

ПРИМЕНЕНИЕ БИО- И ПРИРОДНОГО ГАЗА В ДВС КАК АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ВИДОВ ТОПЛИВА

В. А. ШАПОРЕВ

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

(Поступила в редакцию 13.04.2020)

Целью данной статьи является исследование эффективных показателей работы дизельного двигателя 4ChN 11,0/12,5 (D-245.5S2) и показателей его токсичности и дымности по внешней скоростной характеристике на чистом дизельном топливе (ДТ), и на смесях 85 % ДТ + 15 % биогаза (БГ), 70 % ДТ + 30 % БГ, 85 % ДТ + 15 % природного газа (ПГ) и 70 % ДТ + 30 % ПГ при рациональном значении угла опережения впрыскивания топлива $\Theta_{оп.впр}=22^\circ$ до в.м.т. Данные исследования подтверждают целесообразность использования БГ и ПГ для решения проблем дефицита жидкого топлива, снижения эксплуатационных расходов, снижения уровня токсичности отработавших газов (ОГ).

По результатам данных исследований дизеля следуют основные выводы:

– эффективные показатели работы дизельного двигателя на смесях 85 % ДТ + 15 % БГ, 70 % ДТ + 30 % БГ, 85 % ДТ + 15 % ПГ и 70 % ДТ + 30 % ПГ показывают незначительное снижение мощности, крутящего момента и КПД, а также работа дизеля характеризуется увеличением удельного эффективного расхода теплоты смеси и увеличением суммарно потребного количества теплоты, вводимой в цилиндры дизеля;

– показатели токсичности и дымности дизельного двигателя по внешней скоростной характеристике на смешанных топливах, состоящих из 85 % ДТ + 15 % БГ, 70 % ДТ + 30 % БГ, 85 % ДТ + 15 % ПГ и 70 % ДТ + 30 % ПГ сопровождаются снижением выбросов с ОГ частиц сажи, оксидов азота и диоксида углерода, а также незначительным увеличением оксидов углерода и углеводородов.

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

The purpose of this article is to study the effective performance of diesel engine 4ChN 11.0/12.5 (D-245.5S2) and indicators of its toxicity and smoke content according to external speed characteristics on pure diesel fuel (DF), and mixtures of 85 % DF + 15 % biogas (BG), 70 % DF + 30 % BG, 85 % DF + 15 % natural gas (NG) and 70 % DF + 30 % NG with a rational value of the fuel injection advance angle $\Theta = 22^\circ$ to top dead center. These studies confirm the feasibility of using BG and NG to solve the problems of shortage of liquid fuel, reduce operating costs, reduce the level of toxicity of exhaust gases.

According to the results of these studies of diesel, the main conclusions follow:

– the effective performance of diesel engine on mixtures 85 % DF + 15 % BG, 70 % DF + 30 % BG, 85 % DF + 15 % NG and 70 % DF + 30 % NG show a slight decrease in power, torque and efficiency, and the operation of diesel engine is characterized by an increase in the specific effective consumption of mixture heat and an increase in the total required amount of heat introduced in diesel cylinders;

– indicators of toxicity and smokiness of diesel engine according to external speed characteristics on mixed fuels consisting of 85 % DF + 15 % BG, 70 % DF + 30 % BG, 85 % DF + 15 % NG and 70 % DF + 30 % NG are accompanied by a decrease in exhaust gases emissions of soot particles, nitrogen oxides and carbon dioxide, as well as a slight increase in carbon oxides and hydrocarbons.

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

Введение

Большая часть автотракторных двигателей работают на жидком топливе, которыми являются продукты перегонки нефти, в частности бензин и дизельное топливо.

В свою очередь автотракторная техника является серьезным источником загрязнения окружающей среды и создает угрозу экологической безопасности. Рост выбросов вредных веществ с отработавшими газами (ОГ) от автотракторной техники вызван не только увеличением их количества, так и ухудшением технического состояния, и низким уровнем технико-эксплуатационных показателей автомобилей, несоответствием требованиям стандартов, использованием низкокачественного моторного топлива. Поэтому тенденция роста выбросов вредных веществ с ОГ от автотракторной техники в ближайшие годы сохранится, но возможно и увеличится. Главным образом наибольшее воздействие автотракторная техника оказывает на атмосферный воздух городов, в связи с чем эта проблема является одной из самых актуальных и серьезнейших для всех городов мира [1–3].

Загрязнение воздуха выбросами вредных веществ ОГ автотракторной техники, вызывает риск потери здоровья у населения, при этом наибольшую опасность представляют выбросы вредных веществ ОГ канцерогенных (сажи, бензола, свинца, 1,3-бутадиена) и опасных органических веществ (формальдегида, акролеина, толуола, ксилолов) [4].

Надлежащим образом повышение цен на бензин и дизельное топливо, а также неэкологичность и исчерпаемость нефти подталкивает на применение недорогого и экологически чистого топлива, в ка-

честве которых могут выступать альтернативные газовые виды топлива, такие как природный газ, нефтяной газ, генераторный газ, биогаз и другие.

Природный газ представляет собой смесь различных веществ, но основную часть природного газа составляет метан от 70 до 98 % в его состав, также могут входить этан, бутан и другие газы, не являющиеся углеводородами (сероводород, диоксид углерода и др.). Качество и состав природного газа зависят от места добычи.

Биогаз представляет из себя смесь из 50–80 % метана, 20–50 % углекислого газа, до 1 % сероводорода и незначительных следов азота, кислорода и водорода, а также продуктов метанового брожения органических веществ растительного и животного происхождения, осуществляемого специфическим природным биоценозом анаэробных бактерий различных физиологических групп [5, 6].

Целью данной работы является исследование эффективных показателей работы дизельного двигателя и показателей его токсичности и дымности по внешней скоростной характеристике на смесях 85 % ДТ + 15 % БГ, 70 % ДТ + 30 % БГ, 85 % ДТ + 15 % ПГ и 70 % ДТ + 30 % ПГ при рациональном значении угла опережения впрыскивания топлива $\Theta_{оп.впр}=22^\circ$ до в.м.т. [7]. При проведении исследований ДТ замещалось БГ и ПГ в процентном отношении по величине суммарной вводимой в цилиндры дизеля теплоты, значение которой оставалось постоянным. Количество содержания БГ и ПГ, равное 15 % и 30 % было выбрано из условия наличия необходимого воздуха для обеспечения полноты процесса сгорания.

Основная часть

Экспериментальные исследования дизеля 4ЧН 11,0/12,5 (Д-245.5S2) проводились в научно-исследовательской лаборатории «Испытание двигателей внутреннего сгорания» УО БГСХА на кафедре «Тракторов, автомобилей и машин для агрообустройства».

Переоборудование двигателя внутреннего сгорания в газодизель целесообразно проводить на базе дизельных двигателей с высокой степенью сжатия. При этом возможно изменение показателей работы газодизеля вызвано различиями в физико-химических свойствах исследуемых топлив (табл. 1) [8, 9].

Таблица 1. Физико-химические свойства дизельного топлива, биогаза и природного газа

Физико-химические свойства	Топливо		
	ДТ	Биогаз (объемная доля, %)	Природный газ (объемная доля, %)
Формула состава	$C_{16,2}H_{28,5}$ (условная)	CH ₄ (61,2) CO ₂ (15...35) H ₂ (до 1) H ₂ S (до 1) Примеси (3)	CH ₄ (95,4) CO ₂ (1) N ₂ (до 1,5) Примеси (2,5)
Плотность при 20 °С, кг/м	830	1,16	0,809
Теплота сгорания, МДж/кг ³	42,5	17,92	50,1
Цетановое число	45	1	3
Температура самовоспламенения, °С	250	700	540
Количество воздуха, необходимое для сгорания 1 кг вещества, кг	14,35	6,9	17,2
Метановое число	–	123	100

Влияние БГ и ПГ в смесевых составах с ДТ на изменение эффективных показателей дизеля представлена на внешней скоростной характеристике (рис. 1).

Данный график показывает, что работа дизеля на смесях ДТ и БГ, а также ДТ и ПГ вызывает некоторое изменение его эффективных показателей. Так, кривые значений эффективного КПД снижаются в сравнении с аналогичной кривой для ДТ во всем диапазоне изменения частоты вращения коленчатого вала. Величина КПД при $n=1800 \text{ мин}^{-1}$ составляет $\eta_e=37,2\%$ для ДТ, а для случая смеси 85 % ДТ + 15 % БГ – $\eta_e=35\%$, и, наконец, $\eta_e=34,1\%$ для смеси 70 % ДТ + 30 %, соответственно для смесей 85 % ДТ + 15 % ПГ и 70 % ДТ + 30 % ПГ значение эффективного КПД составило $\eta_e=36,6\%$ и $\eta_e=34,7\%$. Следовательно, эффективный КПД дизеля понижается с ростом замещения чистого ДТ биогазом на 5,91 % и 8,1 %, а с ростом замещения ПГ на 1,61 % и 6,72 %.

Незначительное снижение эффективной мощности и крутящего момента дизеля с добавлением БГ и ПГ происходит по всему диапазону изменения частоты вращения коленчатого вала. При $n=1800 \text{ мин}^{-1}$ мощность дизеля, работающего только на ДТ, составляет $N_e = 68 \text{ кВт}$, а на смесях 85% ДТ + 15 % БГ и 70 % ДТ + 30 % БГ ее значение составляет $N_e = 67 \text{ кВт}$ и $N_e = 65 \text{ кВт}$, соответственно на смесях 85 % ДТ + 15 % ПГ и 70 % ДТ + 30 % ПГ значение мощности составляет $N_e = 67,6 \text{ кВт}$ и $N_e = 66,2 \text{ кВт}$. Непременно – мощность незначительно уменьшается с замещением ДТ в процентном от-

ношении на смесях с добавлением 15 % БГ и 30 % БГ на 1,47 % и 4,41 %, а на смесях с добавлением 15 % ПГ и 30 % ПГ на 0,58 % и 2,65 %.

Крутящий момент при $n=1800 \text{ мин}^{-1}$ дизельного двигателя, работающего на чистом ДТ, составляет $M_k=363 \text{ Н}\cdot\text{м}$ на смесях с добавлением 15 % БГ и 30 % БГ его значение составляет $M_k=354 \text{ Н}\cdot\text{м}$ и $M_k=344 \text{ Н}\cdot\text{м}$, а при добавлении 15 % ПГ и 30 % ПГ в смесях его значение составляет $M_k=359 \text{ Н}\cdot\text{м}$ и $M_k=350 \text{ Н}\cdot\text{м}$. Крутящий момент идет на уменьшение с замещением ДТ 15 % БГ и 30 % БГ на 2,47 % и 5,23 %, а с замещением ДТ 15 % ПГ и 30 % ПГ на 1,1 % и 3,58 %.

Несущественное снижение мощности, крутящего момента и эффективного КПД дизельного двигателя на смесях ДТ с БГ или с ПГ означает, что снизилась эффективность процесса сгорания (его скорость и полнота). Общее количество теплоты, вводимой в цилиндры дизеля, поддерживалось на одинаковом уровне, но вблизи ВМТ выделяется тепла меньше, дальше от ВМТ – больше. Количество тепла, выделяющегося вблизи ВМТ, как раз и определяет эффективность рабочего цикла.

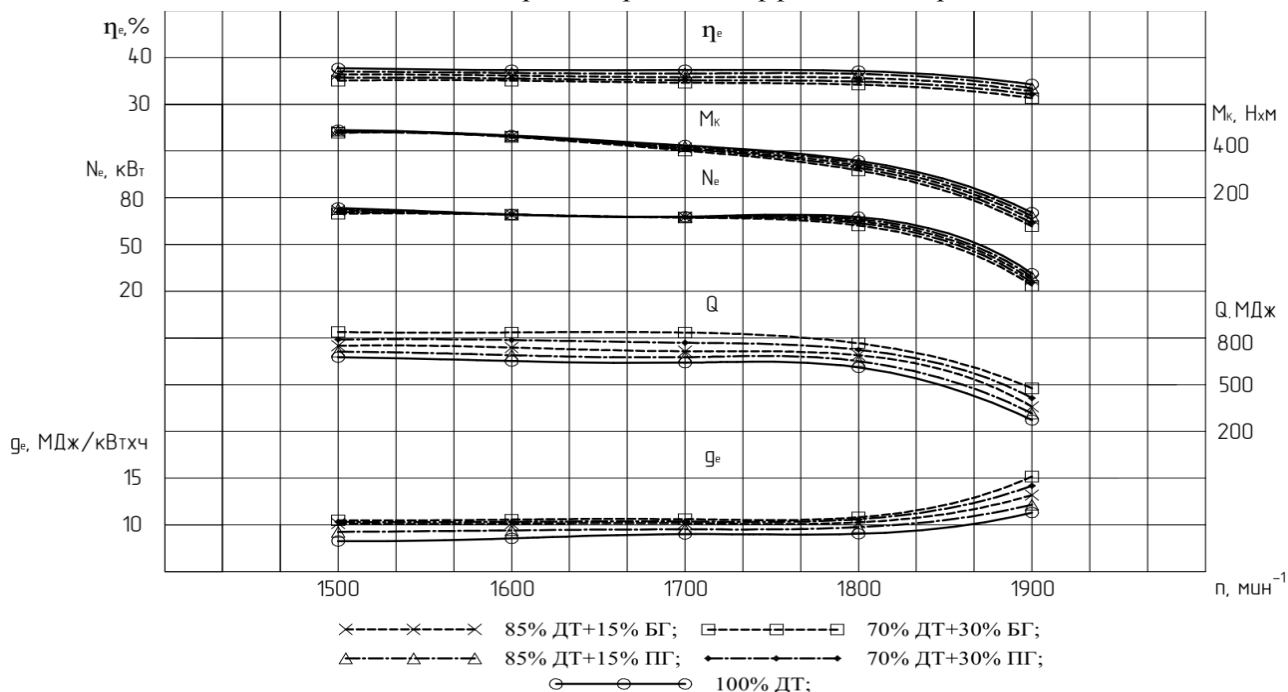


Рис. 1. Скоростная характеристика дизельного двигателя 4ЧН 11,0/12,5 при рациональном значении угла опережения впрыскивания топлива $\Theta_{оп.впр}=22^\circ$ до в.м.т.

Вид изменения необходимого значения вводимой теплоты Q в цилиндры дизеля иллюстрируется её ростом по всему диапазону изменения частоты вращения. Значения теплоты Q при $n=1800 \text{ мин}^{-1}$ для ДТ и смесей 85 % ДТ + 15 % БГ и 70 % ДТ + 30 % БГ составляют $Q=616,25 \text{ МДж}$, $Q=695,94 \text{ МДж}$ и $Q=738,08 \text{ МДж}$, равным образом для смесей 85 % ДТ + 15 % ПГ и 70 % ДТ + 30 % ПГ составляет $Q=649,4 \text{ МДж}$ и $Q=714,66 \text{ МДж}$. Теплоты Q , вводимой в цилиндры дизеля при работе на смесях 85 % ДТ + 15 % БГ, 70 % ДТ + 30 % БГ, 85 % ДТ + 15 % ПГ и 70 % ДТ + 30 % ПГ, необходимо больше, чем для работы на чистом ДТ на 12,93 %, 19,77 %, 5,37 % и 15,96 %.

За исключением того, из графика (рис. 1) видно, что при работе дизельного двигателя на чистом ДТ значение удельного эффективного расхода теплоты g_e значительно меньше, чем на смешевых топливах с добавлением 15 % БГ, 30 % БГ, 15 % ПГ и 30 % ПГ. Так, при $n=1800 \text{ мин}^{-1}$ и работе на чистом ДТ удельный эффективный расход теплоты составляет $g_e= 9,00 \text{ МДж/кВт}\cdot\text{ч}$, для смесей с добавлением 15 % БГ и 30 % БГ его значения равны $g_e= 10,44 \text{ МДж/кВт}\cdot\text{ч}$ и $g_e= 10,61 \text{ МДж/кВт}\cdot\text{ч}$, а для смесей с добавлением 15 % ПГ и 30 % ПГ его значения равны $g_e= 9,65 \text{ МДж/кВт}\cdot\text{ч}$ и $g_e= 10,52 \text{ МДж/кВт}\cdot\text{ч}$. В отношении к ДТ, этот рост равен 16 % и 17,88 %, соответственно, для смесей с добавлением 15 % БГ и 30 % БГ, а также 7,22 % и 16,8 %. Имеющиеся увеличение удельного эффективного расхода теплоты и общего потребного количества теплоты, вводимой в цилиндры дизельного двигателя объясняется меньшим значением низшей расчетной теплоты сгорания БГ и ПГ и замедлением скорости его сгорания по отношению к ДТ.

Влияние применения смесей, состоящих из 85 % ДТ + 15 % БГ, 70 % ДТ + 30 % БГ, 85 % ДТ + 15 % ПГ и 70 % ДТ + 30 % ПГ на экологические показатели работы дизельного двигателя 4ЧН 11,0/12,5 по внешней скоростной характеристике представлены на рис. 2.

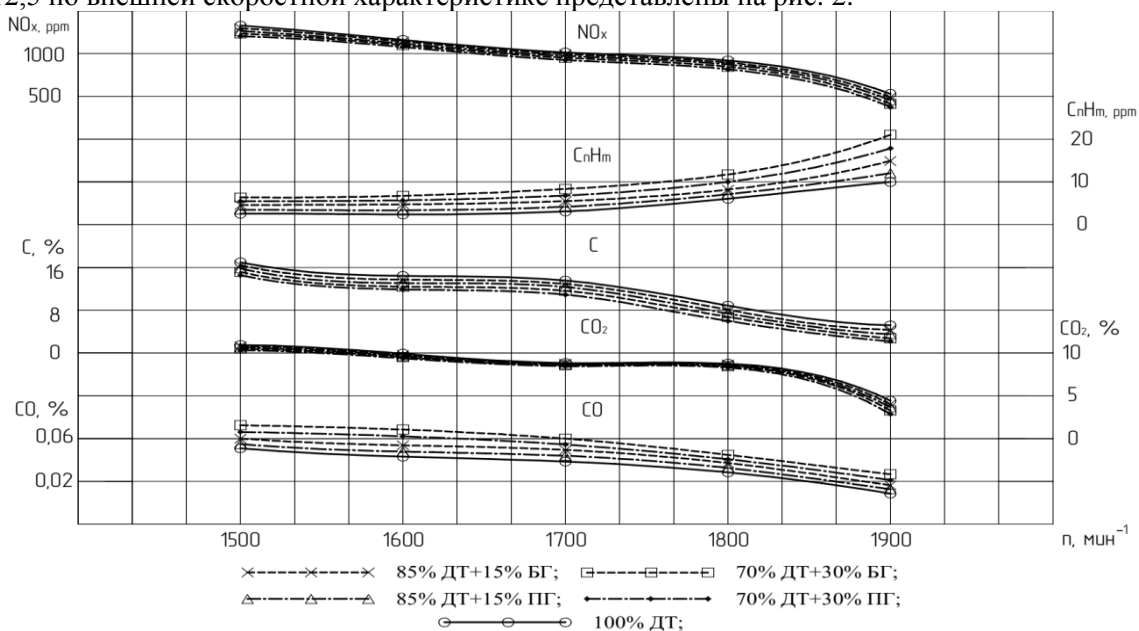


Рис. 2. Показатели токсичности и дымности дизельного двигателя 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от частоты вращения коленчатого вала при рациональном значении угла опережения впрыскивания топлива $\Theta_{оп.впр}=22^\circ$ до в.м.т.

В результате экспериментальных исследований было выявлено, что добавление 15 % БГ, 30 % БГ, 15 % ПГ и 30 % ПГ в ДТ приводит к уменьшению количества оксидов азота NO_x и диоксида углерода CO_2 в ОГ дизеля 4ЧН 11,0/12,5. При номинальной частоте вращения коленчатого вала двигателя $n=1800 \text{ мин}^{-1}$ и работе на чистом ДТ содержание оксидов азота NO_x составляет 909 ppm, а для смесей 85 % ДТ + 15 % БГ, 70 % ДТ + 30 % БГ, 85 % ДТ + 15 % ПГ и 70 % ДТ + 30 % ПГ эти значения равны 889 ppm, 876 ppm, 881 ppm и 859 ppm. То есть, содержание оксидов азота NO_x в ОГ дизеля при его работе на смесях с добавлением 15 % БГ, 30 % БГ, 15 % ПГ и 30 % ПГ меньше, чем при работе на чистом ДТ на 2,2 %, 3,63 %, 3,1 % и 5,5 %. Выбросы диоксида углерода CO_2 с ОГ незначительно уменьшаются с ростом замещения чистого ДТ на БГ или ПГ, что в процентном соотношении составляет 1,2 % и 11 % для смеси 15 % БГ и 30 % БГ с ДТ, также снижение составляет 4,8 % и 15,2 % для смеси 15 % ПГ и 30 % ПГ с ДТ. 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 [10]. Снижение локальной и средней температуры цикла в случае работы дизеля на смесях с БГ непосредственно обуславливает снижение эмиссии оксидов азота.

С увеличением частоты вращения коленчатого вала содержание сажи С в ОГ также снижается. В частности, при $n=1800 \text{ мин}^{-1}$ уровень сажи в ОГ дизеля, работающего на чистом ДТ составляет $S=8,8\%$, а при работе дизеля на смесях 85 % ДТ + 15 % БГ и 70 % ДТ + 30 % БГ и той же частоте вращения коленчатого вала выбросы сажи составляют $S=7,4\%$ и $S=6,3\%$, а для смесей 85 % ДТ + 15 % ПГ и 70 % ДТ + 30 % ПГ выбросы сажи составляют $S=6,9\%$ и $S=5,8\%$, т. е., с увеличением БГ и ПГ в смесевых составах с ДТ содержание сажи снижается на 15,9 % и 28,4 % для БГ, и на 21,6 % и 34,1 % для ПГ. Данное снижение сажи объясняется тем, что ее образование зависит от свойств топлива. Также чем выше молекулярный вес предельных и непредельных углеводородов с прямыми цепями, тем выше скорость образования сажевых частиц. Молекулярный вес предельных и непредельных углеводородов БГ и ПГ значительно ниже чем у ДТ, таким образом следует снижение частиц сажи с выбросами ОГ [10].

Анализируя результаты замера выбросов оксида углерода СО и углеводородов C_nH_m видно, что данные показатели изменяются с увеличением количества БГ или ПГ в смесевых составах и с увеличением частоты вращения коленчатого вала. На номинальном режиме $n=1800 \text{ мин}^{-1}$ при работе на смесях 85 % ДТ + 15 % БГ и 70 % ДТ + 30 % БГ выбросы СО в процентном отношении к ДТ увеличиваются на 33,3 % и 46,4 %, соответственно при работе на смесях 85 % ДТ + 15 % ПГ и 70 % ДТ + 30 % ПГ выбросы СО увеличиваются на 26,4 % и 38,5 %. Выбросы углеводородов C_nH_m с ОГ увеличиваются на 8,3 % и 66,4 % при работе дизеля на смесевых составах с добавлением 15 % БГ и

30 % БГ относительно при работе на чистом ДТ, а с добавлением 15 % ПГ и 30 % ПГ это соотношение составляет 6,6 % и 48,92 %. Рост выбросов несгоревших углеводородов при работе дизеля с добавками БГ можно объяснить наличием в последнем многочисленных плохо горящих компонентов, а также малым избытком свободного кислорода, необходимого для окисления в частности с добавлением в смеси ПГ. Рост выбросов оксида углерода СО объясняется снижением коэффициента избытка воздуха в топливовоздушной смеси, снижением наличия свободного кислорода [11].

Смеси, содержащие ПГ сопровождаются значительным преимуществом относительно смесям, содержащим БГ, данное обстоятельство объясняется большей долей содержания метана и цетанового числа ПГ относительно БГ (табл. 1).

Заключение

Эффективных показателей работы дизельного двигателя 4ЧН 11,0/12,5 (Д-245.5S2) и показателей его токсичности и дымности по внешней скоростной характеристике на смесях 85 % ДТ + 15 % БГ, 70 % ДТ + 30 % БГ, 85 % ДТ + 15 % ПГ и 70 % ДТ + 30 % ПГ при рациональном значении угла опережения впрыскивания топлива $\Theta_{оп.впр}=22^\circ$ до в.м.т., подтверждают целесообразность использования биогаза и природного газа для решения проблем дефицита жидкого топлива и моторного масла, снижения эксплуатационных расходов, снижения уровня токсичности отработавших газов.

Анализ данных исследований, позволяет сделать следующие выводы относительно работы дизеля на чистом дизельном топливе:

– эффективные показатели работы дизеля на данных смесях показывают незначительное снижение мощности на 1,47 %, 4,41 %, 0,58 %, 2,65 %, крутящего момента на 2,47 %, 5,23 %, 1,1 %, 3,58 % и КПД на 5,91 %, 8,1 %, 1,61 % и 6,72 %, а также работа дизеля характеризуется увеличением удельного эффективного расхода теплоты смеси на 12,93 %, 19,77 %, 5,37 %, 15,96 % и увеличением суммарно потребного количество теплоты, вводимой в цилиндры дизеля на 16 %, 17,88 %, 7,22 % и 16,8 %;

– экологические показатели сопровождаются снижением выбросов с ОГ частиц сажи на 15,9 %, 28,4 %, 21,6 %, 34,1 %, оксидов азота на 2,2 %, 3,63 %, 3,1 %, 5,5 % и диоксида углерода на 1,2 %, 11 %, 4,8 % и 15,2 %, а также незначительным увеличением оксидов углерода на 33,3 %, 46,4 %, 26,4 %, 38,5 % и углеводородов на 8,3 %, 66,4 %, 6,6 % и 48,92 %.

Данные преимущества использования биогаза и природного газа в качестве альтернативного топлива для дизелей, перекрывает все незначительные недостатки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Карташевич, А. Н. Применение этанолсодержащих топлив в дизеле. Часть I: монография / А. Н. Карташевич, С. А. Плотников, Г. Н. Гурков – Киров: Типография «Авангард», 2011. – 116 с.
2. Работа дизелей на нетрадиционных топливах: Учебное пособие / В. А. Марков [и др.]. – М.: Изд-во «Легион-Автодата», 2008. – 464 с.
3. Плотников, С. А. Система питания генераторным газом ДВС и установка для его осуществления. Проблемы эксплуатации автомобильного транспорта и пути их решения на основе современных информационно-коммуникационных технологий. Сб. науч. тр. по мат. заоч. науч.-практ. конф. / С. А. Плотников, А. С. Зубакин, А. Н. Коротков. – Воронеж, 2015. – С. 66–69.
4. Альтернативные виды топлива для двигателей: монография / А. Н. Карташевич [и др.]. – Горки, БГСХА, 2013. – 376 с.
5. Кавтарадзе, Р. З. Теплофизические процессы в дизелях, конвертированных на природный газ и водород / Р. З. Кавтарадзе. – Московский гос. техн. ун-т им. Н. Э. Баумана. – М., 2011. – 238 с.
6. Kartashevich A. N. Flammability of New Diesel Fuels. / S. A. Plotnikov // Russian Engineering Research, 2018, Vol. 38, No. 6, pp. 424–427.
7. Карташевич, А. Н. Определение рациональных регулировок дизеля 4ЧН 11,0/12,5 для работы на смесях дизельного топлива с биогазом. // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. / А. Н. Карташевич, В. А. Шаповалов, С. А. Плотников – 2019. – № 1. – С. 149–153.
8. Работа дизелей на нетрадиционных топливах: учебное пособие / В. А. Марков [и др.]. – М.: Изд-во «Легион-Автодата», 2008. – 464 с.
9. Васильев, Ю. Н. Газовые и газодизельные двигатели / Ю. Н. Васильев, Л. С. Золотаревский, С. И. Ксенофонов. – М: РАО «Газпром». 1992. – 127 с.
10. Гуреев, А. А. Исследование влияния свойств топлива на сажеобразование / А. А. Гуреев, В. З. Малахов, М. М. Ховак. – Тр. МАДИ, 1975, Автотракторные двигатели внутреннего сгорания, Вып. 92. – С. 29–38.
11. Образование и разложение загрязняющих веществ в пламени. Пер. с англ. / Под ред. Ю. Ф. Дитякина. – М.: Машиностроение, 1981. – 408 с.