

ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВА ЭТАНОЛО-ТОПЛИВНОЙ ЭМУЛЬСИИ ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ДИЗЕЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЯХ

д.т.н. Плотников С.А.¹, д.т.н. Карташевич А.Н.¹, Пляго А.В.¹, д.т.н. Пачурин Г.В.²

¹Вятский государственный университет (ВятГУ), Киров, Россия

²Нижегородский государственный технический университет (НГТУ) им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия
PlotnikovSA@bk.ru

Использование альтернативных топлив биологического происхождения, в частности, спиртов, следует считать делом уже самой ближайшей перспективы. Ученые всего мира исследуют все более концентрированные составы этанола-топливных эмульсий с различного рода присадками. Однако до настоящего времени не определены целесообразные пределы замещения ДТ этанолом. С учетом глубины проблемы, в первую очередь, необходимо рассматривать создание ЭТЭ с целым рядом необходимых свойств, что возможно только в случае применения присадок. Проведенный анализ используемых в топливе присадок показал, что направленность действия присадок обычно очень узка. Соответственно, для обеспечения ряда необходимых свойств ЭТЭ требуется присадка комплексного действия. Испытания проводились в несколько этапов. Исследовалась стабильность нового состава топлива с применением различных присадок. Была определена присадка с наилучшими показателями и принята для дальнейшего использования в экспериментах. Далее производились сравнительные испытания работы топливоподающей аппаратуры как на базовом топливе, так и на новых составах топлив. Завершающим этапом исследований была проверка параметров работоспособности двигателя в целом при работе на основных нагрузочных и скоростных режимах. В статье рассмотрен возможный вариант действия присадки комплексного действия на основе дисульфида молибдена MoS₂ в качестве ингибитора горения. Приведен предположительный вид и механизм протекающих реакций в камере сгорания дизельного двигателя. Представлены результаты экспериментов по работоспособности форсунок 455.1112010-50 на различных составах новых топлив и при изменяющихся условиях. Рассмотрены экологические показатели работы двигателя 4ЧН 11,0/12,5 при работе по внешней скоростной характеристике на различных составах топлив. По результатам анализа данных сделаны выводы об ограничении присутствия этанола в смеси и обоснован предел замещения основного топлива.

Ключевые слова: дизель, альтернативное топливо, этанола-топливная эмульсия, топливная присадка, впрыскивание, стендовые испытания.

Для цитирования: Плотников С.А., Карташевич А.Н., Пляго А.В., Пачурин Г.В. Оптимизация состава этанола-топливной эмульсии для использования в дизельных двигателях // Известия МГТУ «МАМИ». 2020. № 3 (45). С. 41–47. DOI: 10.31992/2074-0530-2020-45-3-41-47.

Введение

Использование альтернативных топлив биологического происхождения следует считать делом уже самой ближайшей перспективы. К настоящему времени исследователями всего мира накоплено значительное количество данных, сопровождающих применение биотоплив в виде добавки к нефтяному моторному дизельному топливу (ДТ) [1]. Исследовано значительное количество составов, объемов замещаемого этанолом дизельного топлива, поверхностно-активных веществ (ПАВ) и других применяемых присадок [2–4]. При этом основной акцент делается на создание все более новых, более высококонцентрированных составов топливных эмульсий, с применением

ранее неиспользованных добавок к топливу. Получаемый эффект обосновывается объемами экономии ДТ и снижением уровня экологической опасности. Тем не менее, до настоящего времени не определены целесообразные пределы замещения ДТ этанолом. Целью настоящей работы явилась оптимизация состава этанола-топливной эмульсии (ЭТЭ) на основе анализа целого комплекса ограничений.

Цель и задачи

С учетом глубины проблемы, в первую очередь, необходимо рассматривать создание ЭТЭ с целым рядом необходимых свойств, что возможно только в случае применения комплексной присадки. Присадка должна не только

стабилизировать ЭТЭ и воздействовать на процесс ее сгорания в цилиндре дизеля, но и сводить к минимуму свое влияние на процессы долговечности деталей дизеля.

Методы исследования

Для решения поставленных задач было определено несколько направлений.

Первоначально был проведен теоретический анализ известной базы топливных присадок, обоснование и выбор добавок нового типа.

Работоспособность форсунок 455.1112010-50 определялась на стенде V-107 CR. Исследовались и оценивались следующие показатели: давление начала впрыскивания, подвижность иглы, качество распыливания топлива, герметичность по запирающему конусу. В качестве технологических составов использовались смеси, содержащие от 0–100 % ДТ, замещаемые 100–0 % этанола с добавкой 1 % присадки MoS₂.

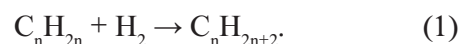
Обобщенные экспериментальные данные были получены на основе стендовых испытаний дизеля 4ЧН 11,0/12,5 на моторном стенде SAK N670. Использовалось дизельное топливо по ГОСТ 302-2013 и ЭТЭ различного состава. В процессе испытаний производилось индентирование дизеля, записывались и обрабатывались мощностные, экономические и экологические показатели.

Теоретические исследования

Проведенный теоретический анализ [5] позволил отказаться от использования нитратных, сукцинимидных, пероксидных и других широко применяемых в испытаниях типов присадок. Дело в том, что присадки указанных типов действуют в качестве модификаторов воспламенения преимущественно на начальных стадиях процесса горения. Поэтому они практически не влияют на время сгорания и не решают проблему жесткости работы двигателя кардинальным образом. Применительно к работе дизеля целесообразнее присадки другого типа – улучшающие равномерность процесса горения путем ингибирования стадии разветвления цепи [6]. Рассмотрим, в частности, одну из них – дисульфид молибдена MoS₂.

Известно, что содержание нафтен в дизельном топливе составляет от 20 до 60 %. В структуре MoS₂ (рис. 1) имеется три типа атомов серы с разной координацией по молибдену. Часть ионов Мо локализована в ча-

стично недостроенных тригональных призмах – на торцевых гранях и углах слоев. Предположительно кинетические цепи обрываются по реакциям пероксидных радикалов с дисульфидом молибдена на поверхности его частиц, что выражается в присоединении радикалов к выступающим атомам молибдена. В результате замедляется процесс окисления топлива. Процесс горения растягивается во времени, нарастание температуры и давления происходит более плавно, что эквивалентно увеличению цетанового числа. Кроме того, MoS₂ играет роль катализатора гидрокрекинга, который может происходить, например, согласно уравнению:



Подобным образом при гидрировании циклопентана раскрывается цикл с образованием н-пентана. Так как, при равном числе атомов углерода, цетановое число циклического углеводорода в среднем на 20...40 единиц меньше, чем у соответствующего алкана, это представляет собой частный случай общей тенденции повышения цетанового числа с ростом относительного числа атомов водорода (H) в молекуле углеводорода [6]. Таким образом, результатом гидрокрекинга является повышение цетанового числа топлива.

Дисульфид молибдена, обладая высокими антифрикционными свойствами из-за своей слоистой структуры, обычно применяется в качестве твердой смазки. При этом износы трущихся деталей снижаются на 30...50 % даже в условиях граничной смазки. Тем самым нивелируется ухудшение смазывания трущихся пар при использовании ЭТЭ и снижение дол-

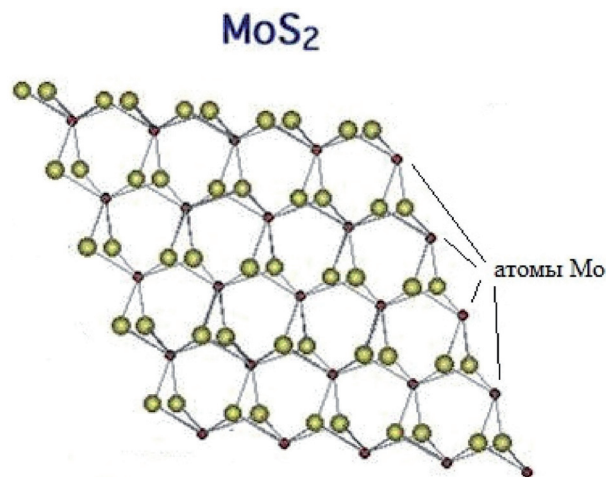


Рис. 1. Структура дисульфида молибдена

говечности деталей. Учитывая, что дисульфид молибдена практически не растворяется в спирте, его присутствие в ЭТЭ также может быть оправдано необходимостью сохранения смазывающих свойств

Ранее применение MoS_2 в качестве стабилизатора ЭТЭ было обосновано до границы существования обратных эмульсий типа «вода-в-масле» – 50...55 % масс. – вследствие его избирательного смачивания и прилипания к дисперсионным каплям [7, 8]. Анализ проведенных исследований стабильности высококонцентрированных ЭТЭ [9] позволил установить, что на границе фазового перехода имеет место всплеск времени их существования. Вполне резонно предположить, что в таких условиях образуется двойной липидный слой – «внешняя среда-масло-спирт-масло». Каркасом слоя служат добавки MoS_2 , взаимодействующего с молекулами воды (спирта) и координирующего гомологические группы ДТ (масла). В результате имеет место повышение поверхностного натяжения с образованием весьма термодинамически устойчивой конструкции.

При обращении дисперсионной фазы в дисперсионную среду эффективность действия MoS_2 в качестве стабилизатора ЭТЭ падает.

Результаты и обсуждение

Одним из ключевых вопросов остается работоспособность топливоподающей аппаратуры для обеспечения устойчивой работы дизеля на ЭТЭ.

Повышение температуры смесового топлива (рис. 2) вызывает снижение давления начала подъема иглы форсунки из расчета 0,5 МПа на каждые 50 градусов повышения температуры.

Присутствие этанола в топливе уже на уровне 40 % визуально показывает снижение параметров дальноточности топливного факела.

Из графика (рис. 3) также видно, что с увеличением процентной доли вводимого в смесь этанола показатели гидравлической плотности распылителей увеличиваются в 1,5–2 раза. Наряду с этим, на 5...8 % снижается давление начала впрыскивания топлива. Герметичность прецизионной пары «игла-конус» по запирающему конусу в опыте с чистым дизельным топливом составляет 110 секунд, с увеличением доли этанола в этаноле-топливной эмульсии герметичность пары падает, и для случая чистого этанола уже составляет 10 секунд.

Учитывая, что этот параметр напрямую обеспечивает наличие или отсутствие подвпрыскиваний, увеличение неравномерности подачи, сдвиг угла начала подачи топлива, вызывая неработоспособность дизеля, снижение его ниже 15–25 секунд (45–55 % этанола в ЭТЭ) вряд ли целесообразно.

На рис. 4 приведены скоростные характеристики широко используемого в народном хозяйстве дизеля 4ЧН 11,0/12,5 (Д-245) при его работе на чистом дизельном топливе и ЭТЭ с содержанием 40 % и 50 % масс. этанола, соответственно.

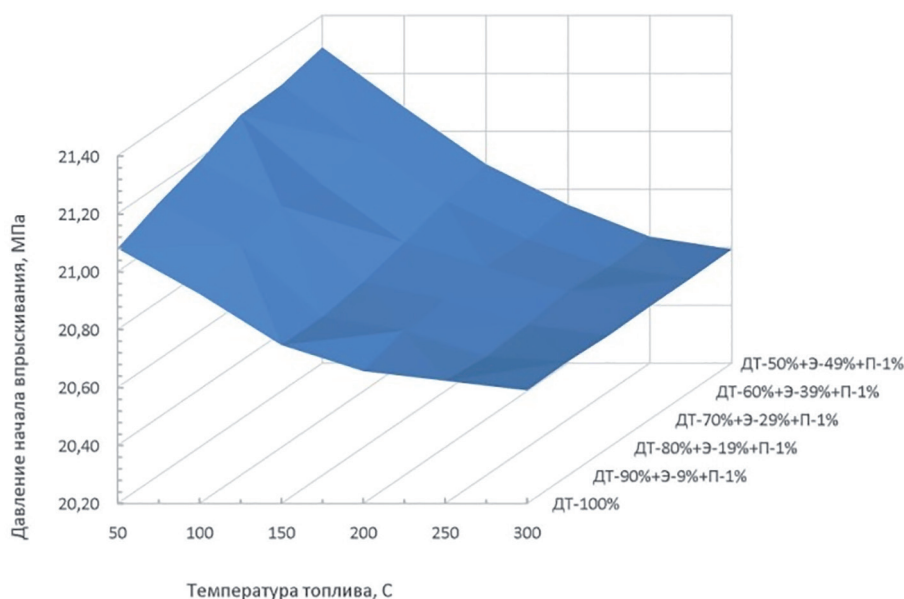


Рис. 2. Зависимость давления начала впрыскивания от содержания этанола и температуры топлива

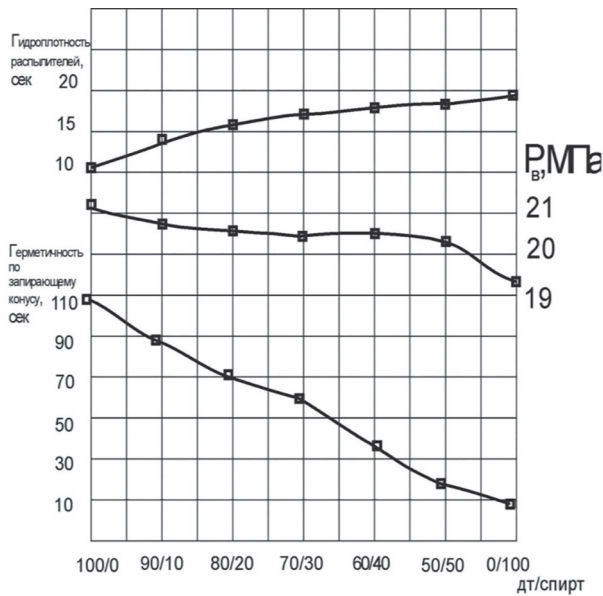


Рис. 3. Сравнительные показатели работы топливной форсунки

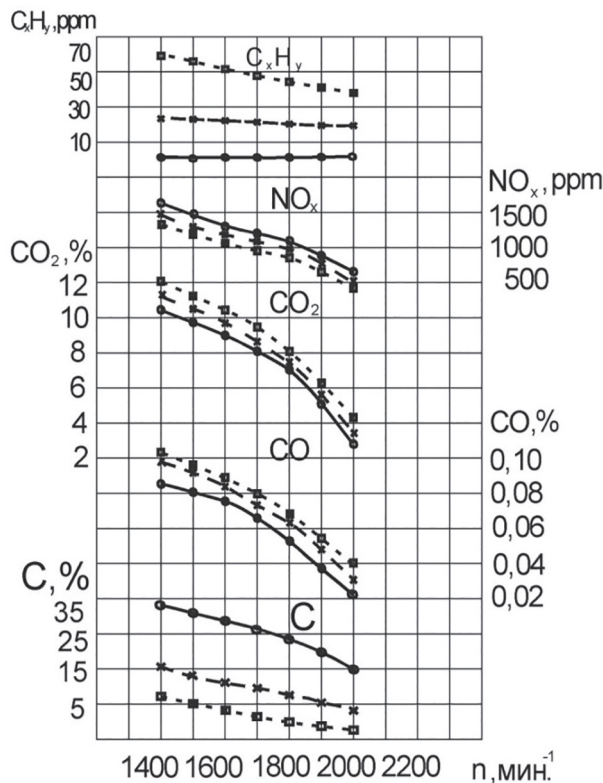


Рис. 4. Скоростные характеристики дизеля 4ЧН 11,0/12,5:

○ — дизельное топливо;
 ✕ — 40 % этанола в эмульсии;
 □ — 50 % этанола в эмульсии

Как видно из представленных данных, работа дизеля в номинальном режиме при частоте вращения коленчатого вала $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$ на чистом ДТ сопровождается содержанием сажи в отработавших газах (ОГ) на уровне

23 %. В случае присутствия в ЭТЭ 40 % этанола эта цифра уже составляет 6 % (снижение на 74 %). Увеличение содержания этанола в ЭТЭ до 50 % сопровождается выбросом сажи в объеме 2,5 % – дополнительное снижение составляет всего 15 %.

Для суммарных оксидов азота эти цифры, соответственно, равны – для случая работы на чистом ДТ – 1120 ppm, для случая работы на ЭТЭ с содержанием 40 % этанола – 900 ppm (снижение на 20 %), для случая работы на ЭТЭ с содержанием 50 % этанола – 810 ppm (дополнительное снижение на 7%).

Вместе с увеличением присутствия этанола в ЭТЭ имеет место прогрессивный рост эмиссии в ОГ других токсичных компонентов – оксидов углерода CO, диоксидов углерода CO₂ и несгоревших углеводородов C_xH_y. Таким образом, повышение экологического эффекта от увеличения доли этанола в ЭТЭ существенно замедляется.

В таблице 1 приведены обобщенные сравнительные данные стендовых испытаний дизеля 4ЧН 11,0/12,0 при работе на различных составах топлива [10–14].

Как видно из данных таблицы, при условии сохранения мощностных показателей работы дизеля на уровне паспортных значений, равномерный рост присутствия этанола в ЭТЭ вызывает постепенное снижение эффекта замещения ДТ добавочным топливом. Так, на малых концентрациях, каждые 10 % этанола в топливе экономят 9 % ДТ. С ростом концентрации этанола в ЭТЭ цифра экономии снижается до 8,5 % на 10% добавки этанола. И, при достижении состава 50 % ДТ + 50 % Э, экономия ДТ составляет уже 8 % на 10 % добавки этанола. Естественно предположить, что дальнейшее увеличение концентрации этанола в ЭТЭ будет сопровождаться все меньшим значением экономии замещаемого им нефтяного топлива.

Вместе с тем прогрессивно увеличиваются суммарные затраты на создание и хранение готовой к применению ЭТЭ, подготовку и обслуживание топливоподающей аппаратуры, изменяются показатели рабочего процесса, влияющие на надежность и долговечность дизеля.

Выводы

1. С учетом современного наличия специальных присадок для спиртосодержащих топлив, объем замещаемого этанолом дизельного топлива в эмульсии следует ограничить

Таблица 1

Эффективные показатели дизеля 4ЧН 11,0/12,0 при работе на различных составах топлива

Состав топлива	Параметры работы дизеля				
	Мощность, кВт	Эффективный КПД, %	Крутящий момент, Н×м	Часовой расход суммарного топлива, кг/ч	Экономия часового расхода дизельного топлива, %
100% ДТ	70	35	370	16,5	-
80%ДТ + 20%Э	69,5	35	370	17,1	18
60%ДТ + 40%Э	69	34	369	17,7	17
50%ДТ + 50%Э	69	34	368	18,6	8

на уровне 45...55 %, масс. Необходима разработка комплексной присадки, учитывающей широкий спектр свойств дополнительного спиртового топлива.

2. Работа дизельной ТПА на спиртосодержащих топливах с повышенным (свыше 50 %) содержанием этанола влечет за собой заметные изменения ее технологических показателей, что может существенно снизить надежность и долговечность дизеля.

3. Относительное улучшение эффективных и экологических показателей дизеля при его работе на топливах с ростом присутствия до 50 % этанола (в массовых долях) постепенно снижается в сравнении с показателями, полученными при работе на топливе с меньшей его концентрацией.

4. Работа дизеля на топливах с содержанием этанола свыше 50...60 % в массовых долях потребует реализации дополнительных мероприятий, что может нивелировать полученный положительный эффект.

Литература

- Марков В.А., Девянин С.Н., Зыков С.А., Гайдар С.М. Биотоплива для двигателей внутреннего сгорания: монография. М.: НИЦ «Инженер», 2016. 292 с.
- Льотко В., Луканин В.Н., Хачиян А.С. Применение альтернативных топлив в двигателях внутреннего сгорания. М.: МАДИ(ГУ), 2000. 311 с.
- Веденев В.И., Арутюнов В.С. Современные тенденции в использовании спиртов и спиртовых смесей // Газовая промышленность. 1999. № 11. С. 39.
- Карташевич А.Н., Плотников С.А., Гурков Г.Н. Применение этанолсодержащих топлив в дизеле. Часть I. Монография. Киров: Типография «Авангард», 2011. 116 с.
- Карташевич А.Н., Плотников С.А., Смольников М.В. Исследование свойств новых топлив на основе этанола // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии, 2017. № 1. С. 114–117.
- Ахметов С.А. Технология глубокой переработки нефти и газа. Уфа: Гилем, 2002. 672 с.
- Рибиндер П.А. Поверхностные явления в дисперсных системах. Коллоидная химия. Избранные труды. М.: Наука, 1978. 368 с.
- Эмульсии. Под ред. Ф. Шермана. М.: Химия, 1972. С. 75–122.
- Втюрина М.Н., Пляго А.В. Исследование свойств этанола-топливных эмульсий с присадками. // Транспортные системы. 2017. № 2 (5). С. 51–54.
- Плотников С.А., Куимов Е.А., Пляго А.В., Карташевич А.Н., Втюрина М.Н. Топливная эмульсия. Патент РФ № 2668225, МПК С10L 1/32.
- Плотников С.А., Пляго А.В. О применении спирто-топливных эмульсий в ДВС. ОБЩЕСТВО. НАУКА. ИННОВАЦИИ (НПК-2017) [Электронный ресурс]: сб. статей: Всерос. ежегод. науч.-практ. конф., 1–29 апреля 2017 г. Киров: [Науч. изд-во ВятГУ], 2017. С. 1861–1868.
- Плотников С.А., Смольников М.В., Карташевич А.Н., Бирюков А.Л. Модернизация системы питания тракторного дизеля 4ЧН 11,0/12,5 для работы на этанола-топливной эмульсии. Молочнохозяйственный вестник, 2017. № 2. С. 110–118.
- Плотников С.А., Смольников М.В., Малышкин П.Ю. Определение токсичности и дымности отработавших газов дизеля 4ЧН 11,0/12,5 при работе на этанолсодержащем топливе // Транспортные системы, 2018. № 2. С. 12–18.
- Плотников С.А., Карташевич А.Н., Смольников М.В. Исследование энергетических показателей трактора Беларус-922 при работе

на топливе с добавками этанола // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева: Нижний Новгород, 2018. № 1 (120). С. 123–128.

References

1. Markov V.A., Devyanin S.N., Zykov S.A., Gaydar S.M. *Biotopliva dlya dvigateley vnutrennego sgoraniya: monografiya* [Biofuels for internal combustion engines]. Moscow: NITs «Inzhener» Publ., 2016. 292 p.
2. L'otko V., Lukanin V.N., Khachiyani A.S. *Primeneniye al'ternativnykh topliv v dvigatelyakh vnutrennego sgoraniya* [The use of alternative fuels in internal combustion engines]. Moscow: MADI(TU) Publ., 2000. 311 p.
3. Vedenev V.I., Arutyunov V.S. Modern trends in the use of alcohols and alcohol mixtures. *Gazovaya promyshlennost'*. 1999. No 11, pp. 39. (in Russ.).
4. Kartashevich A.N., Plotnikov S.A., Gurkov G.N. *Primeneniye etanolsoderzhashchikh topliv v dizele* [The use of ethanol-containing fuels in diesel]. Chast' I. Monografiya. Kirov: Tipografiya «Avangard» Publ., 2011. 116 p.
5. Kartashevich A.N., Plotnikov S.A., Smol'nikov M.V. Study of the properties of new fuels based on ethanol. *Vestnik Belorusskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii*, 2017. No 1, pp. 114–117. (in Russ.).
6. Akhmetov S.A. *Tekhnologiya glubokoy pererabotki nefi i gaza* [Deep processing technology of oil and gas]. Ufa: Gilem, 2002. 672 p.
7. Rebinder P.A. *Poverkhnostnyye yavleniya v dispersnykh sistemakh. Kolloidnaya khimiya. Izbrannyye trudy* [Surface phenomena in dispersed systems. Colloidal chemistry. Selected works]. Moscow: Nauka Publ., 1978. 368 p.
8. *Emul'sii* [Emulsions]. Pod red. F. Shermana. Moscow: Khimiya Publ., 1972, pp. 75–122.
9. Vtyurina M.N., Plyago A.V. Study of the properties of ethanol-fuel emulsions with additives. *Transportnyye sistemy*. 2017. No 2 (5), pp. 51–54. (in Russ.).
10. Plotnikov S.A., Kuimov Ye.A., Plyago A.V., Kartashevich A.N., Vtyurina M.N. *Toplivnaya emul'siya* [Fuel emulsion]. Patent RF No 2668225, MPK C10L 1/32.
11. Plotnikov S.A., Plyago A.V. The use of alcohol-fuel emulsions in internal combustion engines. *OBSHCHESTVO. NAUKA. INNOVATSII (NPK-2017): sb. statey: Vseros. yezhegod. nauch.-prakt. konf., 1–29 ap-relya 2017 g.* [SOCIETY. SCIENCE. INNOVATIONS (NPK-2017) [Electronic source]: Collection of articles of All-Russian Annual Scientific and Practical Conference, April 1–29, 2017]. Kirov: Nauch. izd-vo VyaTGU Publ., 2017, pp. 1861–1868. (in Russ.).
12. Plotnikov S.A., Smol'nikov M.V., Kartashevich A.N., Biryukov A.L. Modernization of the power supply system of a tractor diesel engine 4ChN 11.0/12.5 for operation on ethanol-fuel emulsion. *Molochnokhozyaystvennyy vestnik*, 2017. No 2, pp. 110–118. (in Russ.).
13. Plotnikov S.A., Smol'nikov M.V., Malyshkin P.Yu. Determination of toxicity and opacity of exhaust gases of diesel engine 4ChN 11.0/12.5 when operating on ethanol-containing fuel. *Transportnyye sistemy*, 2018. No 2, pp. 12–18. (in Russ.).
14. Plotnikov S.A., Kartashevich A.N., Smol'nikov M.V. Investigation of the energy indicators of the Belarus-922 tractor when operating on fuel with ethanol additives. *Trudy NGTU im. R.E. Alekseyeva*: Nizhniy Novgorod, 2018. No 1 (120), pp. 123–128. (in Russ.).

OPTIMIZATION OF THE ETHANOL-FUEL EMULSION COMPOSITION FOR USE IN DIESEL ENGINES

DSc in Engineering **S.A. Plotnikov**¹, DSc in Engineering **A.N. Kartashevich**¹, **A.V. Plyago**¹,
DSc in Engineering **G.V. Pachurin**²

¹Vyatka State University, Kirov, Russia

²Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia
PlotnikovSA@bk.ru

The use of alternative fuels of biological origin, in particular, alcohols, should be considered as a matter for the very near future. Scientists around the world are exploring more and more concentrated compositions of ethanol-fuel emulsions with various additives. However, to date, the reasonable limits of substitution of diesel fuel with ethanol have not been determined. Taking into account the depth of the problem, first of all, it is necessary to consider the creation of ethanol-fuel emulsions with a number of necessary properties, which is possible only if additives are used. The analysis of the additives used in the fuel showed that the directional effect of the additives is usually very narrow. Accordingly, a complex action additive is required to ensure a number of necessary properties of ethanol-fuel emulsions. The tests were carried out in several stages. The stability of the new fuel composition was investigated using various additives. The additive with the best performance was determined and adopted for further use in experiments. Further, the comparative tests of the operation of the fuel supply equipment, both on the basic fuel and on new fuel compositions, were carried out. The final stage of the research was to check the parameters of the engine operability as a whole when working at the main load and speed modes. The article considers a possible variant of the action of a complex additive based on molybdenum disulfide MoS₂ as a combustion ignitor. A hypothetical type and mechanism of reactions occurring in the combustion chamber of a diesel engine is presented. The results of experiments on the performance of injectors 455.1112010-50 on various compositions of new fuels and under changing conditions are shown. Environmental performance indicators of the 4ChN 11,0/12,5 engine are considered when operating according to the external speed characteristic on various fuel compositions. Based on the results of the data analysis, conclusions were drawn about the limitation of the presence of ethanol in the mixture and the substitution limit for the main fuel was justified.

Keywords: diesel, alternative fuel, ethanol-fuel emulsion, fuel additive, injection, bench tests.

Cite as: Plotnikov S.A., Kartashevich A.N., Plyago A.V., Pachurin G.V. Optimization of the ethanol-fuel emulsion composition for use in diesel engines. *Izvestiya MGTU «MAMI»*. 2020. No 3 (45), pp. 41–47 (in Russ.). DOI: 10.31992/2074-0530-2020-45-3-41-47.