

УДК 631.372.43.03

А.Н. Карташевич<sup>1</sup>, С.А. Плотников<sup>1</sup>, М.В. Смольников<sup>1</sup>, П.И. Бажан<sup>2</sup>, А.А. Миронов<sup>2</sup>**ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ ТОПЛИВОПОДАЧИ ТРАКТОРНОГО ДИЗЕЛЯ  
ДЛЯ РАБОТЫ НА ТОПЛИВАХ С ДОБАВКАМИ ЭТАНОЛА**Вятский государственный университет<sup>1</sup>Нижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева<sup>2</sup>

Объектом исследования является топливная смесь, состоящая из этанола и дизельного топлива. Цель исследования – выяснение влияния состава топлива на показатели работы дизеля, главной задачей является разработка состава с улучшенными эксплуатационными свойствами. Методология – лабораторные и стендовые испытания. В результате определены оптимальные значения регулировок топливной аппаратуры дизеля.

*Ключевые слова:* дизель, этанол, стендовые испытания, эффективные показатели, токсичные компоненты, сажа.

Необходимым требованием обеспечения работоспособности дизеля на нетрадиционных видах топлива является адаптация системы питания под свойства этого топлива. В настоящее время в научной литературе отражено большое количество различных конструктивно-технологических схем с целью решения обозначенной проблемы. При этом направление и глубина модернизации обуславливаются различными, в сравнении с дизельным топливом (ДТ), физико-химическими свойствами альтернативных топлив.

В рамках сотрудничества между Вятским государственным университетом (ВятГУ) и Белорусской государственной сельскохозяйственной академией (БГСХА) реализуются проекты практического использования биотоплив в автотракторных дизелях [1-4].

Реальную замену традиционным дизельным топливам из нефтяного сырья могут дать алифатические спирты – этанол, метанол и их эфиры. Биоэтанол наиболее целесообразно применять в виде этанола-топливной эмульсии (ЭТЭ), однако это вызывает определенные трудности в работе дизеля [5]. Обязательным свойством ЭТЭ должна быть ее высокая физическая стабильность. При этом показатели стабильности должны обеспечивать возможность ее заблаговременного приготовления или же ЭТЭ должна готовиться в самой системе питания дизельного ДВС. Разумеется, что выходные показатели топливного насоса должны оставаться в пределах технологических регулировок, система питания не должна подвергаться глобальным изменениям, влияние ЭТЭ на показатели надежности и долговечности топливной аппаратуры должно быть минимальным.

При проведении поисковых исследований было оценено влияние добавок дистиллированной воды на физическую стабильность эмульсий с различным составом ингредиентов в присутствии до 5% присадки. В результате определено, что дистиллированная вода оказывает синергическое действие, усиливая свойства присадки. В частности, добавка воды в объеме от 6% до 12% в высококонцентрированные, до 40 % этанола, этанола-топливные эмульсии, вызывает рост физической стабильности последних от 32 до 58 мин.

Были приняты во внимание следующие обстоятельства:

- неограниченная растворимость (гигроскопичность) этанола в воде;
- нежелательность наличия воды в дизельном топливе;
- ограниченность добавок дистиллированной воды в спирт из условия целесообразности использования необезвоженного этанола и удешевления способа получения эмульсии.

Исходя из сказанного, содержание дистиллированной воды в этаноле было ограничено на уровне 12 % от его массы [6]. Указанное количество воды было принято постоянным при проведении дальнейших испытаний.

В ходе второго этапа лабораторных исследований [7] был произведен выбор присадок для создания ЭТЭ. В исследованиях использовалось несколько наименований присадок различных классов: на основе индустриальных масел, на основе полиметакрилата, на основе алкенилсукцинимидов. Выбор эмульгаторов ЭТЭ обосновывался из условия обеспечения необходимой физической стабильности ЭТЭ, достаточной для нормальной работы двигателя. Объем вводимого ПАВ при этом не должен быть выше 4...5% вследствие существенного влияния на экономичность выбранного способа.

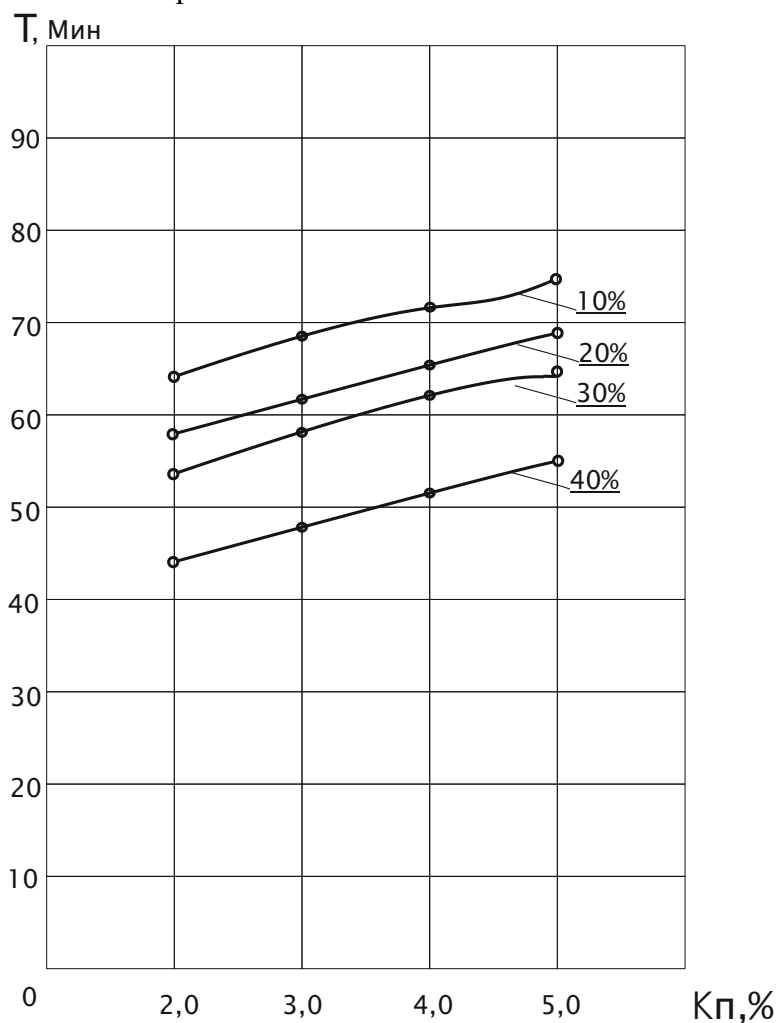
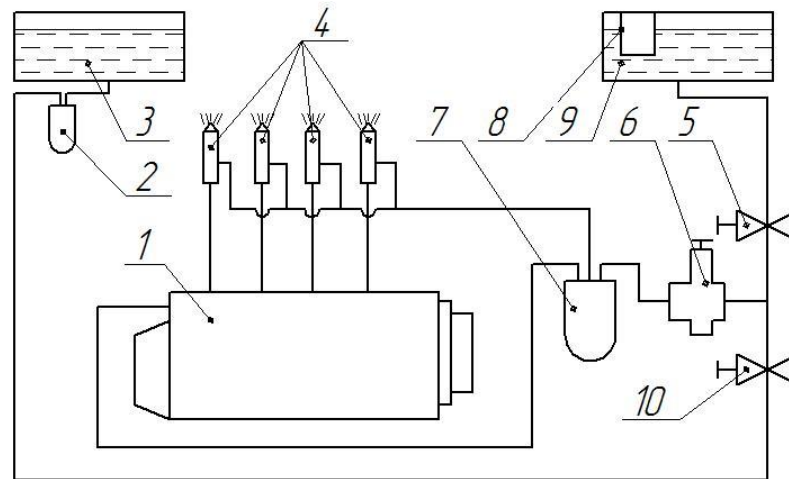


Рис. 1. Стабильность этанола-топливных эмульсий

На основе полученных данных был разработан оригинальный состав топливной эмульсии [8], отличающийся высокими эксплуатационными свойствами и достаточной стабильностью. Как видно из рис. 1, при содержании этанола в ЭТЭ, равном 10 %, время до полного разложения эмульсии составляет 75 минут, а при содержании 40 % – 58 мин.

Для подачи ЭТЭ в цилиндры тракторного дизеля 4ЧН 11,0/12,5 была разработана и апробирована схема системы питания дизеля (рис. 2). Смешение эмульсий производилось в дополнительно установленном баке 9, сам смеситель 8 также устанавливался в баке, обеспечивалось управление смесителем из кабины трактора. Запуск, прогрев холодного двигателя – производились на дизельном топливе, поступающем из штатного бака 3 по штатной линии низкого давления, через штатный фильтр грубой очистки 2. После этого отсечной кран дизельного топлива 10 закрывался, а отсечной кран подачи эмульсии 5 – открывался.



**Рис. 2. Схема системы питания дизеля:**

- 1 – ТНВД; 2 – фильтр грубой очистки топлива; 3 – бак для основного топлива; 4 – форсунки;  
 5 – отсечной кран для дополнительного топлива; 6 – подкачивающий насос;  
 7 – фильтр тонкой очистки; 8 – смеситель; 9 – бак для дополнительного топлива;  
 10 – отсечной кран для основного топлива

Приготовленная в баке 9 высококонцентрированная эмульсия по трубопроводам дополнительной линии низкого давления поступала к подкачивающему насосу 6, затем проходила через штатный фильтр тонкой очистки 7 и направлялась в топливный насос высокого давления (ТНВД) 1, осуществляющий подачу в форсунки 4.



**Рис. 3. Общий вид дизеля 4ЧН 11,0/12,5 (Д-245.5S5) с модернизированной системой питания**

Сравнительные испытания топливного насоса высокого давления типа 4УТНМ с форсунками 455.1112010-50 на стенде КИ-22210-02М-15 на чистом дизельном топливе и ЭТЭ с содержанием 50 % этанола показали следующие два момента. Во-первых, имеет место снижение цикловой подачи ЭТЭ на 2,3 % в номинальном режиме, и на 7,8 % в режиме максимального крутящего момента. Во-вторых, это снижение обуславливается меньшей, в сравне-

нии с дизельным топливом, кинематической вязкостью ЭТЭ (на 33,2 %) и может быть нивелировано регулировками ТНВД [9].

Основным этапом исследований было определение влияния этанола-топливной эмульсии различного состава на регулировки, эффективные и токсические показатели тракторного дизеля 4ЧН 11,0/12,5 (Д-245.5S5). Общий вид дизеля с модернизированной системой питания показан на рис. 3. На рис. 4 приведены графики изменения мощностных и экономических показателей работы дизеля при различных значениях установочного угла опережения впрыскивания топлива и различном содержании этанола в эмульсии при частоте вращения 1800 мин<sup>-1</sup>.

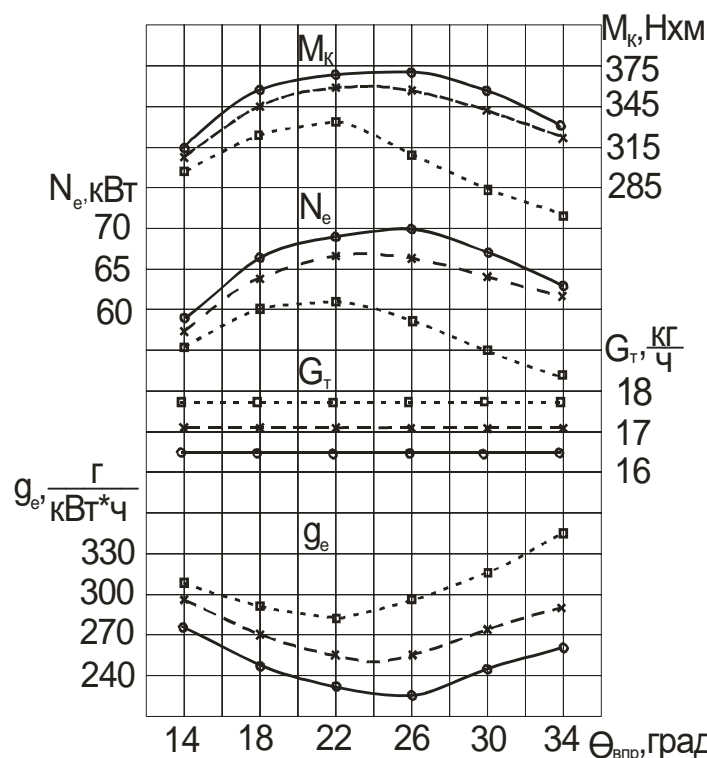


Рис. 4. Изменение мощностных и экономических показателей работы дизеля 4ЧН 11,0/12,5 при различных установочных углах опережения впрыскивания топлива при  $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$ :

- — ○ — дизельное топливо;
- × — × — 20% этанола в топливе;
- — □ — 40% этанола в топливе

Анализ данных показывает, что при работе дизеля на чистом ДТ оптимальным углом опережения впрыскивания топлива является  $\Theta_{впр} = 26^\circ$ . Значение эффективной мощности при этом максимально  $N_{e \text{ max}} = 70 \text{ кВт}$ , а значение удельного эффективного расхода топлива минимально  $g_{e \text{ min}} = 235 \text{ г/кВт}\cdot\text{ч}$ . Уменьшение или увеличение установочного угла от этого значения вызывает снижение эффективной мощности и повышение удельного эффективного расхода топлива.

Работе дизеля на высококонцентрированных эмульсиях сопровождается изменением характера кривых. Так, значения часового расхода топлива увеличиваются от 16,5 кг/ч при работе дизеля на чистом ДТ, до 17,1 кг/ч и 17,7 кг/ч при работе дизеля с содержанием этанола в эмульсии 20 % и 40 %, соответственно. Увеличение вызывается снижением нижней расчетной теплоты сгорания ЭТЭ. Максимальные значения эффективной мощности и минимальные значения удельного эффективного расходов топлива достигаются при меньших значениях  $\Theta_{впр}$ . Так, при работе дизеля на ЭТЭ с содержанием 40 % этанола, эти значения достигаются при  $\Theta_{впр} = 22^\circ$  и составляют  $N_{e \text{ max}} = 61,1 \text{ кВт}$ ,  $g_{e \text{ min}} = 284 \text{ г/кВт}\cdot\text{ч}$ . При изменении  $\Theta_{впр}$  в ту или иную сторону мощность и экономичность работы дизеля ухудшаются. С учетом

лучшей экономичности работы дизеля и максимального значения эффективной мощности угол  $\Theta_{впр} = 22^\circ$  следует считать оптимальным установочным углом опережения впрыскивания топлива для работы на ЭТЭ с содержанием 40 % этанола и присадок.

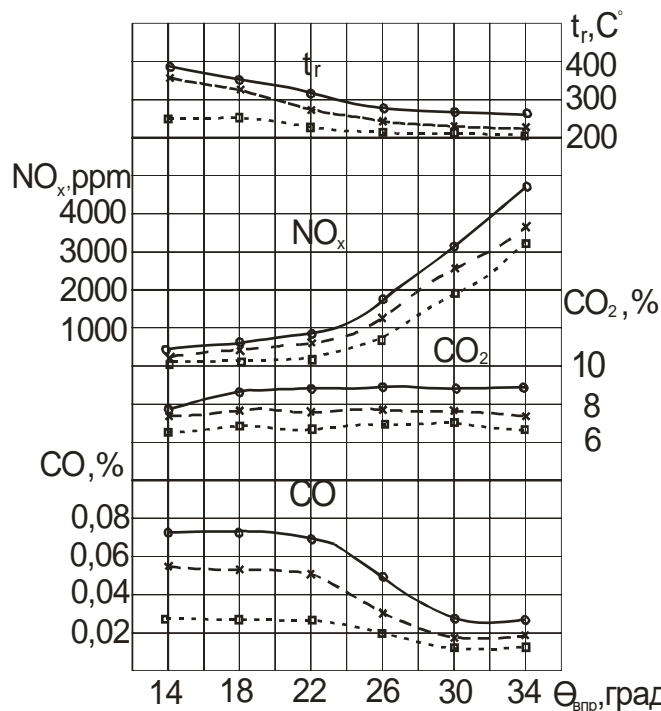


Рис. 5. Изменение токсических показателей работы дизеля 4ЧН 11,0/12,5 при различных установочных углах опережения впрыскивания топлива при  $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$ :

- — — — ○ — дизельное топливо;
- × — — × — 20% этанола в топливе;
- — — — □ — 40% этанола в топливе

Изменение содержания токсичных компонентов и сажи в отработавших газах (ОГ) дизеля 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от установочного угла опережения впрыскивания топлива для частоты вращения  $1800 \text{ мин}^{-1}$  представлено на рис. 5 и 6.

Из данных рис. 5 видно, что изменение установочного угла опережения впрыскивания топлива при работе дизеля на чистом ДТ практически не изменяет эмиссии с ОГ несгоревших полициклических углеводородов  $\text{C}_x\text{H}_y$  и диоксида углерода  $\text{CO}_2$ . Вместе с ростом установочного угла эмиссия оксидов углерода  $\text{CO}$  с ОГ снижается от 0,07% при  $\Theta_{впр} = 14^\circ$  до 0,03% при  $\Theta_{впр} = 34^\circ$ , а выброс твердых частиц сажи и суммарных оксидов азота  $\text{NO}_x$ , напротив, возрастает. Если при  $\Theta_{впр} = 14^\circ$  выброс составлял для частиц сажи 13,7%, а для суммарных оксидов азота 246 ppm, то при  $\Theta_{впр} = 34^\circ$  эти значения составляют, соответственно, 36,3% и 4812 ppm: изменение установочного угла опережения впрыскивания топлива вызывает неоднозначное влияние на показатели дымности и токсичности дизеля.

Можно предположить, что при ранних значениях установочного угла опережения впрыскивания топлива имеет место всевозрастающая неполнота сгорания заряда из-за неоднородного состава топливовоздушной смеси, обуславливающая недоокисление частиц углерода до оксида  $\text{CO}$ . Одновременно увеличение установочного угла опережения впрыскивания топлива вызывает переохлаждение образующихся частиц сажи. Частицы становятся слишком холодными для того, чтобы быстро окислиться до оксидов углерода  $\text{CO}$ , и появляются в ОГ, увеличивая эмиссию сажи (рис. 5).

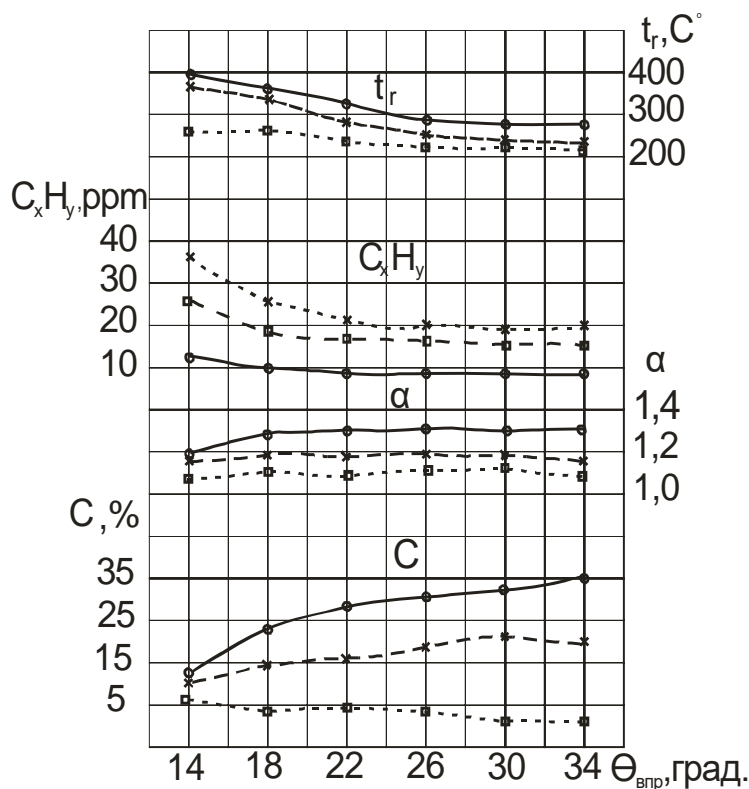
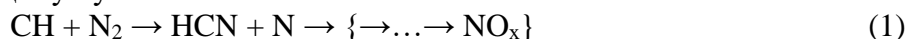


Рис. 6. Изменение показателей дымности дизеля 4ЧН 11,0/12,5 при различных установочных углах опережения впрыскивания топлива при  $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$ :

- — — ○ - дизельное топливо;
- ✕ — — ✕ - 20% этанола в топливе;
- — — — □ - 40% этанола в топливе

Радикалы СН, образующиеся как промежуточные компоненты во фронте пламени, не способствуют росту эмиссии несгоревших полициклических углеводородов  $C_xH_y$  (рис. 6). Вместо этого они реагируют с азотом имеющегося в достаточном количестве воздуха (рис. 6) с образованием цианисто-водородной кислоты, которая далее реагирует с образованием оксидов азота  $NO_x$  по следующему пути:



Очевидно, при постоянном снижении температуры ОГ (рис. 6) имеет место рост образующихся быстрых оксидов азота (рис. 5) по известному механизму Фенимора.

Переход дизеля для работы на ЭТЭ вызывает значительное изменение его показателей дымности и токсичности. Эмиссия оксидов СО и диоксидов  $CO_2$ , а также выброс частиц сажи с ОГ дизеля снижается вместе с ростом присутствия этанола в ЭТЭ. Так, если при значении установочного угла опережения впрыскивания топлива  $\Theta_{впр} = 26^\circ$  и работе дизеля на чистом ДТ эмиссия СО составляла 0,05%,  $CO_2$  – 8,5 %, а выброс частиц сажи – 31,2 %, то при добавке 20 % этанола при значении установочного угла опережения впрыскивания топлива  $\Theta_{впр} = 22^\circ$  эти значения составляют 0,05% для СО, 7,5 % для  $CO_2$ , и 16 % для частиц сажи. При добавке 40 % этанола в топливо при значении установочного угла опережения впрыскивания топлива  $\Theta_{впр} = 22^\circ$  эти значения равны, соответственно 0,02 % для СО, 7 % для  $CO_2$ , и 4,5 % для частиц сажи. Таким образом, максимальное снижение эмиссии СО составляет 0,03 %, эмиссии  $CO_2$  – 1,5 %, а выброса частиц сажи – 26,7 %.

Снижение эмиссии СО и  $CO_2$ , очевидно, вызывается снижением присутствия связанного углерода в исходных компонентах топлива, снижение выброса частиц сажи – меньшей склонностью к дымлению спиртов в сравнении с ДТ. При этом указанная тенденция наблюдается во всем рассмотренном диапазоне изменения значений установочного угла опережения впрыскивания топлива.



Добавка этанола в топливо не изменяет характера кривой значений содержания суммарных оксидов азота  $\text{NO}_x$  во всем рассматриваемом диапазоне. Можно предположить сохранение действующего механизма их образования. В то же время численные значения эмиссии оксидов азота с ОГ дизеля становятся ниже. Так, если при значении установочного угла опережения впрыскивания топлива  $\Theta_{\text{впр}} = 26^\circ$  и работе дизеля на чистом ДТ эмиссия  $\text{NO}_x$  составляла 1798 ppm, то при добавке 20 % и 40 % этанола в топливо при значении установочного угла опережения впрыскивания топлива  $\Theta_{\text{впр}} = 22^\circ$  эти значения составляют 757 ppm и 387 ppm соответственно.

Эмиссия с ОГ несгоревших полициклических углеводородов  $\text{C}_x\text{H}_y$  вместе с добавкой этанола в топливо возрастает. Возможно, решающее значение в этом случае оказывает ускорение процесса горения спиртосодержащего топлива [5]. Так, если при значении установочного угла опережения впрыскивания топлива  $\Theta_{\text{впр}} = 26^\circ$  и работе дизеля на чистом ДТ эмиссия  $\text{C}_x\text{H}_y$  составляла 9 ppm, то при добавке 20 % и 40 % этанола в топливо при значении установочного угла опережения впрыскивания топлива  $\Theta_{\text{впр}} = 22^\circ$  эти значения составляют 18 ppm и 22 ppm соответственно.

### Заключение

Необходимые значения стабильности и эксплуатационных свойств ЭТЭ могут быть достигнуты правильным выбором вида и концентрации присадки. Содержание дистиллированной воды в этаноле следует ограничить на уровне 12 % от его массы. Работа тракторного дизеля на ЭТЭ возможна только с учетом модернизации его системы питания. При работе дизеля 4ЧН 11,0/12,5 (Д-245.5S5) на ЭТЭ с содержанием этанола до 40 % оптимальным установочным углом опережения впрыскивания следует считать угол  $\Theta_{\text{впр.}} = 22^\circ$ .

Работа дизеля на ЭТЭ с добавками 20 % и 40 % этанола позволяет сократить расход ДТ до 21,5...58,5 %. При этом значения эффективной мощности и крутящего момента снижаются на 10,8...19,7 %. Работа дизеля на ЭТЭ с содержанием 40 % этанола позволяет снизить эмиссию в ОГ дизеля оксидов углерода CO в 2,5 раза, диоксидов углерода  $\text{CO}_2$  – на 21 %, суммарных оксидов азота  $\text{NO}_x$  – в 4,6 раза и частиц сажи – в 7 раз. Вместе с тем, имеет рост эмиссии несгоревших полициклических углеводородов  $\text{C}_x\text{H}_y$  в ОГ дизеля в 2,4 раза. Представляет значительный интерес исследование работы трактора на ЭТЭ в условиях реальной эксплуатации.

### Библиографический список

1. **Карташевич, А.Н.** Применение этанолсодержащих топлив в дизеле / А.Н. Карташевич, С.А. Плотников, Г.Н. Гурков. Ч. 2. – Киров, 2011. – 116 с.
2. **Карташевич, А.Н.** Применение топлив на основе рапсового масла в тракторных дизелях / А.Н. Карташевич, С.А. Плотников, В.С. Товстыка. – Киров, 2014. – 144 с.
3. **Плотников, С.А.** Оценка экологической эффективности применения этанола в качестве альтернативного топлива / С.А. Плотников, М.В. Смольников // Актуальные направления научных исследований XXI века: Теория и практика. – 2015. – Т. 3, № 4-1. – С. 93-97.
4. **Карташевич, А.Н.** Исследование работы двигателя 1Ч 6,8/5,4 на альтернативных топливах / А.Н. Карташевич, П.Ю. Малышкин, С.А. Плотников, А.С. Зубакин // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. – 2016. – № 4. – С. 115-117.
5. **Плотников, С.А.** Улучшение эксплуатационных показателей тракторных дизелей применением спиртосодержащих топлив / С.А. Плотников, С.Н. Гуцин. – Киров, 2003. – 162 с..
6. **Карташевич, А.Н.** Исследование свойств новых топлив на основе этанола / А.Н. Карташевич, С.А. Плотников, М.В. Смольников // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. – 2017. – № 1. – С. 114-117.
7. **Плотников, С.А.** Создание новых видов альтернативных топлив на основе этанола / С.А. Плотников, М.В. Смольников // Общество, Наука, Инновации (НПК-2016). Всерос. ежегод. науч.-практ. конф. (18-29 апреля 2016 г.). Сб. статей. – Киров, 2016. – С. 1358-1362.

8. Заявка 051849 Российская Федерация, МПК С10L 1/16, С10L 1/32. Топливная эмульсия / Плотников С.А., Карташевич А.Н., Смольников М.В. – № 2016133410/17; заявл. 12.08.16; опубл.: 24.01.18, Бюл. № 3.
9. **Плотников, С.А.** Модернизация системы топливоподачи тракторного дизеля, работающего на этано-топливной эмульсии / С.А. Плотников, А.Н. Карташевич, М.В. Смольников // Общество, Наука, Инновации (НПК-2017). Всерос. ежегод. науч.-практ. конф. (1-29 апреля 2017 г.). Сб. статей. – Киров, 2017. – С. 1835-1840.

*Дата поступления  
в редакцию: 06.02.2019*

**A.N. Kartashevich<sup>1</sup>, S.A. Plotnikov<sup>1</sup>, M.V. Smolnikov<sup>1</sup>, P.I. Bazhan<sup>2</sup>, A.A. Mironov<sup>2</sup>**

### **OPTIMIZATION OF SYSTEM SUBMISSION OF FUEL OF THE TRACTOR DIESEL ENGINE FOR WORK ON FUELS WITH ADDITIVES OF ETHANOL**

Vyatka state university, Kirov<sup>1</sup>  
Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev<sup>2</sup>

**Object** of research is the fuel mix consisting of ethanol and diesel fuel.

The research problem was development of structure with the improved operational properties.

**The purpose of research** was finding-out of influence of structure of fuel on parameters of work of a diesel engine.

**Methods** of the present researches were laboratory and bench tests.

**Carried out researches** and their analysis have allowed to define optimum values of adjustments of the fuel equipment of a diesel engine.

*Keywords:* diesel, ethanol, bench tests, effective indices, toxic components, fuel soot.