовых испытаний дизеля следуют основные выводы:

1. Эффективные показатели работы дизеля на смесях 85 % ДТ + 15 % БГ и 70 % ДТ + 30 % БГ в отличие от работы на чистом ДТ имеют: снижение мощности на 3,10 % и 8,46 %; снижение крутящего момента на 8,36 % и 14,63 %; снижение КПД на 3,17 % и 5,29 %; увеличение потребной теплоты, вводимой в цилиндры на 4,05 % и 4,99 %; увеличение удельного эффективного расхода теплоты на 53,69 % и 63,47 %.

2. Показатели токсичности и дымности дизеля 4ЧН 11,0/12,5 при $n=1400$ мин⁻¹ на смешанных топливах 85 % ДТ + 15 % БГ и 70 % ДТ + 30 % БГ характеризуются: снижением выбросов оксидов азота на 7,65 % и 13,12 %; снижением выбросов частиц сажи на 18,86 % и 33,12 %; увеличением выбросов диоксида углерода на 7,02 % и 20,74 %; увеличением выбросов углеводородов на 14,37 % и 38,25 %; увеличением выбросов оксидов углерода на 19,15 % и 38,71 %.

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

The article presents results of bench tests of a diesel 4 ChN 11.0 / 12.5 (D-245.5S2) when running on clean diesel fuel and mixtures of 85 % diesel fuel (DF) + 15 % biogas (BG) and 70 % DF + 30 % BG. We studied the effective performance of diesel engine and its smoke and toxicity when working on these mixtures according to the load characteristic, taken at a frequency of 1400 min⁻¹, corresponding to the maximum torque of diesel engine.

According to the results of bench tests of a diesel engine, the main conclusions follow:

1. Effective indicators of diesel operation on mixtures of 85 % DF + 15 % BG and 70 % DF + 30 % BG, unlike working on pure diesel, have: a decrease in power by 3.10 % and 8.46 %; torque reduction of 8.36 % and 14.63 %; decrease in efficiency by 3.17 % and 5.29 %; an increase in the required heat introduced into cylinders by 4.05 % and 4.99 %; an increase in the specific effective heat consumption by 53.69 % and 63.47 %.

2. The toxicity and smoke levels of a 4 ChN 11.0 / 12.5 diesel engine with $n = 1400$ min⁻¹ on mixed fuels 85 % DF + 15 % BG and 70 % DF + 30 % BG are characterized by: a decrease in nitrogen oxide emissions by 7.65 % and 13.12 %; reduction of soot particle emissions by 18.86 % and 33.12 %; an increase in carbon dioxide emissions of 7.02 % and 20.74 %; an increase in hydrocarbon emissions by 14.37 % and 38.25 %; an increase in carbon monoxide emissions by 19.15 % and 38.71 %.

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

Введение

Для двигателей внутреннего сгорания в качестве альтернативных топлив рассматриваются газообразные виды топлив, в основном это природный газ, БГ. Применение нетрадиционных видов топлива на автотракторных двигателях связано с решением вопросов по организации рабочего процесса, регулирования, дозирования, хранения и заправки, а также получения их в достаточном количестве при невысокой себестоимости и ряда других вопросов [1, 2].

К газовым топливам относятся газообразные углеводороды, которые добываются из недр земли при разработке газовых, газоконденсатных и нефтяных месторождений. Источниками получения биогаза служат продукты метанового брожения органических веществ растительного и животного происхождения. Эффективность технологии получения БГ отличается высокой рентабельностью, так как позволяет утилизировать стоки животноводческих ферм, сельскохозяйственные и бытовые отходы, отходы лесозаготовки и деревообработки.

Самым главным компонентом природных газов и биогаза является метан (CH₄), содержание которого, в зависимости от источника, колеблется в огромных пределах – от 50 до 90 % объема. Также в газах содержатся другие газообразные углеводороды – этан (C₂H₆), пропан (C₃H₈), бутан (C₄H₁₀), азот (N₂), диоксид углерода (CO₂), сероводород (H₂S) и другие [3, 4].

Основным преимуществом газовых топлив является их экологическая чистота: отсутствие оксидов металлов, свинца, ароматических углеводородов, очень низкое содержание серы и т. д. Газообразные топлива транспортируют в баллонах в сжатом или сжиженном состоянии, а подаются во впускной коллектор дизеля через смеситель (форсунки). При этом, независимо от агрегатного состояния транспортируемого газа, в цилиндры двигателя поступает газозводушная смесь [5, 6].

В процессе исследований разрабатывались новые составы топлив на основе дизельного топлива (ДТ) и биогаза (БГ), удовлетворяющие требованиям их применения в дизеле. Влияние состава топлива на смеси 85 % ДТ + 15 % БГ, а и 70 % ДТ + 30 % БГ на эффективные показатели дизеля оценивалось по нагрузочным характеристикам при частоте 1400 мин⁻¹, соответствующей режиму максимального крутящего момента дизеля.

Основная часть

Определение влияния состава смесевое топлива ДТ и БГ на эффективные и экологические показатели работы дизеля по нагрузочным характеристикам. На кафедре «Тракторы, автомобили и машины для природообустройства» БГСХА были проведены экспериментальные исследования в специализированной 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.

Экспериментальная установка включает: электротормозной нагрузочный стенд САК-N670, дизель 4ЧН 11,0/12,5, электронный расходомер АИР-50 с весовым устройством и комплект измерительных приборов с выводом данных на монитор компьютера. Анализ проб отработавших газов (ОГ) производился с помощью автоматического газоанализатора Маха МГТ-5. Дымность ОГ измерялась с помощью дымомера СИДА-107 «АТЛАС». Все приборы прошли государственную поверку.

Подача БГ осуществлялась системой питания, конструкция которой защищена охранным документом (патент Республики Беларусь № 9079) [7].

Система, через которую подавался БГ в дизель, изображена на рисунке 1 и работает следующим образом.

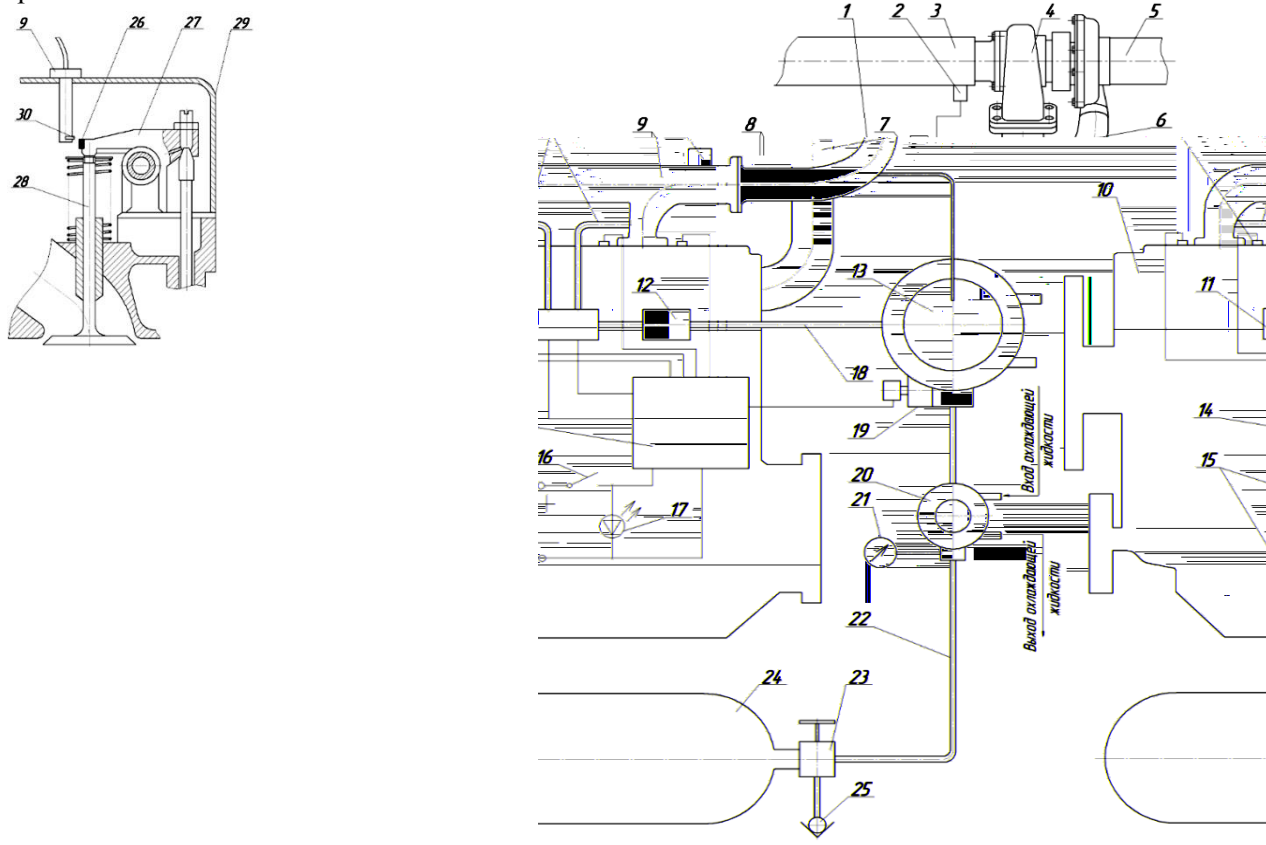


Рис. 1. Система подачи газообразного топлива в дизель:

1 – впускной коллектор; 2 – датчик температуры отработавших газов; 3 – приемная труба глушителя шума; 4 – турбокомпрессор; 5 – подающая труба; 6 – выпускной коллектор; 7 – датчик давления наддува; 8 – газовые штуцеры; 9 – датчик Холла; 10 – блок цилиндров; 11 – рампа газовых форсунок; 12 – газовый фильтр; 13 – дифференциальный редуктор низкого давления; 14 – электронный блок управления; 15 – источник питания; 16 – выключатель; 17 – световой индикатор; 18 – газопровод; 19 – электромагнитный клапан; 20 – редуктора высокого давления; 21 – манометр; 22 – газопровод высокого давления; 23 – вентиль; 24 – источник газа; 25 – заправочное устройство; 26 – постоянный магнит; 27 – коромысло; 28 – впускной клапан; 29 – клапанная крышка; 30 – чувствительный элемент датчика Холла

При работе двигателя на малой нагрузке (по сигналам датчиков Холла 9 и датчика давления наддува 7) электронный блок 14 не подает управляющие сигналы на рампу газовых форсунок 11, и те, в свою очередь, не осуществляют подачу газообразного топлива во впускной коллектор 1 через газовые штуцеры 8.

При работе двигателя с нагрузкой, близкой к номинальной (зависит от давления наддува), или с перегрузкой, магнитное поле постоянного магнита 26 воздействует на чувствительный элемент 30 датчика Холла 9 каждый раз, когда впускной клапан закрыт. При открытии впускного клапана воздействие постоянного магнита 26 на чувствительный элемент 30 исчезает, и это служит сигналом для электронного блока 14, который формирует управляющие импульсы на открытие газовых форсунок рампы 11 в моменты открытия впускных клапанов соответствующих цилиндров. Подача газообразного топлива через рампу газовых форсунок составляет не более 40 % и осуществляется от источника газа 24 через вентиль 23, редуктор высокого давления 20 с манометром 21, электромагнитный клапан 19, дифференциальный редуктор низкого давления 13, газовый фильтр 12, по газопроводу высокого давления 22 и низкого давления 18. При длительной работе двигателя с перегрузкой датчик температуры отработавших газов 2 посылает сигнал электронному блоку 14 о повышении температуры отработавших газов выше допустимой, при этом электронный блок 14 уменьшает длительность управляющих импульсов к рампе газовых форсунок 11, что приводит к уменьшению подачи газообразного топлива во впускной коллектор 1.

Подача газообразного топлива во впускной коллектор 1 прекращается при снижении давления в источнике 24 газа ниже давления, регулируемого редуктором высокого давления 20 и принудительно, электромагнитным клапаном 19 с фильтрующим элементом, посредством отключения его от источника питания 15 выключателем 16 с подтверждением светового индикатора 17, или вентилем 23.

Переводя дизель на работу на смесях БГ с ДТ, необходимо сохранить его мощностные и экономические показатели на уровне, установленном заводом-изготовителем. Согласно руководству по эксплуатации, установочный угол опережения впрыскивания топлива для тракторного дизеля 4ЧН 11,0/12,5 (Д-245.5S2) при работе на чистом ДТ составляет $\Theta_{впр.}=18^\circ$. При работе дизеля на топливах с добавлением 15 % БГ и 30 % БГ рациональным установочным углом опережения впрыскивания следует считать угол $\Theta_{впр.}=22^\circ$ [8].

На рис. 2 представлена нагрузочная характеристика дизеля 4ЧН 11,0/12,5 при частоте вращения $n=1400 \text{ мин}^{-1}$.

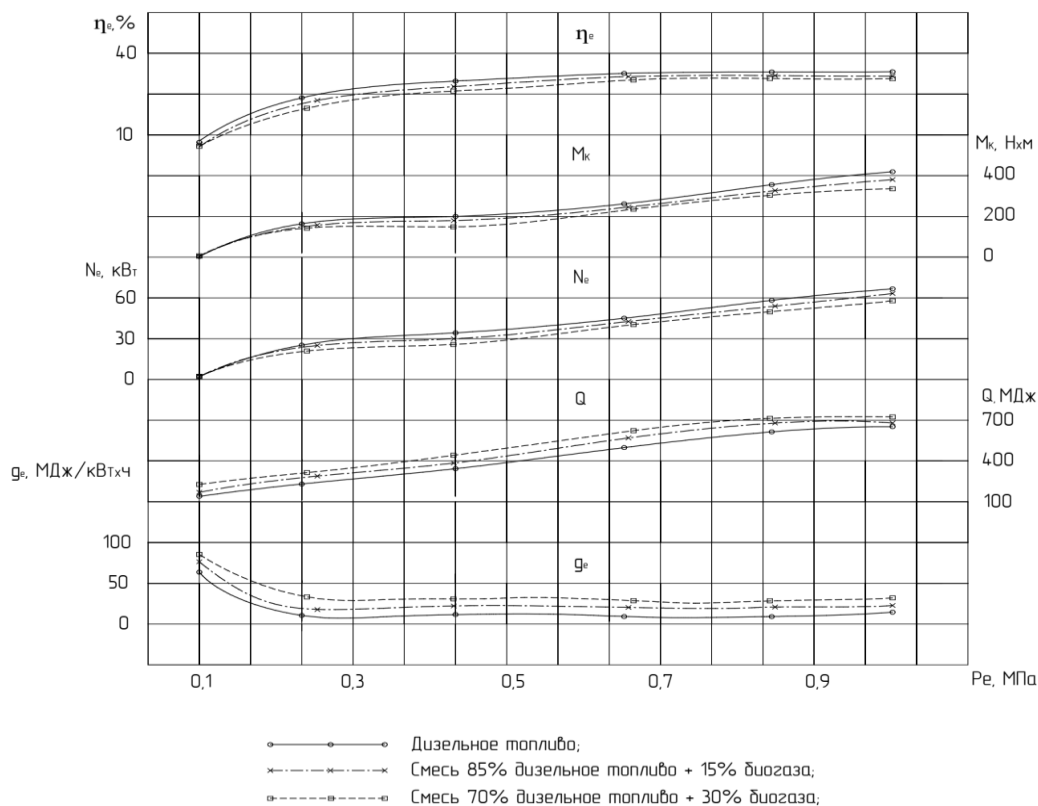


Рис. 2. Нагрузочная характеристика дизеля 4ЧН 11,0/12,5 при $n=1400 \text{ мин}^{-1}$ и рациональным значениям угла опережения впрыскивания топлива $\Theta_{оп.впр.}=22^\circ$ до в.м.т.

Значение удельного эффективного расхода теплоты g_e при работе на чистом ДТ, а также на топливах с добавлением 15 % БГ и 30 % БГ уменьшается во всем рассмотренном диапазоне изменения нагрузки p_e (рис. 1). Так, при нагрузке $p_e=0,85$ МПа и работе на ДТ удельный эффективный расход теплоты $g_e=11,40$ МДж/кВт \times ч, а при добавлении 15% БГ и 30% БГ соответственно при $p_e=0,86$ МПа и $p_e=0,84$ МПа он равен, соответственно, $g_e=24,62$ МДж/кВт \times ч и $g_e=31,21$ МДж/кВт \times ч. При этом изменение удельного эффективного расхода теплоты смеси с добавлением 15% БГ и 30% БГ увеличивается на 53,69 % и 63,47 % для самого ДТ, и так продолжается в среднем по всему диапазону изменения нагрузки p_e .

Изменение суммарного значения вводимой теплоты Q в цилиндры дизеля сопровождается её некоторым ростом во всем диапазоне нагрузки p_e . Значения теплоты Q в точках нагрузки $p_e=0,85$ МПа, $p_e=0,86$ МПа и $p_e=0,84$ МПа для рассматриваемых составов смесей составляют $Q=667,18$ МДж, $Q=695,31$ МДж и $Q=702,24$ МДж соответственно. Увеличение количества потребной вводимой теплоты составляет 4,05 % для состава 85 % ДТ + 15 % БГ и 4,99 % для состава 70 % ДТ + 30 % БГ. Увеличение удельного эффективного расхода теплоты g_e и суммарного потребляемого расхода теплоты Q вводимой в цилиндры дизеля можно объяснить меньшей теплотой сгорания БГ и снижением скорости процесса сгорания смесового топлива чем у ДТ.

Мощность дизеля заметно растет во всем диапазоне нагрузки от $p_e=0,1$ МПа до $p_e=0,9$ МПа, далее этот рост незначителен. При нагрузке $p_e=0,85$ МПа мощность дизеля, работающего на ДТ, составляет $N_e=56,4$ кВт, а на смесях 85 % ДТ + 15 % БГ и 70 % ДТ + 30 % БГ и $p_e=0,86$ МПа и $p_e=0,84$ МПа ее значение составляет $N_e=54,7$ кВт и $N_e=52$ кВт. Следовательно, мощность незначительно снижается с замещением ДТ на БГ, в процентном соотношении на смесях 85 % ДТ + 15 % БГ и 70 % ДТ + 30 % БГ от ДТ составляет 3,10 % и 8,46 %.

Крутящий момент также, как и мощность растет во всем диапазоне увеличения нагрузки, например, при работе на чистом ДТ $M_k=376$ Н \times м достигается при $p_e=0,85$ МПа, а на топливах с добавлением 15 % БГ и 30 % БГ крутящий момент $M_k=347$ Н \times м и $M_k=328$ Н \times м достигается при $p_e=0,86$ МПа и $p_e=0,84$ МПа. Крутящий момент на смесях 85 % ДТ + 15 % БГ и 70 % ДТ + 30 % БГ снижается на 8,36 % и 14,63 %, чем на чистом ДТ.

Эффективного КПД при работе дизеля на чистом ДТ при нагрузкой $p_e=0,85$ МПа составляет 35,8 %, а при работе на смесях 85 % ДТ + 15 % БГ и 70 % ДТ + 30 % БГ значение максимального эффективного КПД составило $\eta_e=34,7$ % и $\eta_e=34$ % при $p_e=0,86$ МПа и $p_e=0,84$ МПа. Следовательно, эффективный КПД дизеля снижается с ростом замещения чистого ДТ биогазом на 3,17 % и 5,29 %. Снижение эффективного КПД дизеля на смесях с БГ объясняется низшей теплотворной способности БГ по сравнению к чистому ДТ.

Графики показателей токсичности и дымности $n=1400$ мин $^{-1}$ представлены на рис. 3.

Выбросы оксидов углерода СО с ОГ незначительно повышаются по всему диапазону нагрузки, а также с добавлением БГ увеличивается концентрация СО в ОГ дизеля (рис. 3). Так, при $p_e=0,85$ МПа для чистого ДТ СО составляет 0,038 %, для смеси 85 % ДТ + 15 % БГ при $p_e=0,86$ МПа СО=0,047 % и для 70 % ДТ + 30 % БГ при $p_e=0,84$ МПа СО=0,062 %. Содержание СО в ОГ на смесях 85 % ДТ + 15 % БГ и 70 % ДТ + 30 % БГ больше, чем на чистом ДТ на 19,15 % и 38,71 %. Рост выбросов оксидов углерода СО объясняется исходным составом используемого топлива.

Содержание диоксида углерода СО $_2$ в ОГ дизеля изменяется неоднозначно. Его эмиссия в начале диапазона нагрузки с увеличением количества БГ в смеси снижается, а в середине диапазона нагрузки его эмиссия увеличивается. Например, при $p_e=0,85$ МПа для чистого ДТ, при $p_e=0,86$ МПа для смеси 85 % ДТ + 15 % БГ, а при $p_e=0,84$ МПа для смеси 70% ДТ + 30% БГ содержание диоксида углерода СО $_2$ составляет 5,96 %, 6,41 % и 7,52 %. Выбросы диоксида углерода СО $_2$ с ОГ увеличиваются с ростом замещения чистого ДТ биогазом, в процентном соотношении это составляет 7,02 % и 20,74 %. Рост выбросов диоксида углерода объясняется худшими физико-химическими и тепло-физическими свойствами БГ относительно ДТ.

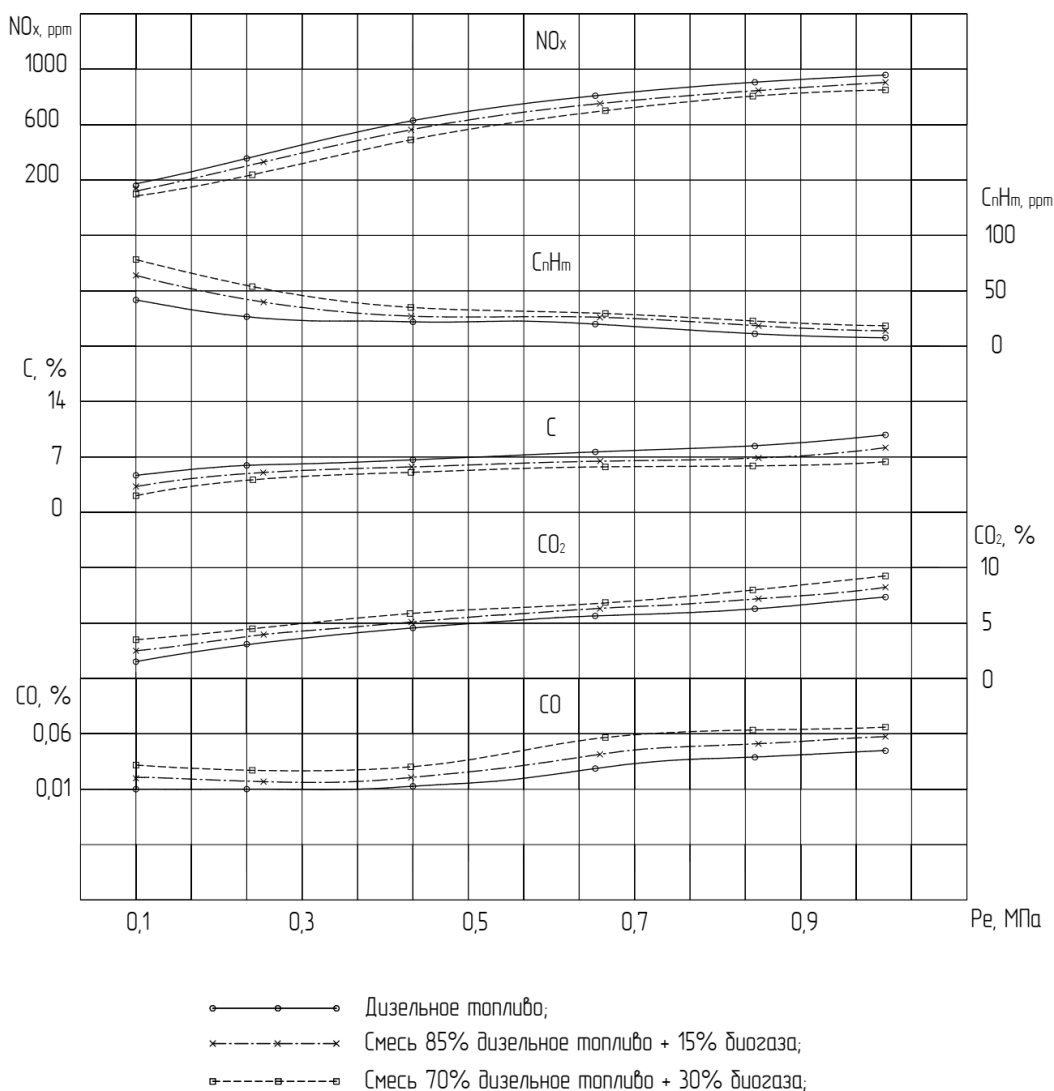


Рис. 3. Показатели токсичности и дымности дизеля 4ЧН 11,0/12,5 при $n=1400 \text{ мин}^{-1}$ и рациональным значении угла опережения впрыскивания топлива $\Theta_{\text{оп.впр}}=22^\circ$ до в.м.т.

Из графика показателей токсичности и дымности (рис. 3) видно, что содержание сажи C в ОГ изменяется неоднозначно. При работе на ДТ и на смесях 85 % ДТ + 15 % БГ и 70 % ДТ + 30 % БГ и при нагрузке $p_e=0,85 \text{ МПа}$, $p_e=0,86 \text{ МПа}$ и $p_e=0,84 \text{ МПа}$ концентрация сажи составляет 8,32 %, 7,00 % и 6,25 %. Следовательно, с увеличением БГ в смесевых составах с ДТ, снижается содержание сажи в ОГ на 18,86 % и 33,12 %. Данное обстоятельство объясняется тем, что при ДТ локальные переобогащенные топливом зоны в цилиндре дизеля образуются чаще чем с замещением его БГ, и в полной мере реализуются процессы сажеобразования.

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 $p_e=0,85 \text{ МПа}$ для чистого ДТ, при $p_e=0,86 \text{ МПа}$ для смеси 85 % ДТ + 15 % БГ, а при $p_e=0,84 \text{ МПа}$ для смеси 70 % ДТ + 30 % БГ содержание оксидов азота NO_x соответственно, составляет 914 ppm, 849 ppm и 808 ppm. Содержание оксидов азота NO_x в ОГ на смесях 15 % БГ и 30 % БГ меньше чем на чистом ДТ на 7,65 % и 13,12 %. Снижение оксидов азота NO_x можно объяснить тем, что их эмиссия находится в прямой зависимости от содержания свободного кислорода в пламени при условии достаточно высокой его температуры [9]. Снижение локальной и средней температуры цикла в случае работы дизеля на смесях с БГ непосредственно обуславливает снижение эмиссии оксидов азота.

Выбросы несгоревших углеводородов C_nH_m в ОГ дизеля снижаются во всем диапазоне увеличения нагрузки, но с увеличением содержания БГ в смеси по сравнению с чистым ДТ выбросы C_nH_m возрастают. При работе на чистом ДТ выбросы углеводородов составляют 11,20 ppm при $p_e=0,85 \text{ МПа}$, а на топливах с добавлением 15 % БГ и 30 % БГ выбросы углеводородов составляют 13,08 ppm и 18,14 ppm при $p_e=0,86 \text{ МПа}$ и $p_e=0,84 \text{ МПа}$. Следовательно, в процентном соотношении рост выбросов

C_nH_m в ОГ с применением БГ к чистому ДТ составил 14,37 % и 38,25 %. Рост выбросов несгоревших углеводородов при работе дизеля с добавками БГ объясняется наличием многочисленных плохо горящих компонентов.

Заключение

Анализ нагрузочной характеристики дизеля 4ЧН 11,0/12,5 (Д-245.5S2), работающего при $n=1400 \text{ мин}^{-1}$ на смесях ДТ с БГ, позволяет сделать следующие выводы:

1. Эффективные показатели работы дизеля 4ЧН 11,0/12,5 на смесях 85 % ДТ + 15 % БГ и 70 % ДТ + 30 % БГ в отличии от работы на чистом ДТ имеют: снижение мощности на 3,10 % и 8,46 %; снижение крутящего момента на 8,36 % и 14,63 %; снижение КПД на 3,17 % и 5,29 %; увеличение потребной теплоты, вводимой в цилиндры на 4,05 % и 4,99 %; увеличение удельного эффективного расхода теплоты на 53,69 % и 63,47 %.

2. Показатели токсичности и дымности дизеля 4ЧН 11,0/12,5 при $n=1400 \text{ мин}^{-1}$ на смесевых топливах 85 % ДТ + 15 % БГ и 70 % ДТ + 30 % БГ характеризуются: снижением выбросов оксидов азота на 7,65 % и 13,12 %; снижением выбросов частиц сажи на 18,86 % и 33,12 %; увеличением выбросов диоксида углерода на 7,02 % и 20,74 %; увеличением выбросов углеводородов на 14,37 % и 38,25 %; увеличением выбросов оксидов углерода на 19,15 % и 38,71 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. Карташевич, А. Н. Альтернативные виды топлива для двигателей / А. Н. Карташевич, В. С. Товстыка, П. Ю. Малышкин, Г. Н. Гурков, А. В. Бучинкас. – Горки: БГСХА, 2012. – С. 376.
2. Плотников, С. А. Разработка числовых методов определения свойств новых топлив / С. А. Плотников, А. Н. Карташевич // Вестник машиностроения. – 2018. – № 3. – С. 7–10.
3. Альтернативные виды топлива для двигателей: монография / А. Н. Карташевич [и др.]. – Горки, БГСХА, 2013. – 376 с.
4. Альтернативные топлива для автотракторной техники: курс лекций / А. Н. Карташевич [и др.]. – Горки: БГСХА, 2013. – 60 с.
5. A. N. Kartashevich, S. A. Plotnikov. Flammability of New Diesel Fuels. // Russian Engineering Research, 2018, Vol. 38, No. 6, pp. 424–427.
6. Карташевич, А. Н. Газовое оборудование для автотракторной техники: курс лекций / А. Н. Карташевич, П. Ю. Малышкин, А. А. Сысоев. – Горки: БГСХА, 2012. – 86 с.
7. Система подачи газообразного топлива в дизель: пат. 9079 Республика Беларусь, МПК F 02M 43/00 / А. Н. Карташевич, П. Ю. Малышкин, заявитель Белорус. гос. с-х. академия. № u 20120268; заявл. 05.09.2011; опубл.: 30.04.2013. // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2013. № 2 – С. 188.
8. Карташевич, А. Н. Определение рациональных регулировок дизеля 4ЧН 11,0/12,5 для работы на смесях дизельного топлива с биогазом / А. Н. Карташевич, В. А. Шаповалов, С. А. Плотников // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. – 2019. – № 1. – С. 149–153.
9. Образование и разложение загрязняющих веществ в пламени. Пер. с англ. / Под ред. Ю. Ф. Дитякина. – М.: Машиностроение, 1981. – 408 с.