УДК 621.43-545.2:303.447.3

DOI: 10.35887/2305-2538-2020-6-70-80

**МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ПО ВЛИЯНИЮ СОСТАВА И КАЧЕСТВА ВОДНО-ДИЗЕЛЬНОЙ СМЕСИ
НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ**¹Канищев Александр Сергеевич²Сазонов Сергей Николаевич¹Томилов Александр Анатольевич¹Ломовских Александр Егорович¹Борисов Сергей Владимирович¹Рябчук Алексей Сергеевич¹ФГКВОУ ВО «ВУНЦ ВВС «ВВА им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»²ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт

использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве»

Реферат: В статье описывается методика проведения экспериментальных исследований по влиянию состава и качества водно-дизельной смеси на эксплуатационные показатели дизельного двигателя внутреннего сгорания марки ЯМЗ-236. Исследуются и моделируются процессы влияния состава и качества водно-дизельной смеси без применения эмульгатора на эксплуатационные показатели дизельного двигателя ЯМЗ-236, а также процесс получения «грубых» и «тонких» дизельных смесей на аппаратах статического и динамического принципа действия. Проводятся экспериментальные исследования по определению диаметра капель водной фазы в водно-дизельной смеси. Разрабатываются способ и устройства (роторно-пульсационный аппарат для приготовления «тонкой» смеси и струйно-кавитационный эжектор) для приготовления «грубой» водно-дизельной смеси, которые входят в основу модернизированной системы питания двигателя ЯМЗ-236. Проводятся стендовые испытания двигателя ЯМЗ-236 с применением разработанных устройств по определению эксплуатационных показателей данного двигателя.

Проведенные в рамках данной работы эксперименты показали, что при введении водной фазы до 17 – 20 % по отношению к объёму топлива и при диаметрах капель воды в данной водно-дизельной смеси до 2 мкм, происходит снижение удельного расхода топлива на 10 – 28 %, содержания сажи в ОГ ДВС по значению K на 20 – 22%, по значению N на 30 – 35%.

Ключевые слова: дизельные двигатели внутреннего сгорания, система питания, водно-дизельная смесь, эксплуатационные показатели двигателя, автотракторная техника, состава и дисперсность дизельной смеси, содержание сажи.

**EXPERIMENTAL RESEARCH PROCEDURE BY THE INFLUENCE OF THE COMPOSITION
AND QUALITY OF THE WATER-DIESEL MIXTURE ON DIESEL ENGINE PERFORMANCE**¹Kanishchev Alexandr²Sazonov Sergey¹Tomilov Alexander¹Lomovskikh Alexandr¹Borisov Sergey¹Ryabchuk Alexey¹MERC “Air Force Academy Professor N.E. Zhukovsky and Major Y.A. Gagarin”²FSBSI “All-Russian Research Institute for Use of Machinery and Petroleum Products in Agriculture”

Abstract: The method of conducting experimental studies on the influence of the composition and quality of a water-diesel mixture on the performance indicators of a diesel internal combustion engine of the YaMZ-236 brand is described in the article. The processes of the influence of the composition and quality of a water-diesel mixture without the use of an emulsifier on the performance of the YAMZ-236 diesel engine, as well as the process of obtaining “rough” and “thin” diesel mixtures on static and dynamic devices are studied and modeled. Experimental studies are conducted to determine the diameter of water phase droplets

in a water-diesel mixture. A method and devices are being developed (a rotary-pulsating apparatus for preparing a "thin" mixture and a jet-cavitation ejector) for preparing a "rough" water-diesel mixture, which are the basis of the upgraded power supply system for the YAMZ-236 engine. Bench tests of the YAMZ-236 engine are carried out using developed devices for determining the performance indicators of this engine. Experiments carried out in the framework of this work have shown that when the water phase is introduced up to 17 – 20 % relative to the fuel volume and with the diameter of water droplets in this water-diesel mixture up to 2 microns, the specific fuel consumption decreases by 10 – 28 %, the soot content in the exhaust gas of the internal combustion engine by the K value by 20 – 22 %, and by the N value by 30 – 35 %.

Keywords: diesel internal combustion engines, power system, water-diesel mixture, engine performance indicators, automotive equipment, composition and dispersion of diesel mixture, soot content.

Введение. В настоящее время постоянная модернизация используемых двигателей внутреннего сгорания (ДВС) является существенной частью научных и технико-технологических работ, направленных на повышение эффективности использования энергетических ресурсов страны. Совершенствование ДВС – это увеличение их технико-экономических показателей, улучшение их экологических показателей прежде всего за счет уменьшения токсичности отработавших газов (ОГ).

В агропромышленном комплексе безусловное лидерство принадлежит дизельным ДВС. В силу компактности, экономичности и малой удельной массе (кг/кВт) именно они преобладают среди силовых установок тракторов, грузовых автомобилей и различных сельскохозяйственных комбайнов.

В интересах улучшения эксплуатационных характеристик автотракторной техники (АТТ) целесообразно модернизировать систему питания дизельных ДВС с целью возможности использования альтернативного топлива – различных дизельных смесей (ДС). Приоритетным направлением в этой области являются ДС с добавлением компонента на основе воды и без использования дорогостоящего эмульгатора. Топливные смеси с применением эмульгаторов уже долгое время используются по всему миру. Однако до настоящего времени должным образом не исследованы методы использования указанного компонента без привлечения дорогих эмульгаторов. Остается открытым вопрос о том, какое влияние оказывают подобного рода смеси, в зависимости от своего состава и дисперсности, на топливно-экономические и экологические показатели ДВС [1].

Цель работы – заключается в разработке методики проведения экспериментальных исследований по влиянию состава и качества водно-дизельной смеси (приготавливаемой без эмульгатора) на эксплуатационные показатели ДВС.

Материалы и методы. Для проведения экспериментальных исследований по влиянию состава и качества водно-дизельной смеси на эксплуатационные показатели двигателя внутреннего сгорания (ДВС), необходимо разработать методику по их проведению.

Разработанная методика проведения экспериментальных исследований представляет собой совокупность последовательных этапов заключающихся:

- в определении рациональной конструкции аппарата динамического принципа действия для приготовления водно-дизельной смеси (ВДС) и режима его работы, который позволит получать ВДС необходимого состава и дисперсности, обеспечивающую работу ДВС в соответствии с техническим паспортом завода-изготовителя;
- в разработке способа приготовления ВДС и устройств для его реализации, позволяющих получать на борту автотракторной техники (АТТ) высокодисперсную ВДС необходимого состава, дисперсности и подавать её в штатную систему питания дизельного ДВС без существенного изменения ее конструкции;
- в определении эксплуатационных показателей дизельного ДВС в зависимости от состава и дисперсности ВДС с водным компонентом без применения эмульгатора при проведении минимального числа опытов с максимально возможным сочетанием исследуемых характеристик на основе полного факторного эксперимента.

Экспериментальные исследования на первом этапе заключаются в выборе рациональной конструкции аппаратов, которые позволят получать ВДС необходимого состава и дисперсности, пригодную для использования в ДВС, а также режимов их работы. На основе предварительно

проведенных экспериментальных исследований был разработан и сконструирован динамический роторно-пульсационный аппарат (РПА). Затем разрабатывается система приготовления и подачи ВДС в ДВС на основе ранее проведенных экспериментальных исследований, которая позволяет получать высокодисперсную ВДС необходимого состава и дисперсности. При этом ее использование в традиционной системе питания ДВС происходит без существенного изменения ее конструкции.

Далее определяется зависимость эксплуатационных показателей дизельного ДВС ЯМЗ-236 от состава и дисперсности ВДС с водным компонентом без применения эмульгатора. Сущность данных экспериментальных исследований заключается в проведении минимального числа экспериментов с максимально возможным сочетанием значений исследуемых факторов.

Экспериментальные исследования проводились на разработанной экспериментальной установке №1, которая была сконструирована и изготовлена в научно-исследовательской лаборатории ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж). Внешний вид данной установки представлен на рисунке 1.

- 1 – система охлаждения ДВС; 2 – смесительная ёмкость для ВДС; 3 – запорная игла;
 4 – термометр; 5 – насос; 6 – электрический насос; 7 – манометр; 8 – поплавок; 9 – трубка сброса;
 10 – соединительные трубопроводы; 11 – расходомер; 12 – микроскоп;
 13 – штатный топливный насос ДВС; 14 – электромагнитные клапаны;
 15 – фильтрующий элемент; 16 – жиклер; 17 – трубка забора ВДС с глубины 0,85h;
 18 – секундомер; 19 – ёмкость с водой; 20 – ДВС; 21 – РПА; 22 – газоанализатор;
 23 – ёмкость для топлива; 24 – вакуумная трубка; 25 – дозатор-смеситель;
 26 – впускной коллектор ДВС; 27 – кран подачи жидкости

Рисунок 1 – Принципиальная схема экспериментальной установки № 1

В процессе приготовления ВДС на экспериментальной установке №1 смешиваемые компоненты (дизельное топливо и вода) дозируются в нужной пропорции дозатором смесителем 25 и полученная грубая ВДС сливается в смесительную емкость 2. Температура ВДС задается в ранее обоснованных пределах 50 – 60 °С на основании работы [2, 3] путем нагрева воды в емкости 19 и ВДС в емкости 2 с последующим её поддержанием в указанных пределах. Изменение входного давления в РПА осуществляется переключением насосов, развивающих в исследуемом диапазоне рабочее давление. Процесс смешивания организовывается по циклическому, замкнутому принципу с целью получения однородной и стабильной ВДС, заданной дисперсности при установленной дозировке воды в дизельном топливе.

Экспериментальные исследования на установке №1 при определении эксплуатационных (расхода топлива, содержание сажи) показателей ДВС проходили по положениям, изложенным в ГОСТ 14846-81, ГОСТ Р 52408-2005, ГОСТ Р 52033-2003 [4 – 6]. Испытания проходили при температуре воздуха -10 – +25, его относительной влажности $36\% \leq \varphi \leq 50\%$; атмосферном давлении $750 \leq P_a \leq 760$ мм. рт. ст. При этом само топливо на входе имело температуру (Т) от 20 °С до 25 °С. Температурные параметры смазочно-охлаждающих компонентов находились в интервалах, оговоренных техническими условиями ДВС.

Во время экспериментов двигателя АТТ были технически исправными, укомплектованными, заправлены горючими и смазочными материалами в соответствии с нормативно-технической документацией.

Контроль технологических режимов приготовления ВДС и режимов работы экспериментальной установки №1 осуществлялся с помощью обоснованно выбранных средств измерений (таблица 1) на основании требований, изложенных в ГОСТ 14846-81, ГОСТ Р 52408-2005, ГОСТ Р 52033-2003, ГОСТ 20306-1990, ГОСТ 22576-1990 ГОСТ Р 51249-99 [7 – 12].

Таблица 1 – Перечень применяемых при исследовании средств измерений

№ п/п	Наименование прибора	Фиксируемый параметр	Единица измерения	Диапазон измерения	Погрешность измерения, %
1	Термометр стеклянный (ГОСТ 2405-80)	температура	°С	0 ÷ 200	± 1
2	Преобразователь электрический (ГОСТ 5072-79)	напряжение	В	0 ÷ 300	± 1
3	Тахометр контактный типа МЕГЕОН-18002 (ГОСТ 18303-72)	частота вращения	об/мин	0 ÷ 10000	± 5
4	Вольтметр универсальный В7-47 (ГОСТ 17.2.205-86)	напряжение	В	0 ÷ 250	± 1
5	Механический манометр «Джилекс» (ГОСТ 2405-80)	давление	МПа	0 ÷ 0,1	± 1
6	Секундомер ПВ-53А (ГОСТ 5072-79)	время	сек.	0 ÷ ∞	± 1
7	Расходомер VZO 4-RE (ГОСТ 11988-81)	расход топлива	л/ч	5 ÷ 100	± 1,5
8	Газоанализатор АВТОТЕСТ-01.04М (ГОСТ 17.2.205-86)	частота вращения	об/мин	0 ÷ 8000	± 2,5
		СО	%	0 ÷ 7	± 0,2
		дымность	%	0 ÷ 100	± 2

В ходе испытаний на установке №1 выявлялось влияние состава и дисперсности ВДС на эксплуатационные показатели ДВС в зависимости от варьирования указанных ниже входных (управляемых) факторов, определяющих рецептуру и технологические режимы приготовления ВДС: содержание водной фазы в топливной среде C_w , %; диаметр капель водной фазы в ВДС d_k , мкм; угол опережения впрыска топлива $\theta_{в.т.}$, °. На установке №1 фиксировались указанные параметры: удельный расход топлива ДВС g_e , г/кВт ч; N – диапазон измерения дымности в единицах коэффициента ослабления, %; K – диапазон измерения дымности в единицах коэффициента поглощения, м⁻¹.

Установка №1 может работать в двух режимах: приготовление ВДС, подача обычного дизельного топлива. В ходе эксперимента приготавливается последовательно в установленной

пропорции (воды от 5 до 50 % в дизельном топливе) с интервалом испытания 5 %, которая подается автоматически с помощью насоса 5 в дозатор 25 из ёмкости под воду 19 и из ёмкости под топливо 23. Затем включается электрический насос 6, который подает этот состав в РПА 21. При этом приготовленная смесь проходит через РПА, после чего в ёмкость 2 поступает уже готовая ВДС.

Частота вращения ротора задается с учетом получения рациональной дисперсности ВДС. Давление на входе и выходе в РПА контролируется механическим манометром 7. Температура в ёмкости 2 регулируется в диапазоне 50 – 60 °С за счет изменения подачи краном 27 жидкости из системы питания ДВС. Полученная ВДС подавалась штатным топливным насосом 13 через трубку забора ВДС 17 в систему питания ДВС. Отработавшие газы ДВС 20 проходят через газоанализатор 22, по которому определяется содержание сажи.

Испытания на экспериментальной установке №1 на первом этапе последовательно включали: цикл режима работы двигателя при частоте вращения холостого хода; цикл режима работы двигателя при максимальном крутящем моменте.

Оценка эффективности применения ВДС в ДВС осуществлялась по следующим параметрам: величине часового расхода топлива; изменению содержания сажи в отработавших газах при эксплуатации двигателя на ВДС и без неё. Время работы двигателя контролировалось секундомером ПВ-53А, тепловой режим ДВС и ВДС – стандартными термометрами. Проведенные измерения по определению содержания сажи осуществлялись согласно требованиям ГОСТ 17.2.2.06-99. Проведение эксплуатационных испытаний осуществлялось согласно требованиям. Подготовка и условия проведения испытаний АТТ по определению расхода топлива при эксплуатационных испытаниях производилось согласно [13].

Расчет предельной относительной погрешности часового расхода топлива при обработке экспериментальных исследований выполнялся с использованием следующих формул:

$$G_T = \frac{3,6 \times m_T}{t} \text{ (кг/ч)} \quad , \quad (1)$$

$$\delta(G_T) = \sqrt{\delta(m_T)^2 + \delta(t)^2} = \sqrt{0,67^2 + 0,17^2} = 0,69\% \quad . \quad (2)$$

где m_T – масса израсходованного топлива, кг; t – время работы ДВС, с.

Следовательно, погрешность полученных экспериментальных данных не выходила за рамки параметров, обоснованных в работах [14], а совокупная погрешность по всем производимым измерениям не превышает $\pm 5 - 10 \%$.

Результаты и их обсуждение. Целью проведенных исследований является сравнительный анализ эксплуатационных показателей базового дизельного ДВС ЯМЗ-236 и его усовершенствованного образца с модернизированной системой питания на основе ВДС с добавлением воды. В качестве эксплуатационного показателя ДВС (в соответствии с требованиями ГОСТ 14846-81) устанавливается удельный расход топлива, который является показателем топливной экономичности ДВС. В качестве экологических показателей ДВС (согласно требованиям ГОСТ 51249-99, ГОСТ Р 52033-2003, ГОСТ 52408-2005) устанавливаются предельно допустимые значения содержания сажи в ОГ ДВС.

Замеры производились с использованием двухкомпонентного газоанализатора «АВТОТЕСТ», представленного на рисунке 2, с помощью которого определялась дымность отработавших газов на режиме свободных ускорений и максимальных оборотов.

1 – газоанализатор «АВТОТЕСТ»; 2 – зонд газоанализатора в выпускном коллекторе

Рисунок 2 – Результаты замера дымности двигателя ДВС

При проведении стендовых испытаний на ДВС ЯМЗ-236 [15] все указанные показатели фиксировались при работе двигателя под нагрузкой при различных частотах вращения коленчатого вала. В процессе испытаний двигатель ЯМЗ-236 находился в исправном состоянии и в комплектности соответствующей инструкции по эксплуатации завода-изготовителя. Испытания двигателя при использовании модернизированной системы питания производились в диапазоне частот вращения от минимально устойчивой частоты вращения холостого хода до равной 60 % от $n_{ном}$.

Для оценки влияния ВДС в соответствии с планом ПФЭ, изложенным в работах [16, 17], проведены соответствующие исследования. Всего было проведено двадцать экспериментов, каждый в трехкратной повторности. Смысл этих экспериментальных исследований состоял в установлении влияния трех факторов (содержания водной фазы в топливе C_e (%), диаметра капель водной фазы в ВДС d_k (мкм), угла опережения впрыска топлива $\theta_{e.m.}$ 1^0 на удельный расход топлива и содержания сажи в ОГ ДВС.

В итоге удалось установить зависимость удельного расхода топлива (g_e , г/кВт ч), диапазона измерения дымности в единицах коэффициента поглощения K (м^{-1}), диапазона измерения дымности в единицах коэффициента ослабления (N , %), от рассматриваемых факторов: x_1 – содержания водной фазы в топливе (C_e), x_2 – диаметра капель водной фазы в ВДС (d_k), x_3 – угла опережения впрыска топлива в ДВС ($\theta_{o.з.}$).

После аналитической обработки полученных данных построены следующие регрессионные зависимости второго порядка, где факторы представлены в кодированном виде:

$$Y_{g_e} = 6,99 - 0,15 x_1 + 0,8 x_2 + 0,39 x_3 - 0,02 x_1 x_2 - 0,08 x_1 x_3 + 0,02 x_2 x_3 + 0,07 x_1^2 + 0,03 x_2^2 + 0,02 x_3^2; \quad (3)$$

$$Y_K = 3,4 - 0,23 x_1 + 0,12 x_2 - 0,11 x_3 - 0,06 x_1 x_2 - 0,44 x_1 x_3 - 0,03 x_2 x_3 - 0,01 x_1^2 + 0,04 x_2^2 + 0,01 x_3^2; \quad (4)$$

$$Y_N = 69,02 - 8,16 x_1 + 2,21 x_2 - 2,1 x_3 - 0,35 x_1 x_2 - 0,98 x_1 x_3 + 1,46 x_2 x_3 - 0,89 x_1^2 + 1,05 x_2^2 + 0,93 x_3^2. \quad (5)$$

При анализе уравнений (3...5) следует учитывать, что знак «+», «-» и значение коэффициента, предопределяет соответственно увеличение или уменьшение значения фактора (Y_{g_e} , Y_K , Y_N).

Отрицательные значения коэффициентов уравнений (3 – 5) при факторе x_1 позволяют утверждать, что рост процентного содержания водного компонента в дизельном топливе ведет и к снижению удельного расхода топлива, и к снижению содержания сажи в ОГ ДВС.

При факторе x_3 в уравнениях (3, 4) – что с увеличением угла опережения впрыска топлива в ДВС в изучаемом диапазоне происходит снижение количества сажи в ОГ ДВС.

Положительные значения коэффициентов уравнений регрессии (3 – 5) при факторе x_2 свидетельствуют о том, что с увеличением диаметра капли воды в ВДС увеличивается удельный расход топлива, содержание сажи в ОГ ДВС. При факторе x_3 в уравнение (3) – что с увеличением угла опережения впрыска топлива в ДВС в изучаемом диапазоне происходит увеличение удельного расхода дизельного топлива двигателем.

Существенное влияние на значения g_e оказывает фактор x_2 , то есть дисперсность ВДС или размеры капель воды. Существенное влияние на значения N и K оказывает фактор x_1 , то есть количество водной фазы, содержащейся в ВДС.

Значимость коэффициентов в полученных уравнениях оценена по критерию Стьюдента, а адекватность зависимости в целом – по критерию Фишера. Анализ результатов проверки свидетельствует, что полученные зависимости адекватно отражают влияние на эксплуатационно-экологические показатели ДВС состава и дисперсности ВДС.

Для оценки адекватности теоретических моделей с данными, полученными в результате проведенных испытаний, проведен расчет по полученным формулам с использованием зафиксированных экспериментальных данных x_1 , x_2 , x_3 в условном масштабе для каждого испытания.

Сравнительный анализ результатов позволил установить, что расхождение теоретических и экспериментальных данных по удельному расходу топлива – g_e и содержанию сажи в ОГ ДВС не превышает 10 %.

На рисунке 3 представлены совместно графики, отражающие зависимость удельного расхода топлива и содержание сажи от процентного содержания водной фазы в топливе – C_e , от размера (диаметр) капель водной фазы – d_k , угла опережения впрыска топлива – $\theta_{e.m.}$

Рисунок 3 – Зависимости часового расхода топлива (G_m) от содержания водной фазы в дизельном топливе (C_w), диаметра капель водной фазы (d_k), угла опережения впрыска топлива ($\theta_{в.т.}$, 1°)

Анализ полученных графических интерпретаций позволяет утверждать следующее. Значение часового расхода топлива:

- снижается до 5,05 кг/ч, если удельный вес водной фазы достигает 17 %, в диапазоне удельного веса водной фазы от 17 % до 20 % существенного изменения часовой расход топлива не зафиксировано;
- повышается до 7,77 кг/ч, если растет размер (диаметр) капель водной фазы в ВДС от 2 до 120 мкм;
- возрастает до 6,39 кг/ч при увеличении угла опережения впрыска топлива до 10 градусов поворота коленчатого вала ДВС.

Следовательно, результаты экспериментальных исследований подтвердили целесообразность применения ВДС для ДВС АТТ, что, в свою очередь, подтверждается следующими факторами.

Полученные в данном разделе результаты обусловлены преимуществом от применения ВДС предопределяемом следующими факторами:

1. Положительным влиянием на полноту сгорания рабочей смеси паров воды, образующихся из ВДС в камере сгорания двигателя при такте «сжатие». Образующийся пар повышает равномерность распределения рабочей смеси в камере сгорания. Приготавливаемая ВДС, состоит из капель воды, покрытых топливом, при высокой температуре в камере сгорания вскипает и разрушает наружную оболочку капли смесей, состоящей из жидкого топлива.

2. В химической активности воды, что способствует в камере сгорания ДВС под воздействием высоких температур, образованию водорода. В результате при такте «рабочий ход» он сгорает. Именно поэтому несмотря на замену до 20 % топлива водой, не происходит существенного снижения мощности ДВС.

3. При горении капли ВДС образуется значительно меньшее сажи, чем при горении капли неэмульгированного топлива. Снижение содержания сажи в ОГ ДВС объясняется тем, что ввод водного компонента в топливо интенсифицирует процесс горения за счет добавочного количества гидроксильного радикала (OH).

Результаты проведенных расчетов показали, что при введении водной фазы до 17 – 20 % по отношению к объёму топлива и при диаметрах капель воды в ВДС 2 мкм, происходит снижение: удельного расхода топлива на 10 – 18 %; содержания сажи в ОГ ДВС по значению K на 20 – 22 %, по значению N на 30 – 35 %.

С получения скоростных (внешних) характеристик ДВС ЯМЗ-236 при испытаниях на ВДС на основе дизельного топлива соответствующему требованиям ГОСТ 32511-2013 с содержанием дистиллированной водой по ГОСТ 6709 (от 4 до 20 %) на контрольных режимах работы ДВС по ГОСТ 18509 (таблица 2) были проведены стендовые испытания разработанных устройств [15] на двигателе ЯМЗ-236.

Таблица 2 – Результаты испытаний разработанных устройств

Частота вращения ДВС $n_{дв, \text{в}}$ (мин ⁻¹)	Часовой расход топлива/ВДС $G_{т, \text{в}}$ (кг/ч)	Крутящий момент ДВС $M_{кр, \text{в}}$ (Н м)	Эффективная мощность ДВС N_e (кВт)	Угол опережения впрыска топлива $\theta_{в, \text{т}}$, l^0	Удельный расход топлива g_e (г/кВт ч)
<i>1. Дизельное топливо</i>					
$n_{дв(\text{min})}=500$	5,66 / -	655	121,2	4°	299,6
1250	7,08 / -	665	128,98	4°	317,9
1750	8,03 / -	650	130,58	4°	366,7
$n_{дв(\text{max})}=2100$	8,11 / -	640	115,59	4°	456,4
<i>2. ВДС (17 % воды)</i>					
$n_{дв(\text{min})}=500$	4,86 / 5,68	661	122,44	8°	235,7
1200	5,98 / 7,02	665	127,98	8°	251,7
1750	6,87 / 8,05	654	131,85	8°	285,5
$n_{дв(\text{max})}=2100$	6,62 / 7,74	642	116,59	8°	324,5

Эффективная мощность ДВС, представленная в таблице 2, определяется по формуле:

$$N_e = \frac{M_{кр} n_{дв}}{9554} \text{ (кВт)}. \quad (6)$$

Удельный расход топлива определялся по формуле:

$$g_e = \frac{G_t}{N_e} 10^3 \text{ (г/кВт ч)}. \quad (7)$$

Сравнение данных, получен в результате эксперимента (таблица 2), полученных при работе ДВС ЯМЗ-236 на дизельном топливе и на ВДС с содержанием водной фазы 17 % позволил установить следующее. Не зафиксировано значимого изменения эффективной мощности ДВС и крутящего момента, а вот снижение удельного расхода топлива довольно существенно - до 28 %.

Полученные результаты указывают на то, что наличие водного компонента в ВДС приводит к ее диффузному сгоранию. Пары воды, образующиеся из ВДС в камере сгорания двигателя при такте «сжатие», воздействуют на рабочую смесь, что повышает полноту сгорания рабочей смеси. Образующийся пар повышает равномерность распределения рабочей смеси в камере сгорания.

Приготавливаемая ВДС, состоит из капель воды, покрытых топливом, при высокой температуре ($T = 200 - 500^\circ\text{C}$) в камере сгорания вскипает и разрушает наружную оболочку капли ВДС, состоящей из жидкого топлива. Физический смысл этого явления состоит в том, что температуры кипения воды и топлива существенно отличаются. Получается своего рода микровзрыв, который расщепляет наружную оболочку ВДС, которая состоит из тяжелых топливных фракций, находящихся пока еще в жидком виде. Это ведет к вторичному распылению топлива, которое и гомонизирует ВВС, и улучшает процесс смешивания воздуха и топлива. В конечном итоге повышается полнота сгорания ВДС [18].

Заключение. Таким образом, имея достоверные полученные результаты экспериментального исследования и сравнивая их с теоретическими результатами можно сделать вывод об

адекватности разработанной математической модели влияния состава и дисперсности водно-дизельной смеси на эксплуатационные и экологические показатели ДВС АТТ. Максимально улучшить характеристики дизельного ДВС представляется возможным используя «обратную» ВДС, то есть смесь, где основная часть капель водной фазы имеет размер не более 2 мкм, а содержание воды соответствует 17 – 20 % к объёму топлива. Такая рецептура ВДС способствует гомогенизации заряда, интенсификации смешивания воздуха и топлива, повышению полноты сгорания горючей смеси.

Список литературы

1. Ложкин В.Н., Пименов Ю.А., Сафиуллин Р.Н., Акодес А.А. Улучшение экологических показателей автомобильных дизелей путем применения водно-топливных эмульсий / Материалы научно-практической конференции. – 2005. – 67–76 с.
2. Акулов Н.И. Разработка процессов получения эмульсий водно-спиртовых растворов в бензине в роторных аппаратах с модуляцией потока и их коагуляция. – М.: Наука. – 2005. – 202 с.
3. Долинский А.А., Иваницкий Г.К. Принципы разработки новых энергосберегающих технологий и оборудования на основе методов дискретно-импульсного ввода энергии. // Пром. Теплотехника. – Т.19. – № 4-5. – 1997. – С. 13 – 25.
4. ГОСТ 14846–81. Двигатели автомобильные. Методы стендовых испытаний. – М.: Изд-во стандартов. – 1981. – 11 с.
5. ГОСТ Р 52408–2005. Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Выбросы вредных веществ с ОГ. – М.: Изд-во стандартов. – 2005. – Часть 2. – 14 с.
6. ГОСТ Р 52033–2003. Автомобили с бензиновыми двигателями. Выбросы загрязняющих веществ с отработавшими газами. – М.: Изд-во стандартов. – 2003. – 19 с.
7. ГОСТ 20306–1990. Автотранспортные средства. Топливная экономичность. – М.: Изд-во стандартов. – 1990. – 46 с.
8. ГОСТ 22576–1990. Автотранспортные средства. Скоростные свойства. – М.: Изд-во стандартов. – 1990. – 20 с.
9. ГОСТ Р 51249–99. ДВС поршневые. Выбросы вредных веществ с отработавшими газами. – М.: Изд-во стандартов. – 1999. – 21 с.
10. ГОСТ 17.2.2.01–84. Охрана природы. Атмосфера. Дизели автомобильные. Дымность отработавших газов. Нормы и методы определения. – М.: Изд-во стандартов. – 1984. – 14 с.
11. ГОСТ 17.2.2.03–87. Охрана природы. Атмосфера. Нормы и методы измерений. Содержание окиси углерода в отработавших газах автомобилей с бензиновыми двигателями. – М.: Изд-во стандартов. – 1987. – 19 с.
12. ГОСТ 17.2.1.03–84. Охрана природы. Атмосфера. Термины определения контроля загрязнения. – М.: Изд-во стандартов. – 1984. – 11 с.
13. Балабудкин М.А., Борисов Г.Н. О путях повышения эффективности акустических и гидродинамических явлений в РПА. В кн.: Новые физические методы интенсификации технологических процессов. – М.: Металлургия. – 1977. – С. 98 – 102.
14. Рабинарсон А.И. Проблемы коллоидной химии. – Л.: ОНТИ – Химтеорет. – 1937. – 380 с.
15. Ломовских А.Е., Илларионов В.В., Капустин Д.Е., Сысоев И.П. Испытания ДВС с системой приготовления и подачи БС с дисперсной фазой на основе воды. / Сборник материалов докладов по итогам Всероссийской НПК (29-30 ноября 2011 года), ч.3. – Воронеж: ВАИУ. – 2011. – С. 133–134.
16. Иванова В.М., Калинина В.Н., Нешумова Л.А., Решетникова И.О. Математическая статистика. – М.: Высшая школа. – 1981. – 371 с.
17. Борисов С.В., Ломовских А.Е., Великанова Л.В., Фоменко Л.Н., Шаповалов А.А. Математическое моделирование течения водно-дизельной смеси через рабочие органы роторно-пульсационного аппарата и определение диаметра капель воды в смеси. Депон. 46 ЦНИИ МО РФ 16.01.14 г. Инв. № В 7530 СРДР, серия Б, вып. № 106. – М.: ЦВНИ МО РФ. – 2014. – 13 с.
18. Патент РФ № 2498094, МПК F02B 47/02, F02M 43/00, F02M 25/025. Способ обработки углеводородного топлива для двигателей внутреннего сгорания. / Борисов С.В., Иванов В.П., Ломовских А.Е., Капустин Д.Е., Сысоев И.П. – Оpubл. 10.11.2013.

References

1. Lozhkin V.N., Pimenov Ju.A., Safiullin R.N., Akodes A.A. Uluchshenie jekologicheskikh pokazatelej avtomobil'nyh dizelej putem primeneniya vodno-toplivnyh jemul'sij / Materialy nauchno-prakticheskoy konferencii. – 2005. – 67–76 s.
2. Akulov N.I. Razrabotka processov polucheniya jemul'sij vodno-spirovnyh rastvorov v benzine v rotornyh apparatah s moduljaciej potoka i ih koaguljacija. – M.: Nauka. – 2005. – 202 s.
3. Dolinskij A.A., Ivanickij G.K. Principy razrabotki novyh jenergosberegajushhih tehnologij i oborudovaniya na osnove metodov diskretno-impul'snogo vvoda jenerгии. // Prom. Teplotehnika. – T.19. – № 4-5. – 1997. – S. 13 – 25.
4. GOST 14846–81. Dvigateli avtomobil'nye. Metody standovyh ispytanij. – M.: Izd-vo standartov. – 1981. – 11 s.
5. GOST R 52408–2005. Dvigateli vnutrennego sgoraniya porshnevyje. Vybrosoy vrednyh veshhestv s OG. – M.: Izd-vo standartov. – 2005. – Chast' 2. – 14 s.
6. GOST R 52033–2003. Avtomobili s benzinovymi dvigateljami. Vybrosoy zagriznjajushhih veshhestv s otrabotavshimi gazami. – M.: Izd-vo standartov. – 2003. – 19 s.
7. GOST 20306–1990. Avtotransportnye sredstva. Toplivnaja jekonomichnost'. – M.: Izd-vo standartov. – 1990. – 46 s.
8. GOST 22576–1990. Avtotransportnye sredstva. Skorostnye svojstva. – M.: Izd-vo standartov. – 1990. – 20 s.
9. GOST R 51249–99. DVS porshnevyje. Vybrosoy vrednyh veshhestv s otrabotavshimi gazami. – M.: Izd-vo standartov. – 1999. – 21 s.
10. GOST 17.2.2.01–84. Ohrana prirody. Atmosfera. Dizeli avtomobil'nye. Dymnost' otrabotavshih gazov. Normy i metody opredelenija. – M.: Izd-vo standartov. – 1984. – 14 s.
11. GOST 17.2.2.03–87. Ohrana prirody. Atmosfera. Normy i metody izmerenij. Soderzhanie okisi ugleroda v otrabotavshih gazah avtomobilej s benzinovymi dvigateljami. – M.: Izd-vo standartov. – 1987. – 19 s.
12. GOST 17.2.1.03–84. Ohrana prirody. Atmosfera. Terminy opredelenija kontrolja zagriznenija. – M.: Izd-vo standartov. – 1984. – 11 s.
13. Balabudkin M.A., Borisov G.N. O putjah povyshenija jeffektivnosti akusticheskikh i gidrodinamicheskikh javlenij v RPA. V kn.: Novye fizicheskie metody intensivizacii tehnologicheskikh processov. – M.: Metallurgija. – 1977. – S. 98 – 102.
14. Rabinarson A.I. Problemy kolloidnoj himii. – L.: ONTI – Himteoret. – 1937. – 380 s.
15. Lomovskih A.E., Illarionov V.V., Kapustin D.E., Sysoev I.P. Ispytanija DVS s sistemoy prigotovlenija i podachi BS s dispersnoj fazoj na osnove vody. / Sbornik materialov dokladov po itogam Vserossijskoj NPK (29-30 nojabrja 2011 goda), ch.3. – Voronezh: VAIU. – 2011. – S. 133–134.
16. Ivanova V.M., Kalinina V.N., Neshumova L.A., Reshetnikova I.O. Matematicheskaja statistika. – M.: Vysshaja shkola. – 1981. – 371 s.
17. Borisov S.V., Lomovskih A.E., Velikanova L.V., Fomenko L.N., Shapovalov A.A. Matematicheskoe modelirovanie techenija vodno-dizel'noj smesi cherez rabochie organy rotornopul'sacionnogo apparata i opredelenie diametra kapel' vody v smesi. Depon. 46 CNII MO RF 16.01.14 g. Inv. № V 7530 SRDR, serija B, vyp. № 106. – M.: CVNI MO RF. – 2014. – 13 s.
18. Patent RF № 2498094, MPK F02B 47/02, F02M 43/00, F02M 25/025. Sposob obrabotki uglevodorodnogo topliva dlja dvigatelej vnutrennego sgoraniya. / Borisov S.V., Ivanov V.P., Lomovskih A.E., Kapustin D.E., Sysoev I.P. – Opubl. 10.11.2013.

Сведения об авторах

Принадлежность к организации

Канищев Александр Сергеевич – кандидат технических наук, начальник факультета Федерального государственного казенного военного образовательного учреждения высшего образования «Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» Министерства обороны Российской Федерации, Россия, г. Воронеж.

Сазонов Сергей Николаевич – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве», Россия, г. Тамбов, e-mail: snsazon@mail.ru.

Томилов Александр Анатольевич – кандидат технических наук, профессор Федерального государственного казенного военного образовательного учреждения высшего образования «Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» Министерства обороны Российской Федерации, Россия, г. Воронеж.

Ломовских Александр Егорович – кандидат технических наук, доцент Федерального государственного казенного военного образовательного учреждения высшего образования «Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» Министерства обороны Российской Федерации, Россия, г. Воронеж, e-mail: lomovskih1979@yandex.ru.

Борисов Сергей Владимирович – начальник учебной лаборатории Федерального государственного казенного военного образовательного учреждения высшего образования «Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» Министерства обороны Российской Федерации, Россия, г. Воронеж, e-mail: sergeevich2105219@yandex.ru.

Рябчук Алексей Сергеевич – слушатель Федерального государственного казенного военного образовательного учреждения высшего образования «Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» Министерства обороны Российской Федерации, Россия, г. Воронеж.

Author credentials

Affiliations

Kanishchev Alexandr – Candidate of Technical Sciences, Head of the faculty of Federal State Official Military Educational Institution of Higher Education “Military Educational and Scientific Centre of the Air Force N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy” the Ministry of Defence of the Russian Federation, Russia, Voronezh.

Sazonov Sergey – Full Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Researcher of Federal State Budgetary Scientific Institution “All-Russian Research Institute for Use of Machinery and Petroleum Products in Agriculture”, Russia, Tambov, e-mail: snsazon@mail.ru.

Tomilov Alexander – – Candidate of Technical Sciences, Professor of Federal State Official Military Educational Institution of Higher Education “Military Educational and Scientific Centre of the Air Force N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy” the Ministry of Defence of the Russian Federation, Russia, Voronezh.

Lomovskih Alexander – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Federal State Official Military Educational Institution of Higher Education “Military Educational and Scientific Centre of the Air Force N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy” the Ministry of Defence of the Russian Federation, Russia, Voronezh, e-mail: lomovskih1979@yandex.ru.

Borisov Sergey – head of the training laboratory of Federal State Official Military Educational Institution of Higher Education “Military Educational and Scientific Centre of the Air Force N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy” the Ministry of Defence of the Russian Federation, Russia, Voronezh.

Ryabchuk Alexey – student of Federal State Official Military Educational Institution of Higher Education “Military Educational and Scientific Centre of the Air Force N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy” the Ministry of Defence of the Russian Federation, Russia, Voronezh.

Поступила в редакцию (Received): 12.11.2020 Принята к публикации (Accepted): 16.12.2020