

ПРИМЕНЕНИЕ ГАЗОМОТОРНОГО ТОПЛИВА НА ТРАКТОРНОМ ДИЗЕЛЕ 4ЧН 11,0/12,5

В. А. ШАПОРЕВ, Р. С. ДАРГЕЛЬ, Е. В. СУЛИМА

УО «Белорусская государственная сельскохозяйственная академия»,
г. Горки, Республика Беларусь, 213407

(Поступила в редакцию 02.07.2021)

Экологическая обстановка осложнена увеличением выбросов вредных веществ в атмосферу, одним из результатов данного осложнения можно отметить рост автотранспорта по всему миру, данное обстоятельство способствует поиску решений по совершенствованию автотракторных двигателей с целью изменения экологических показателей в лучшую сторону. Республика Беларусь обладает существенным потенциалом для выработки биогаза, так как активное развитие животноводческого комплекса страны обуславливает необходимость утилизации большого количества животноводческих отходов. Газомоторное топливо всё больше и больше завоевывает мировой рынок моторного топлива, поэтому в мире автопроизводства возникает потребность в разработке систем подачи газомоторного топлива и разработке двигателей, приспособленных под данные виды топлив.

Целью данной работы является определение наиболее выгодных режимов работы тракторного дизеля на газомоторном топливе. Была осуществлена модернизация экспериментальной установки и системы питания тракторного дизеля, проведена оценка влияния замещения части дизельного топлива (ДТ) на биогаз (БГ) и природный газ (ПГ) на эффективные и экологические показатели работы дизеля 4ЧН 11,0/12,5 (Д-245.5S2). Установлено, что эффективные показатели работы дизеля на данных смесях показывают незначительное снижение мощности, крутящего момента и КПД, а также рост удельного эффективного расхода теплоты смеси и рост суммарно потребного количества теплоты, вводимой в цилиндры дизеля. Экологические показатели характеризуются снижением выбросов с отработавшими газами частиц сажи и оксидов азота, а также незначительным увеличением выбросов с отработавшими газами оксидов углерода, диоксида углерода и углеводородов.

Ключевые слова: Тракторный дизель, дизельное топливо, биогаз, природный газ, отработавшие газы, дымность, токсичность.

The environmental situation is complicated by an increase in the emissions of harmful substances into the atmosphere, one of the results of this complication is the growth of vehicles around the world, this circumstance contributes to the search for solutions to improve automotive engines in order to change environmental indicators for the better. The Republic of Belarus has a significant potential for biogas production, since the active development of the country's livestock complex necessitates the disposal of a large amount of livestock waste. NGV fuel is gaining more and more popularity in the world motor fuel market, so in the world of automotive industry there is a need to develop NGV fuel supply systems and develop engines adapted to these types of fuels.

The purpose of this work is to determine the most advantageous operating modes of a tractor diesel engine running on gas-motor fuel. The modernization of the experimental installation and the power supply system of the tractor diesel engine was carried out, an assessment was made of the impact of replacing part of the diesel fuel (DF) with biogas (BG) and natural gas (NG) on the effective and environmental performance of the diesel engine 4ChN 11.0/12.5 (D- 245.5S2). It was found that the effective performance of a diesel engine on these mixtures shows a slight decrease in power, torque and efficiency, as well as an increase in the specific effective consumption of heat of the mixture and an increase in the total required amount of heat introduced into the cylinders of the diesel engine. The environmental indicators are characterized by a decrease in emissions with exhaust gases of soot particles and nitrogen oxides, as well as a slight increase in emissions with exhaust gases of carbon oxides, carbon dioxide and hydrocarbons.

Key words: tractor diesel, diesel fuel, biogas, natural gas, exhaust gases, smoke, toxicity.

Введение

Возможность применения газового топлива в автотракторных двигателях интересует исследователей достаточно давно. Из современных исследователей по применению газомоторного топлива стоит отметить Имада Саада С. Б. и Новичкова М. Ю. [1, 2].

Имад Саад С. Б. в лаборатории кафедры сельскохозяйственных машин и машиностроения Хартумского университета исследовал применение смеси БГ с различным содержанием метана и ДТ на рабочие процессы малогабаритного дизеля Lister-Delta-Vertical. Им было выявлено, что при работе дизеля на БГ с концентрациями метана 60 %, 72,8 %, 77,4 % и 84,8 %, он показывал 82 %, 93 %, 97 % и 98 % от его эффективных показателей при работе на ДТ, данное обстоятельство доказывает роль концентрации метана в БГ на эффективные показатели дизеля работающего по газожидкостному режиму [3].

Рост количества метана в БГ и доля подаваемом в дизель двигатель БГ дает возможность снизить количество ДТ. Во время роста содержания метана с 60 % до 70 % часть замещенного ДТ снижается с 30 % до 20 %, а также данный рост содержания метана в БГ сопровождается снижением эффективного КПД.

Новичков М. Ю. в научно-исследовательской лаборатории «Санкт-Петербургского государственного политехнического университета» исследовал газожидкостной рабочий процесс дизеля 64 15/18 (ЗД6) с применением различного количества ПГ в смеси с ДТ. Результаты его работы уста-

новили следующие, снижение дымности отработавших газов (ОГ) примерно в 5 раз при работе двигателя на смесях ДТ с газообразного топлива и снижение концентрации окиси углерода в ОГ в пределах от 7 % до 20 % при работе двигателя соответственно на смесях ДТ и газообразного топлива относительно работы двигателя на чистом ДТ. Негативной стороной является то, что при работе двигателя на этих смесях относительно работы двигателя на чистом ДТ возрастает содержание выбросов в ОГ углеводородов и окиси азота. Также экспериментально Новичков М. Ю. подтвердил тот факт, что переход работы двигателя с ДТ на смесь ДТ с газообразным топливом сопровождается увеличением периода задержки воспламенения [4...6].

Новичков М. Ю. предлагает увеличить угол опережения впрыска топлива при переводе дизельного двигателя в газодизель, так как при стандартном угле опережения впрыска эффективные показатели являются заниженными в отличие дизельного прототипа.

На основании вышеизложенного, целью данной работы является определение наиболее выгодных режимов работы дизельного двигателя на газомоторном топливе.

Задачами исследований являются:

– модернизация экспериментальной установки и системы питания тракторного дизеля для проведения исследований;

– оценка влияния замещения части ДТ на БГ и ПГ на основные показатели работы дизельного двигателя 4ЧН 11,0/12,5 (Д-245.5S2).

Основная часть

Проведение экспериментальных исследований осуществлялось в аккредитованной научно-исследовательской лаборатории «Белорусской государственной сельскохозяйственной академии». Проводя экспериментальные исследования ДТ, было замещено БГ и ПГ в процентном соотношении по общему количеству подаваемой теплоты в цилиндры дизельного двигателя.

В состав экспериментальной установки входил тракторный дизель 4ЧН 11,0/12,5 (Д-245.5S2) с турбонаддувом и промежуточным охлаждением надвучного воздуха. При помощи нагрузочного стенда SAK-N670 с его вспомогательным оборудованием осуществлялось измерение крутящего момента. Электронный датчик, расположенный на коленчатом валу, измерял его частоту вращения. Количество расходуемого ДТ измерялось при помощи расходомера АИР-50. БГ и ПГ находился в специальных баллонах высокого давления, регулировки давления в баллонах и подающих рукавах осуществлялось редуктором БКО 50-5, расход их определялся газовым счетчиком СМГ-4. Подача БГ и ПГ осуществлялась через двухступенчатый газовый редуктор, газовые форсунки и газовые штуцера. Измерение токсичности ОГ осуществлялось газоанализатором Маһа MGT-5, а дымность при помощи дымомера MDO2 LON. Данные приборы имели сертификаты о прохождении государственной поверки.

Газообразное топливо вводилось в цилиндры дизельного двигателя запатентованной системой питания. Данная система питания в дизельный двигатель способна определять утечку данного топлива, и изображена она на рис. 1 [7].

Принцип работы этой системы питания заключается в следующем. При работе двигателя на частичных нагрузках и холостом ходу частота вращения коленчатого вала, определяемая датчиком положения коленчатого вала 27, будут низкой, а расход воздуха, проходящий через датчик массового расхода воздуха 2 во впускном коллекторе 1 – мал (допустимые параметры расхода воздуха и оборотов частоты вращения коленчатого вала задаются в электронном блоке управления 14). При этом электронный блок управления 14 не получает сигнала от ДМРВ 2 и датчика положения коленчатого вала 27, следовательно, электрокорректор 12 не осуществляет выдвижения штока, также газовая форсунка 7 не подает газообразное топлива во впускной коллектор 1. На сенсорном дисплее 18 выводятся данные о значении расхода потребляемого воздуха и оборотов коленчатого вала.

При возрастании оборотов коленчатого вала дизельного двигателя, расход потребляемого воздуха растет, датчик ПКВ 27 и ДМРВ 2 посылают сигнал на электронный блок управления 14, который подает сигнал на электро-корректор 12. Далее плавно выдвигающийся шток электрокорректора 12 упирается в основной рычаг 13 и, при выдвинутом штоке электрокорректора 12, подается сигнал через электронный блок управления 14 на форсунку подачи газа 7, где она совершает впрыск газообразного топлива во впускной коллектор 1. Газообразное топлива вводится в пределах от 80 % до 85 %.

При достижении предельной частоты вращения коленчатого вала двигателя в газодизельном режиме расход воздуха становятся выше допустимых. В этот момент датчики массового расхода воздуха 2 и положения коленчатого вала 27 отправляют команду на ЭБУ 14, который посылает сигнал на

электрокорректор 12 и газовую форсунку 7, где далее осуществляется переход из газодизельного режима в жидкостной режим работы. Соответственно, это и позволяет защитить силовую установку от перегрузки. Запуская двигатель, его необходимо прогреть до рабочей температуры, до этого момента введения газообразного топлива не осуществляется.

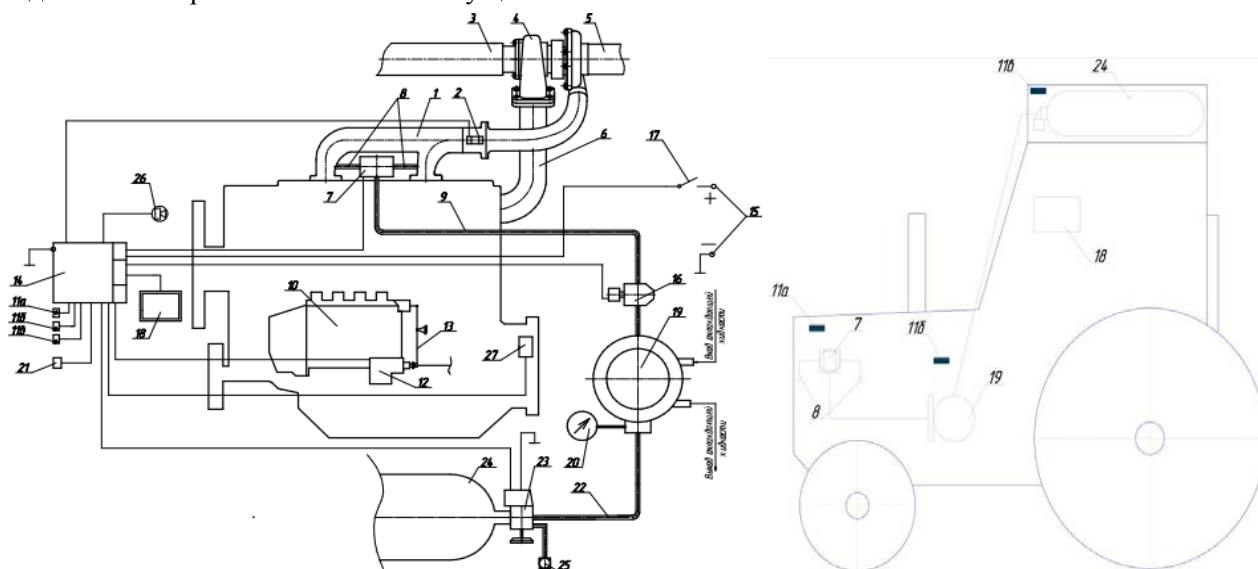


Рис. 1. Система подачи и контроля утечки газообразного топлива в дизельном двигателе:

1 – впускной коллектор; 2 – датчик массового расхода воздуха (ДМРВ); 3 – приемная труба глушителя шума; 4 – турбокомпрессор; 5 – подающая труба; 6 – выпускной коллектор; 7 – форсунка газовая; 8 – штуцера газовые; 9 – газопровод низкого давления; 10 – топливный насос высокого давления (ТНВД); 11 – датчик утечки газа; 12 – электрокорректор; 13 – рычаг основной; 14 – электронный блок управления (ЭБУ); 15 – источник питания; 16 – электромагнитный клапана с фильтрующим элементом; 17 – выключатель; 18 – сенсорный дисплей; 19 – двухступенчатый газовый редуктор;

20 – манометр; 21 – датчик температуры охлаждающей жидкости; 22 – газопровод высокого давления; 23 – вентиль с электромагнитной катушкой; 24 – источник газового топлива; 25 – заправочный клапан; 26 – звуковой сигнал; 27 – датчик положения коленчатого вала (ДПКВ)

В случае утечки газа, датчик утечки газа 11, в расположенный в отсеке установки источника газового топлива 24, а также расположенные в моторном отсеке возле газовой форсунки 7 и двухступенчатого газового редуктора 19 датчики утечки газа 11а и 11б определяют содержание газа. Если содержания газа около какого-либо датчика превысит заданный уровень, то сигнал передается на электронный блок управления 14, который подает один сигнал на звуковую сигнализацию 26, а другой сигнал на вентиль с электромагнитной катушкой 23 и электромагнитный клапан 16 с фильтрующим элементом, которые перекрывают доступ газового топлива в двигатель. При этом на сенсорном дисплее 18 появляется информация, указывающая – в каком месте появилась утечка газа.

Нагрузочная характеристика дизельного двигателя Д-245.5S2 при частоте вращения $n=1400 \text{ мин}^{-1}$ изображена на рис. 2.

Показатели удельного эффективного расхода теплоты g_e идут на спад по всему представленному диапазону нагрузки p_e , при работе двигателя на смесевых топливах с добавлением 15 % БГ, 30 % БГ, 15 % ПГ и 30 % ПГ чем при работе на чистом ДТ (рис. 2). Согласно графику (рис. 2), двигатель, работающий на ДТ в точке нагрузке $p_e=0,85 \text{ МПа}$, показывает нам значение $g_e=11,40 \text{ МДж/кВт}\times\text{ч}$. В точке нагрузки $p_e=0,86 \text{ МПа}$ двигатель, работающий на смесевом составе 85 % ДТ + 15 % БГ показывает значение удельного эффективного расхода теплоты $g_e=24,62 \text{ МДж/кВт}\times\text{ч}$. Также в точке нагрузки $p_e=0,84 \text{ МПа}$ и при работе двигателе на смесевом составе 70% ДТ + 30 % БГ его значение увеличивается до $g_e=31,21 \text{ МДж/кВт}\times\text{ч}$. Значение удельного эффективного расхода теплоты двигателя, работающего на смеси 85% ДТ + 15 % ПГ составит $g_e=17,30 \text{ МДж/кВт}\times\text{ч}$ в точке $p_e=0,87 \text{ МПа}$. Соответственно, работа двигателя на смесевом составе 70 % ДТ + 30 % ПГ увеличится до значения $g_e=28,22 \text{ МДж/кВт}\times\text{ч}$ в точке нагрузки $p_e=0,83 \text{ МПа}$. В процентном соотношении, значение удельного эффективного расхода теплоты с добавлением 15 % БГ и 30 % БГ возрастает на 53,69 % и 63,47 % относительно чистого ДТ, а с добавлением 15 % ПГ и 30 % ПГ этот рост составит 34,1 % и 59,6 %.

Количество теплоты, подаваемой в цилиндры дизельного двигателя, характеризуется ее ростом по всему охвату нагрузки. Показатель теплоты Q , подаваемой в цилиндры при работе двигателя на смесевых составах с добавлением БГ при вышеуказанных точках нагрузки, составляет $Q=695,31 \text{ МДж}$ и

$Q=702,24$ МДж. Следовательно, при работе двигателя на смесевых составах с добавлением ПГ эти значения составляют $Q=679,12$ МДж и $Q=699,15$ МДж, а вот при работе двигателя на чистом ДТ оно будет равняться $Q=667,18$ МДж. Рост потребного значения Q относительно чистого ДТ показывает 4,05 % для смесевого состава 85 % ДТ + 15 % БГ, 4,99 % для 70 % ДТ + 30 % БГ, а также 1,76 % для 85 % ДТ + 15 % ПГ и 4,57 % для 70 % ДТ + 30 % ПГ. Повышение значения удельного эффективного и суммарного расхода теплоты, поступившего в цилиндры двигателя объясняется худшей теплотворной способностью БГ и ПГ относительно чистому ДТ.

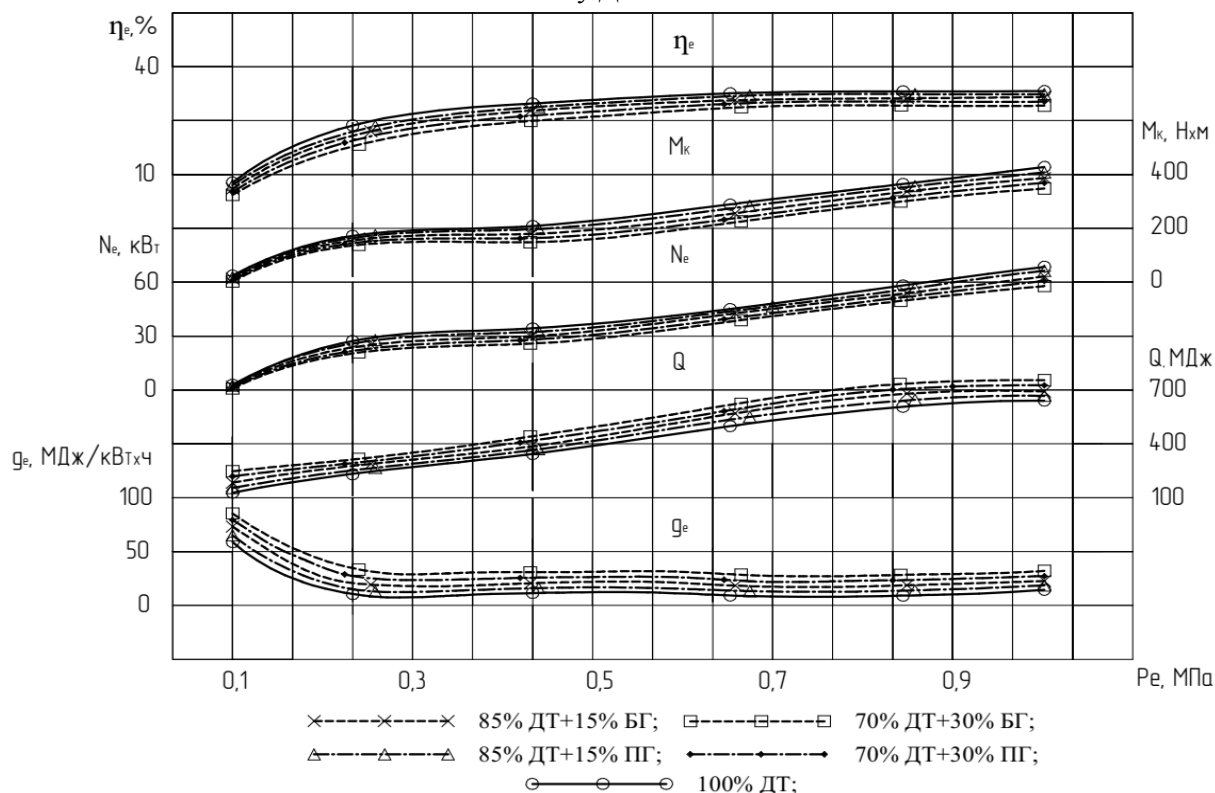


Рис. 2. Нагрузочная характеристика дизельного двигателя Д-245.5S2 при $n=1400$ мин⁻¹

Значение эффективной мощности составляет $N_e=56,4$ кВт для двигателя, работающего на ДТ при нагрузке $p_e=0,85$ МПа. При использовании смесевых составов с применением БГ исключительно при нагрузке $p_e=0,86$ МПа и $p_e=0,84$ МПа его значение составит $N_e=54,7$ кВт и $N_e=52$ кВт. Для смесей 85 % ДТ + 15 % ПГ и 70 % ДТ + 30 % ПГ при $p_e=0,87$ МПа и $p_e=0,83$ МПа мощность будет равна $N_e=55,3$ кВт и $N_e=53,5$ кВт. Эффективная мощность двигателя несущественно идет на уменьшения с частичной заменой чистого ДТ на смесевые составы с газообразным топливом. Значение крутящего момента в соответствии с графиком (рис. 2) протекает аналогично значению эффективной мощности дизельного двигателя Д-245.5S2. Весь этот рост в процентном соотношении работы двигателя на смесевых составах к работе двигателя на ДТ составляет от 4,15 % до 14,63 %.

Показатель эффективного КПД дизельного двигателя идет на снижение при его работе по газодизельному циклу. Так, с добавлением БГ его значение уменьшается на 3,17 % и 5,29 %, а с добавлением ПГ на 1,98 % и 4,37 %. Данное обстоятельство характеризуется пониженной теплотворной способностью газомоторных топлив по сравнению с чистым ДТ.

Из графика (рис. 3) видно, что содержание сажи C в ОГ изменяется в большую сторону при росте нагрузки. Двигатель работающий на ДТ и на смесевых составах с добавлением 15 % БГ и 30 % БГ в точках нагрузки $p_e=0,85$ МПа, $p_e=0,86$ МПа и $p_e=0,84$ МПа сопровождается содержанием сажи в количестве 8,32 %, 7,00 % и 6,25 %. А работая на смесевых составах с добавлением 15 % ПГ и 30 % ПГ в точках нагрузки $p_e=0,87$ МПа и $p_e=0,83$ МПа содержание сажи C в ОГ двигателя сопровождается 6,62 % и 5,71 %. Данное уменьшение концентрации сажи C в ОГ относительно работы двигателя по газодизельному циклу к жидкостному снижается от 18,86 % до 45,7 %. Этот характерный рост можно объяснить локальным перенасыщением зон в цилиндрах дизеля, работающего исключительно по жидкостному циклу, нежели по газодизельному [8].

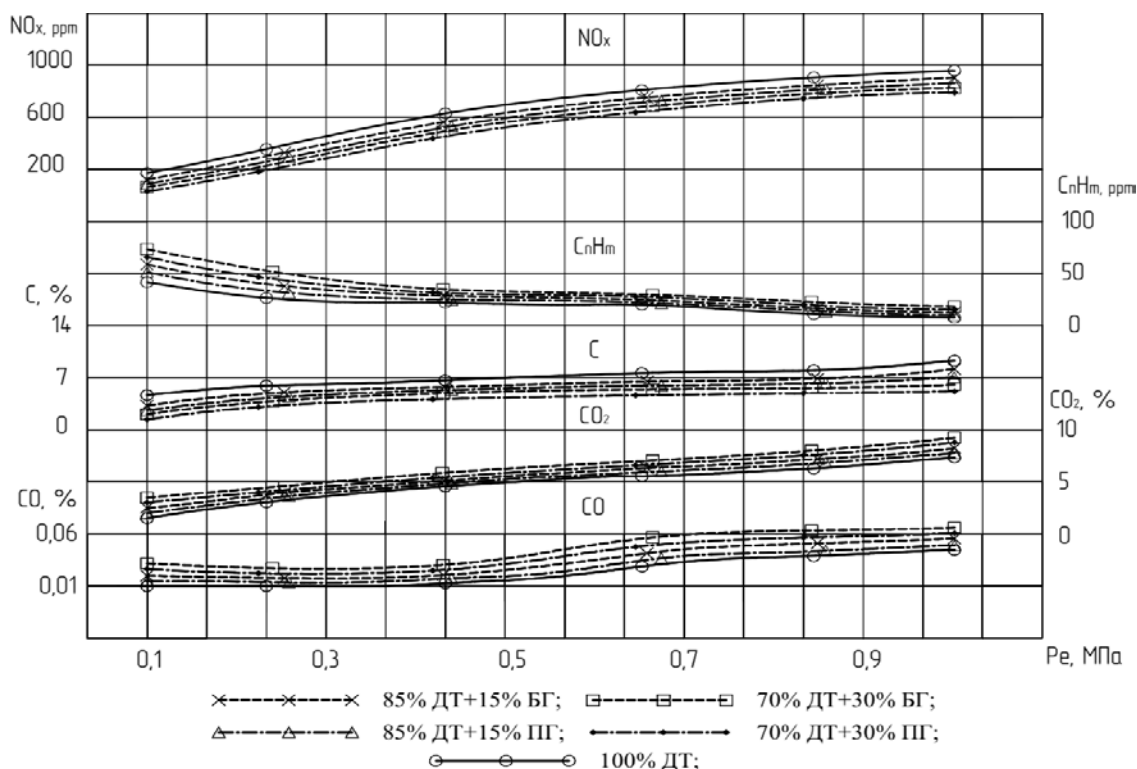


Рис. 3. Показатели дымности и токсичности дизельного двигателя Д-245.5S2 при $n=1400 \text{ мин}^{-1}$

Содержание концентрации оксидов азота NO_x в ОГ дизельного двигателя при работе по газодизельному циклу значительно снижается по сравнению к жидкостному циклу. Данное снижение NO_x в ОГ с добавлением БГ меньше, чем на чистом ДТ на 7,65 % и 13,12 %, а с добавлением ПГ меньше на 11,4 % и 17,64 %. Уменьшение содержания оксидов азота NO_x в ОГ объясняется нахождением их эмиссии в непосредственной зависимости от количества незанятого кислорода в пламени [9].

Значение уровня диоксида углерода CO_2 в ОГ дизельного двигателя во всех вышеперечисленных точках нагрузки сопровождается ростом. Данный рост выбросов CO_2 при работе дизельного двигателя на смесевых составах 85 % ДТ + 15 % БГ и 70 % ДТ + 30 % БГ относительно его работы на ДТ составляет 7,02 % и 20,74 %. Соответственно для смесевых составов 85 % ДТ + 15 % ПГ и 70 % ДТ + 30 % ПГ этот рост составляет 3,4 % и 15,34 %.

Концентрация содержания оксидов углерода CO с ОГ несущественно растет по всему графику нагрузки. С содержанием БГ и ПГ в смесевых составах возрастает количество оксидов углерода в ОГ дизельного двигателя. Так, количество оксидов углерода CO в ОГ при работе двигателя на смесевых составах с добавлением БГ относительно работы двигателя на ДТ увеличивается на 19,15 %, и 38,71 %. А при работе двигателя на смесевых составах с добавлением ПГ эти значения возрастают на 9,52 % и 29,62 %. Данное обстоятельство можно разъяснить исходными составами газомоторных топлив, в нашем случае БГ и ПГ [12].

Количество выбросов углеводородов C_nH_m в ОГ двигателя уменьшается по всему графику роста нагрузки, но, повышая содержания БГ и ПГ в смесевых составах, относительно чистому ДТ, содержание выбросов углеводородов растет. Выбросы углеводородов, соответственно составляют 11,20 ppm при работе двигателя по жидкостному циклу и в точке нагрузки $p_e=0,85 \text{ МПа}$. Также выбросы углеводородов C_nH_m с ОГ при работе двигателя по газодизельному циклу с добавлением 15 % БГ и 30 % БГ в смеси составляют 13,07 ppm и 18,14 ppm в точках нагрузки $p_e=0,86 \text{ МПа}$ и $p_e=0,84 \text{ МПа}$. При добавке 15 % ПГ и 30 % ПГ выбросы углеводородов составляют 12,36 ppm и 16,02 ppm при нагрузке равной $p_e=0,87 \text{ МПа}$ и $p_e=0,83 \text{ МПа}$. Получается следующие, что в процентном отношении увеличение выбросов C_nH_m в ОГ в случае добавок БГ по отношению к чистому ДТ составил 14,37 % и 38,25 %, а с применением добавок ПГ этот рост составляет 9,38 % и 30,08 %. Это увеличение несгоревших углеводородов при работе двигателя на смесевых составах с применением БГ и ПГ можно объяснить количеством большого содержания трудно горящих частиц, в частности, это более относится к составу БГ.

Заключение

На основе анализа приведенных данных сформулируем следующие основные выводы:

1. Модернизирована экспериментальная установка и система питания дизеля, которые по своим техническим возможностям позволяют проводить моторные испытания по применению газового топлива в дизельных ДВС.

2. Эффективные показатели работы дизеля на указанных выше смесях показывают незначительное снижение мощности – на 3,10 %, 8,46 %, 1,98 %, 5,42 %, крутящего момента – на 8,36 %, 14,63 %, 4,15 %, 12,57 % и КПД – на 3,17 %, 5,29 %, 1,98 % и 4,37 %. Работа дизеля характеризуется увеличением удельного эффективного расхода теплоты смеси – на 53,69 %, 63,47 %, 34,1 %, 59,6 % и увеличением суммарно потребного количество теплоты, вводимой в цилиндры дизеля – на 4,05 %, 4,99 %, 1,76 % и 4,57 %.

3. Экологические показатели работы дизеля на указанных выше смесях характеризуются снижением выбросов с ОГ оксидов азота – на 7,65 %, 13,12 %, 11,5 %, 17,78 %, частиц сажи – на 18,86 %, 33,12 %, 25,68 %, 45,7 %, а также характеризуются несущественным увеличением выбросов с ОГ диоксида углерода – на 7,02 %, 20,74 %, 3,4 % и 15,34 %, оксидов углерода – на 19,15 %, 38,71 %, 9,52 %, 29,62 %, и углеводородов – на 14,37 %, 38,25 %, 9,38 % и 30,08 % соответственно.

ЛИТЕРАТУРА

1. Имад Саад С. Б. Разработка мероприятий по повышению эффективности использования биогаза в условиях Республики Судан: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / С.Б. Имад Саад. – М., 2007. – 188 л.

2. Новичков, М. Ю. Совершенствование рабочего процесса газодизеля: дис. ... канд. техн. наук: 05.04.02 / М. Ю. Новичков. – СПб., 2004. – 155 л.

3. Бганцев, В. Н. Газовый двигатель на базе четырехтактного дизеля общего назначения / В. Н. Бганцев, А. М. Левтеров, В. П. Мараховский // Техно-plus, 2003. – №10. – С. 74–75.

4. Газы горючие природные для промышленного и коммунально-бытового назначения. Технические условия: ГОСТ 5542-87. – Введ. 01.07.2015. – Москва: Стандартинформ, 2015. – 8 с.

5. 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.

6. Богданович, П. Ф. Природный газ или биомасса / П. Ф. Богданович // Сельское хозяйство – проблемы и перспективы: сб. науч. тр. – Гродно: УО ГГАУ, 2004. – Т. 3. – Ч. 4. – С. 89–92.

7. Система подачи газообразного топлива в дизель: пат. 9079 Респ. Беларусь, МПК F 02M 43/00 / А. Н. Карташевич, П. Ю. Малышкин, заявитель Белорус. гос. с-х. академия. № у 20120268; заявл. 05.09.2011; опубл.: 30.04.2013. // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2013. № 2 – С. 188.

8. Марков, В. А. Работа дизелей на нетрадиционных топливах / В. А. Марков, А. И. Гайворонский, Л. В. Грехов, Н. А. Иващенко // Учебное пособие. – М.: Изд-во «Легион-Автодата», 2008. – 464 с.

9. Образование и разложение загрязняющих веществ в пламени. Пер. с англ. / Под ред. Ю. Ф. Дитякина. – М.: Машиностроение, 1981. – 408 с.