# Энергетика и электротехника

УДК 621.43

# Исследование работоспособности дизельной форсунки при работе на обратных топливных эмульсиях

**Ш.В. Бузиков, М.В. Мотовилова**

ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет»

# Performance of a diesel injector operating on reverse fuel emulsions

**Sh.V. Buzikov, M.V. Motovilova**

Vyatka State University

В условиях увеличения спроса на энергоресурсы растет интерес к альтернативным видам топлива. Недостаточное смазывание элементов топливной аппаратуры при использовании этаноло-топливной эмульсии осложнено тем, что на сегодняшний день отсутствует единый подход к определению индекса смазывающей способности топлива. Приведены результаты исследования работоспособности дизельной форсунки на обратных топливных эмульсиях на основе дизельного топлива и этанола. Предложен метод определения предельного значения смазывающей способности обратной топливной эмульсии. Установлена математическая зависимость между индексом смазывающей способности топлива и подвижностью иглы распылителя. Методы исследования включали в себя экспериментальные испытания на стенде М107-CR. Экспериментально подтверждено теоретическое предположение, что содержание этанола в топливной эмульсии не должно превышать 80,97 % по массе. Практическая значимость исследования заключается в возможности оптимизации состава топливной эмульсии для применения в дизельных двигателях. Результаты исследования позволяют определить допустимые концентрации компонентов топливной эмульсии, обеспечивающих работу топливной аппаратуры.

**EDN:** HHOWLS, https://elibrary/hhowls

**Ключевые слова:** дизельная форсунка, этанол, индекс смазывающей способности, звонкость

The relevance of the work is due to the growing interest in alternative fuels in the face of increasing demand for energy resources. Insufficient lubrication of the elements of fuel equipment when using ethanol—fuel emu*LSI*on is further complicated by the fact that today there is no unified approach to determining the *LSI* of fuel. The paper presents the results of a study of the operability of a diesel nozzle on reverse fuel emu*LSI*ons based on diesel fuel and ethanol. Disclosed is a method of determining the lubricity limit value of a fuel emu*LSI*on. Mathematical relationship between fuel lubricity index and sprayer needle mo-

bility is established. The study methods included experimental tests on a M107-CR bench. Theoretical assumptions have been experimentally confirmed — the content of ethanol in the fuel emu*LSI*on should not exceed 80.97% of the total mass. Practical importance lies in the possibility of optimizing fuel emu*LSI*on compositions for use in diesel engines. The results of the study make it possible to determine the permissible concentrations of the fuel emu*LSI*on components that ensure the operation of the fuel equipment.

**EDN:** HHOWLS, https://elibrary/hhowls

**Keywords:** diesel nozzle, ethanol, lubricating method index, sonority

Несмотря на интенсивное развитие электрификации транспорта, дизельный двигатель остается одним из самых востребованных силовых установок благодаря высоким эксплуатационным характеристикам и надежности.

Интерес к возобновляемым источникам энергии обусловлен увеличением спроса на энергоресурсы. Применение этаноло-топливной эмульсии (ЭТЭ) в дизельном двигателе [1, 2] позволяет обойтись без его существенной модернизации. ЭТЭ, состоящая из дизельного топлива (ДТ) и добавки в виде этанола (Э) [3–5], относится к типу обратных топливных эмульсий (ОТЭ).

Основные эксплуатационные показатели дизельного двигателя зависят от работоспособности топливоподающей аппаратуры (ТПА).

Одним из основных параметров, влияющим на работоспособность ТПА является подвижность иглы распылителя дизельной форсунки, которая подлежит контролю по ГОСТ 10579–2017. Этот параметр характеризует способность иглы свободно перемещаться внутри корпуса форсунки, обеспечивая правильное дозирование и подачу топлива. Нарушения подвижности иглы приводят к ухудшению качества распыливания и повышенному износу элементов форсунки.

Другой важный параметр, влияющий на работоспособность ТПА, — индекс смазывающей способности (Lubricity Severity Index — *LSI*). Этот индекс позволяет оценить способность топлива снижать трение и износ в элементах ТПА. Низкое значение *LSI* увеличивает вероятность быстрого износа, повреждений или заклинивания компонентов ТПА.

Современные дизельные форсунки эксплуатируются в условиях граничного трения, при котором отсутствует полноценная масляная пленка между взаимодействующими поверхностями [6, 7]. В результате недостаточного смазывания усиливается трение и ускоряется износ иглы распылителя и седла клапана форсунки, что приводит к снижению качества распыливания и увеличению количества заеданий иглы распылителя форсунки.

Существует зависимость между показателем подвижности иглы и *LSI* топлива. Чем выше значение *LSI*, тем меньше вероятность заеданий при движении иглы и возникновения задиров.

В статье [8] рассмотрены аналитические подходы к решению вопросов, связанных со смазывающими свойствами топлива. Авторами работ [9, 10] выявлено влияние добавки Э в ДТ на его смазывающую способность. Испытания методом HFRR (High-Frequency Reciprocating Rig) согласно ISO 12156-1 показали, что добавление в ДТ до 14 % Э снижает кинематическую и динамическую вязкость топлива, но не оказывает отрицательного воздействия на его смазывающие свойства [10]. Стандартные тесты HFRR имеют значительные ограничения, так как по результатам испытаний показывают нелинейное изменение смазывающих характеристик при повышении содержания Э в ДТ [11]. Полученные результаты находятся в противоречии с выводами предыдущих исследований, где использован стандартный метод HFRR. В публикациях [11, 12] отмечено, что традиционный метод HFRR не способен полноценно отразить особенности смазывающей способности ЭТЭ.

Подтвержденное авторами работы [13] ухудшение противоизносных свойств спиртов подчеркивает необходимость разработки специфических присадок для улучшения смазывающей способности топлива на спиртовой основе. Наиболее действенными мерами признаны добавление углеводородов, использование специализированных антифрикционных присадок и регулирование температуры топлива.

Однако на сегодняшний день отсутствует единый подход к определению *LSI* топлива. Единой формулы для расчета минимального значения *LSI*, который определяет подвижность иглы распылителя форсунки в граничном режиме трения, не существует. *LSI* представляет собой интегральную оценку способности топ-

лива минимизировать коэффициент трения и износ механических элементов ТПА. Ухудшение подвижности иглы приводит к увеличению шумовых характеристик впрыскивания. Хорошее распыливание топлива сопровождается четким и однородным акустическим сигналом — так называемой звонкостью, тогда как изменение подвижности иглы нарушает процесс впрыскивания, вызывая нестабильность подачи топлива и появление посторонних шумов.

Цель работы — определение предельного значения смазывающей способности ОТЭ, обеспечивающей работоспособность дизельной форсунки.

Для реализации этой цели поставлены следующие задачи: теоретически определить предельное значение смазывающей способности ОТЭ, обеспечивающей работоспособность дизельной форсунки, рассчитать предельные значения смазывающей способности ОТЭ и экспериментально подтвердить теоретические предположения.

**Математическое описание смазывающей способности ОТЭ.** Минимальное значение *LSI*, при котором движущая сила иглы распылителя форсунки $F_{\text{дв}}$, Н, преодолевает силу трения $F_{\text{тр}}$, Н, в граничном режиме можно определить из условия неравенства

$$F_{\text{дв}} > F_{\text{тр}}. \quad (1)$$

Соблюдение неравенства (1) обеспечивает предельное условие, при котором игла не заедает и имеет минимальную необходимую подвижность.

Движущая сила иглы

$$F_{\text{дв}} = F_{\text{г.с}} - F_{\text{пр}} - F_{\text{и}} - F_{\text{г.д}}, \quad (2)$$

где $F_{\text{г.с}}$ — гидростатическая сила, Н; $F_{\text{пр}}$ — усилие пружины иглы, Н; $F_{\text{и}}$ — сила инерции иглы, Н; $F_{\text{г.д}}$ — сила вязкого сопротивления при движении иглы в зазоре (гидродинамическая сила), Н.

Усилие пружины иглы

$$F_{\text{пр}} = k_{\text{пр}} x_{\text{и}}, \quad (3)$$

где $k_{\text{пр}}$ — жесткость пружины иглы, Н/м; $x_{\text{и}}$ — перемещение иглы, м.

Сила инерции иглы

$$F_{\text{и}} = m_{\text{и}} a, \quad (4)$$

где $m_{\text{и}}$ — масса иглы, кг; $a$ — ускорение иглы, м/с$^2$.

Гидростатическая сила

$$F_{\text{г.с}} = \frac{\pi d_{\text{и}}^2}{4}\left(\rho_{\text{впр}} - \rho_{\text{возд}}\right), \quad (5)$$

где $d_{\text{и}}$ — диаметр иглы распылителя форсунки, м; $\rho_{\text{впр}}$ — давление среды, куда происходит впрыскивание, Па; $\rho_{\text{возд}}$ — давление впрыскивания, Па.

Расчет гидродинамической силы при движении иглы в зазоре выполнен с использованием уравнения Навье — Стокса для тонкого слоя. За базовую модель выбрано течение в узком кольцевом зазоре. Рассмотрено движение иглы распылителя дизельной форсунки диаметром $d_{\text{и}}$ в направляющей с зазором

$$h = \frac{\left(D - d_{\text{и}}\right)}{4}, \text{ м},$$

где $D$ — внутренний диаметр направляющей, м.

Так как зазор $h$ пренебрежимо мал по сравнению с диаметром иглы $d_{\text{и}}$, приняты следующие допущения:

• течение ОТЭ — ламинарное (число Рейнольдса $\text{Re} \ll 2300$);

• вязкость ОТЭ — постоянная;

• симметрия конструкции иглы распылителя и седла — осевая;

• инерцией движения ОТЭ пренебрегаем в силу малой величины;

• давление вдоль зазора между седлом и иглой распылителя форсунки — постоянное, т. е. градиент давления вдоль зазора (оси $z$) равен нулю, Па/м: $dp/dz = 0$.

Тогда уравнение Навье — Стокса в цилиндрических координатах для осевого течения в кольцевом канале в упрощенном виде в проекции на ось $z$ имеет вид

$$\mu\left[\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial v_z}{\partial r}\right)\right] = \frac{dp}{dz}, \quad (6)$$

где $\mu$ — динамическая вязкость ОТЭ, Па·с; $r$ — радиальная координата, м, $d_{\text{и}}/2 / \le r \le D/2$;
$v_z$ — осевая скорость движения ОТЭ, м/с.

Принимаем следующие основные граничные условия:

• на поверхности иглы
$r = d_{\text{и}}/2$, $v_z = -v$ (условие движения иглы),

• на стенке направляющей
$r = D/2$, $v_z = 0$ (условие прилипания иглы),

где $v$ — скорость перемещения иглы распылителя вдоль оси форсунки, м/с; знак минус в граничном условии соответствует направлению

движения иглы относительно неподвижной стенки направляющей.

Дважды интегрируя уравнение (6) и применяя граничные условия, получаем профиль скорости

$$v_z(r)=\frac{1}{4\mu}\frac{dp}{dz}\left[r^2-\left(\frac{D}{2}\right)^2\right]+v\frac{\ln\frac{r}{D/2}}{\ln\frac{d_и}{D}}. \quad (7)$$

Так как градиент давления вдоль оси $z$ отсутствует $\left(dp/dz=0\right)$, выражение (7) приобретает вид

$$v_z\left(r\right)=v\frac{\ln\frac{r}{D/2}}{\ln\frac{d_и}{D}}. \quad (8)$$

Объемный расход ОТЭ через зазор

$$Q_{ОТЭ}=\int\limits_{d_и/2}^{D/2}2\pi r v_z(r)dr. \quad (9)$$

Гидростатическая сила — это интеграл касательных напряжений $\tau_{rz}$ по поверхности иглы $S$:

$$F_{г.д}=\int_S\tau_{rz}dA. \quad (10)$$

Здесь

$$\tau_{rz}=\mu\frac{\partial v_z}{\partial r}\bigg|_{r=d_и/2}, \quad (11)$$

где $A$ — площадь поверхности иглы, $A=\pi d_и L$ ($L$ — длина участка контакта иглы с направляющей), м.

С учетом соотношений (7)–(9) и (11) выражение (10) преобразуется следующим образом:

$$F_{г.д}=\frac{2\pi\mu Lv}{\ln\frac{D}{d_и}}\left[1+\frac{D^2}{D^2-d_и^2}\frac{h^2}{\mu v}\frac{dp}{dz}\right]. \quad (12)$$

При отсутствии градиента давления вдоль оси $z$ $\left(dp/dz=0\right)$ формула (12) приобретает вид

$$F_{г.д}=\frac{2\pi\mu Lv}{\ln\frac{D}{d_и}}. \quad (13)$$

Подставляя выражения (3)–(5) и (13) в формулу (2), получаем выражение для движущей силы иглы

$$F_{дв}=\frac{\pi d_и^2}{4}\left(p_{впр}-p_{возд}\right)-k_п x_и-m_и a-\frac{2\pi\mu Lv}{\ln\frac{D}{d_и}}. \quad (14)$$

В граничном режиме сила трения

$$F_{тр}=f_{тр}F_{норм}, \quad (15)$$

где $f_{тр}$ — коэффициент трения, зависящий от $LSI$ и физико-химических факторов; $F_{норм}$ — нормальная сила контакта.

Согласно модели Герца, нормальная сила контакта для точечного/линейного контакта включает в себя упругую деформацию

$$\frac{E}{2}\sqrt{R_{пр}\delta_{max}}$$

и контактное давление, определяемое выражением

$$p_{конт}A_{эф}$$

и равное усилию пружины иглы распылителя

$$p_{конт}A_{эф}=k_п x_и,$$

где $E$ — приведенный модуль упругости, Па; $R_{пр}$ — приведенный радиус кривизны контакта, м; $\delta_{max}$ — максимальная деформация в контакте, м; $p_{конт}$ — контактное давление, Па; $A_{эф}$ — эффективная площадь контакта, м$^2$.

С учетом этого выражение для нормальной силы контакта имеет вид

$$F_{норм}=\frac{E}{2}\sqrt{R_{пр}\delta_{max}}+k_п x_и. \quad (16)$$

Здесь

$$E=\frac{2E_1E_2}{E_1+E_2}; \quad (17)$$

$$R_{пр}=\frac{2R_1R_2}{R_1+R_2}, \quad (18)$$

где $E_1$, $E_2$ — модули упругости сопрягаемых деталей, Па; $R_1$, $R_2$ — радиусы контактирующих тел, м.

Подставляя выражения (17) и (18) в формулу (16), получаем

$$F_{норм}=\frac{2E_1E_2}{E_1+E_2}\sqrt{\frac{R_1R_2}{R_1+R_2}}\delta_{max}+k_п x_и. \quad (19)$$

На коэффициент трения $f_{тр}$ в граничном режиме оказывают влияние базовый коэффициент трения $f_о$, индекс смазывающей способности $LSI$ и адгезионная составляющая $f_{ад}$, зависящая от температуры и шероховатости поверхности:

$$f_{тр}=f_о e^{-k_{LSI}LSI}+f_{ад}e^{-\frac{Q}{RT}+aRa}. \quad (20)$$

Здесь $e^{-k_{LSI}LSI}$ — сомножитель, определяющий снижение трения с ростом $LSI$; $k_{LSI}$ — эмпири-

ческий коэффициент чувствительности трения к *LSI*, 1/ед. *LSI*; $e^{-Q/RT}$ — сомножитель, описывающий зависимость адгезии от температуры (уравнение Аррениуса); $Q$ — энергия активации адгезионного взаимодействия, Дж/моль; $R$ — универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К); $T$ — температура в зоне контакта, К; $e^{aRa}$ — сомножитель, определяющий зависимость адгезии от шероховатости ($a$ — коэффициент влияния шероховатости на адгезию, м$^{-1}$; $Ra$ — средняя шероховатость поверхности, м).

Подставляя выражения (20) и (19) в формулу (15), получаем

$$F_{\text{тр}} = f_{\text{о}} e^{-k_{LSI} LSI} +$$

$$+ f_{\text{ад}} e^{-\frac{Q}{RT}+aRa} \frac{E_1 E_2}{E_1 + E_2} \sqrt{\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}} \delta_{\max} + k_{\text{п}} x_{\text{и}}. \quad (21)$$

После подстановки выражений (14) и (21) в формулу (1) имеем

$$\frac{\pi d_{\text{и}}^2}{4} \left( p_{\text{впр}} - p_{\text{возд}} \right) - k_{\text{п}} x_{\text{и}} - m_{\text{и}} a - \frac{2\pi\mu L v}{\ln \frac{D}{d_{\text{и}}}} >$$

$$> f_{\text{о}} e^{-k_{LSI} LSI} +$$

$$+ f_{\text{ад}} e^{-\frac{Q}{RT}+aRa} \frac{E_1 E_2}{E_1 + E_2} \sqrt{\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}} \delta_{\max} + k_{\text{п}} x_{\text{и}}. \quad (22)$$

Выразим *LSI* из формулы (22) следующим образом: переносим все члены, кроме экспоненты с *LSI*, в левую часть; выносим $f_{\text{о}}$ в правой части формулы и делим обе части на $f_{\text{о}}$; переносим второй член в правой части влево; логарифмируем обе части (учитывая, что экспонента всегда положительна) и делим обе части неравенства на $-k_{LSI}$ (изменяя знак неравенства на противоположный); после математических преобразований получаем

$$LSI > \frac{1}{k_{LSI}} \times$$

$$\times \ln \left[ \frac{\frac{\pi d_{\text{и}}^2}{4} \left( p_{\text{впр}} - p_{\text{возд}} \right) - 2k_{\text{п}} x_{\text{и}} - m_{\text{и}} a - \frac{2\pi\mu L v}{\ln \frac{D}{d_{\text{и}}}}}{f_{\text{о}}} \right]. \quad (23)$$

$$f_{\text{ад}} e^{-\frac{Q}{RT}+aRa} \frac{E_1 E_2}{E_1 + E_2} \sqrt{\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}} \delta_{\max}$$

По формуле (23) определяем предельное значение смазывающей способности ОТЭ, обеспечивающее подвижность иглы распылителя, что гарантирует работоспособность дизельной форсунки.

**Методика экспериментального исследования.** Для верификации теоретических предположений на дизельной форсунке закрытого типа ФД-22.455.1112010-50 при работе на ОТЭ в соответствии с требованиями ГОСТ 10579–2017 проведено экспериментальное исследование. Форсунку жестко закрепляли на установке М107-CR, оборудованной прозрачной герметичной камерой для визуализации процесса впрыскивания (рис. 1). Использовали индуктивный датчик хода (подъема) иглы G80, работающий на основе изменения магнитного поля, индуцирующего напряжение в обмотке, при движении иглы форсунки.

Форма сигнала (напряжение) анализировалась блоком управления. Давление в магистралях высокого давления контролировалось резьбовым тензометрическим датчиком SS302 с чувствительным мембранным преобразователем (диапазон измерений 0…200 МПа с точностью не менее ±0,5 % верхней границы показаний). Регистрируемый электрический сигнал усиливался и обрабатывался коммутирующим усилителем IFM Electronic DN103, после чего подвергался цифровой обработке модулем NI CompactDAQ. Графическое отображение сигналов происходило в дифференциальном режиме в зависимости от амплитуды напряжения, что показано на рис. 2, где ось $X$ — время, с; ось $Y$ — амплитуда напряжения, В.

Подготовку ОТЭ проводили методом механического диспергирования с использованием электромиксера AMIXSY VG-022-K. Продолжи-

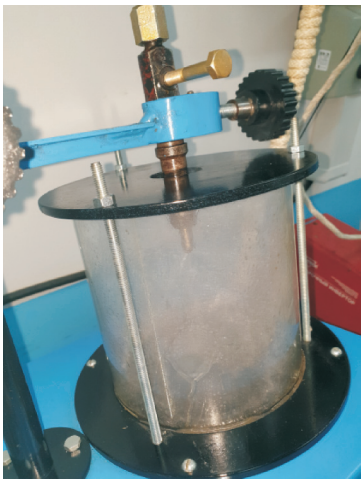


*Рис. 1.* Внешний вид камеры впрыскивания стенда М107-CR

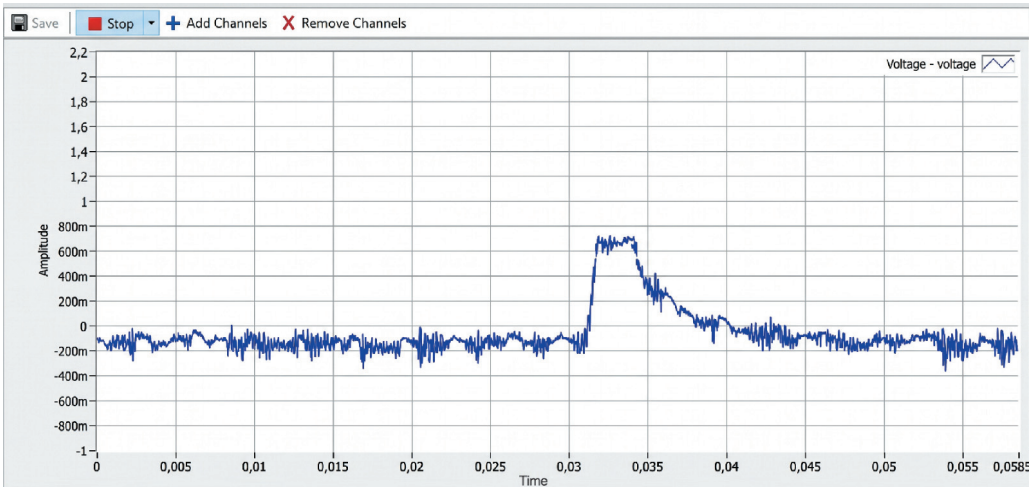



*Рис. 2.* Зависимость амплитуды напряжения от времени в момент впрыскивания ОТЭ, содержащего 60 % Э и 40 % ДТ

тельность гомогенизации составляла 5…10 мин, что обеспечивало формирование устойчивой мелкодисперсной ОТЭ с равномерной структурой. ОТЭ готовили непосредственно перед каждым циклом испытаний, что уменьшило эффект нестабильности свойств от времени.

В качестве компонентов ОТЭ выступали: ДТ по ГОСТ 32511–2013 (EN 590:2009); этиловый технический гидролизный ректификованный спирт Э по ГОСТ Р 55878–2013; присадка сукцинимид — по ТУ 21.10.20-063-82006400-2018. Исследовали смазывающую способность ОТЭ разного состава: 60 % Э + 40 % ДТ; 70 % Э + + 30 % ДТ; 80 % Э + 20 % ДТ; 90 % Э + 10 % ДТ.

Подвижность иглы распылителя оценивали путем многократного прокачивания ОТЭ через форсунку с частотой 30…40 цикл/мин и по звонкости в соответствии с требованиями ГОСТ 10579–2017 и ИСО 8984-2:1993.

Для каждого состава ОТЭ фиксировали изменения подвижности иглы распылителя индуктивным датчиком хода (подъема) иглы. При содержании в ОТЭ до 80 % Э игла распылителя была подвижной, и дизельная форсунка работала в штатном режиме. Впрыскивание сопровождалось звуком (звонкостью), характерным для конструктивного исполнения распылителя форсунки ФД-22.455.1112010-50.

При содержании в ОТЭ более 80 % Э фиксировали неполный подъем иглы или заклинивание иглы распылителя в седле форсунки из-за достижения предельных значений сил трения в прецизионной паре (рис. 3). Показатель звонкости, характеризующий качество подвижно-

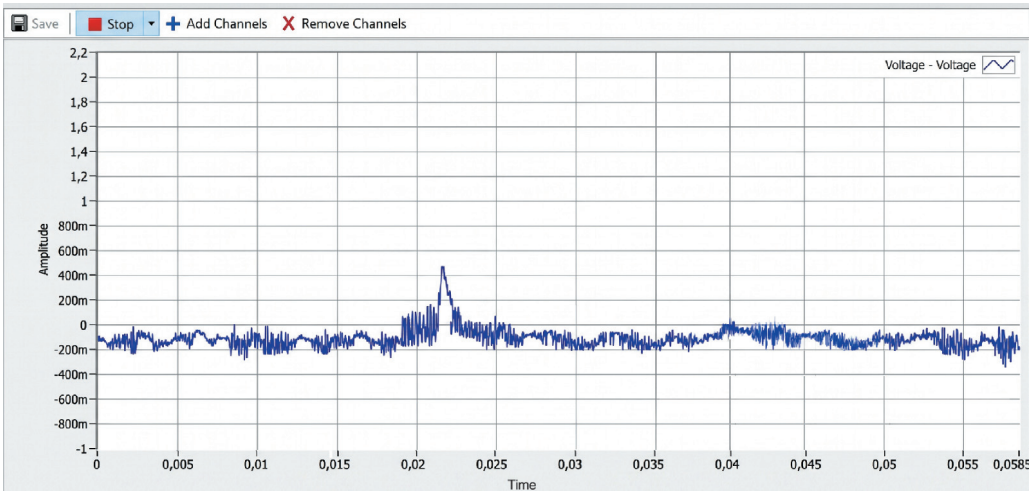



*Рис. 3.* Зависимость амплитуды напряжения от времени в момент впрыскивания ОТЭ, содержащего 80 % Э + 20 % ДТ

**Результаты определения предельного значения смазывающей способности ОТЭ**

| Параметр | Значение | Параметр | Значение | Параметр | Значение |
|---|---|---|---|---|---|
| $Q$, кДж/моль | 50 | $v$, м/с | 20 | $f_o$ | 0,6 |
| $d_и$, м | 0,0032 | $L$, м | 0,003 | $Ra$, мкм | 0,2 |
| $m_и$, кг | 0,020 | μ, Па·с | 0,00144 | $f_{ад}$, кДж/моль | 0,15 |
| $p_{впр}$, МПа | 21 | $k_п$, Н/мм | 280 | $LSI$ | 15,5 |
| $p_{возд}$, МПа | 0,1 | $R$, Дж/(моль·К) | 8,314 | – | – |

сти иглы распылителя, изменялся: звук не был характерным для конструктивного исполнения распылителя форсунки.

**Результаты.** Анализ результатов экспериментального исследования показал, что содержание Э в ОТЭ существенно влияет на подвижность иглы распылителя. При содержании в ОТЭ до 80 % Э по массе обеспечивался достаточный уровень смазывающей способности и подвижности иглы дизельной форсунки.

При содержании в ОТЭ более 80 % Э вязкость и плотность снижались, что приводило к увеличению трения между иглой распылителя и седлом форсунки. Смазывающая способность ОТЭ, обеспечивающая подвижность иглы распылителя, ухудшалась, что повышало риск неполного подъема или заклинивания иглы распылителя в седле форсунки из-за достижения предельных значений сил трения в прецизионной паре.

Принцип работы форсунки основан на балансе между давлением ОТЭ и усилием пружины, которая удерживает иглу распылителя в седле форсунки. Изменение реологических характеристик ОТЭ нарушает этот баланс, вследствие чего игла распылителя может подняться не полностью или произойдет ее заклинивание.

Полученные экспериментальные данные подтвердили сделанные ранее теоретические предположения. Для обеспечения необходимой смазывающей способности ОТЭ содержание Э не должно превышать 80 % общей массы ОТЭ. Предельные характеристики смазывающей способности ОТЭ соответствуют следующему составу: ДТ — 17,03 %; Э — 80,97; сукцинимид — 2,00 %. Результаты определения предельного значения смазывающей способности ОТЭ приведены в таблице.

Полученные теоретические и практические результаты согласуются с данными других авторов. По мнению авторов статьи [14], содержание в ОТЭ до 60 % Э не приводит к существенному ухудшению смазывающей способности смеси. Однако при содержании Э более 60 % по массе выявлены особенности снижения смазывающих свойств ОТЭ. Результаты исследований [15, 16] подтвердили, что при содержании в ОТЭ более 70 % Э работоспособность дизельной форсунки снижается.

По результатам проведенных исследований [7] добавление этанола в топливо привело к заметному снижению смазывающей способности и увеличению удельного износа элементов прецизионной пары. При увеличении концентрации Э до 40 % в ОТЭ наблюдается рост скорости износа поверхностей прецизионных пар от 47 до 81 %. Для улучшения износостойкости в работе [7] предложено применять текстурированные поверхности или покрытия изнашиваемых элементов форсунки.

## Выводы

1. Предложена математическая зависимость, позволяющая определять предельное значение смазывающей способности ОТЭ, обеспечивающей работоспособность дизельной форсунки. Рассчитано предельное значение смазывающей способности ОТЭ, при $LSI$ >15,5, соответствующей содержанию в ОТЭ 17,03 % ДТ, 80,97 % Э и 2 % сукцинимида.

2. Экспериментально подтверждены полученные расчетные данные о том, что применение ОТЭ с содержанием до 80 % Э по массе обеспечивает достаточный уровень смазывающей способности, гарантирующий подвижность иглы дизельной форсунки. Содержание в ОТЭ более 80 % Э приводило к заеданию иглы распылителя в седле форсунки.

3. Полученные данные представляют практическую ценность для определения предельных составов ОТЭ, применяемых в дизельных двигателях.

## Литература

[1] Chen Z., He J., Chen H. et al. Comparative study on the combustion and emissions of dual-fuel common rail engines fueled with diesel/methanol, diesel/ethanol, and diesel/n-butanol. *Fuel,* 2021, vol. 304, art. 121360, doi: https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121360

[2] Бузиков Ш.В., Плотников С.А. Анализ концепций исследования применения альтернативных топлив в дизелях. *Транспорт на альтернативном топливе*, 2022, № 1, с. 66–70.

[3] Hsieh P.У., Bruno T.J. A perspective on the origin of lubricity in petroleum distillate motor fuels. *Fuel Process. Technol.*, 2015, vol. 129, pp. 52–60, doi: https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2014.08.012

[4] Плотников С.А., Карташевич А.Н., Пляго А.В. Проведение исследований работоспособности топливной системы тракторного дизеля на составах топлива с предельным содержанием этанола. *Вестник РГАТУ им. П.А. Костычева*, 2019, № 1, с. 134–137.

[5] Nie Y., Chen Y., Li J.Z. et al. Research on ethanol blending matching strategies for high-altitude non-road diesel engines under various load conditions. *Results Eng.*, 2025, vol. 28, art. 107271, doi: https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.107271

[6] Baczewski K., Kałdoński T. *Paliwa do silników o zapłonie samoczynnym.* Komunikacji i łączności, 2008. 224 p.

[7] Hong F.T., Singh E., Sarathy S.M. On the origins of lubricity and surface cleanliness in ethanol-diesel fuel blends. *Fuel,* 2021, vol. 302, art. 121135, doi: https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121135

[8] Hong F.T., Alghamdi N.M., Bailey A.S. et al. Chemical and kinetic insights into fuel lubricity loss of low-sulfur diesel upon the addition of multiple oxygenated compounds. *Tribol. Int.*, 2020, vol. 152, art. 106559, doi: https://doi.org/10.1016/j.triboint.2020.106559

[9] Сиппель И.Я., Магдин К.А Влияние добавок этанола на свойства автомобильных дизельных топлив. *Международный научно-исследовательский журнал*, 2021, № 1–1, с. 135–138, doi: https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.103.1.020

[10] Kuszewski H., Jaworski A., Ustrzycki A. Lubricity of ethanol–diesel blends — study with the HFRR method. *Fuel*, 2017, vol. 208, pp. 491–498, doi: https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.07.046

[11] Kuszewski H., Jaworski A., Mądziel M. Lubricity of ethanol-diesel fuel blends-study with the four-ball machine method. *Materials*, 2021, vol. 14, no. 10, art. 2492, doi: https://doi.org/10.3390/ma14102492

[12] Lapuertaa M., Sánchez-Valdepeñasa O., Sukjitb E. Effect of ambient humidity and hygroscopy on the lubricity of diesel fuels. *Wear,* 2014, vol. 309, no. 1–2, pp. 200–207, doi: https://doi.org/10.1016/j.wear.2013.11.017

[13] Chybowski L., Wójcik W., Szczepan M. Evaluation of rheological and lubrication properties of selected alcohol fuels. *Energie*s, 2025, vol. 18, no. 5, art. 1038, doi: https://doi.org/10.3390/en18051038

[14] Lapuerta M., García-Contreras R., Agudelo J.R. Lubricity of ethanol-biodiesel-diesel fuel blends. *Energy Fuels,* 2010, vol. 24, no. 2, pp. 1374–1379, doi: https://doi.org/10.1021/ef901082k

[15] Jamrozik A. The effect of the alcohol content in the fuel mixture on the performance and emissions of a direct injection diesel engine fueled with diesel-methanol and diesel-ethanol blends. *Energy Convers. Manag.*, 2017, vol. 148, pp. 461–476, doi: https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.06.030

[16] Odziemkowska M., Matuszewska A., Czarnocka J. Diesel oil with bioethanol as a fuel for compression-ignition engines. *Appl. Energy*, 2016, vol. 184, pp. 1264–1272, doi: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.07.069

## References

[1] Chen Z., He J., Chen H. et al. Comparative study on the combustion and emissions of dual-fuel common rail engines fueled with diesel/methanol, diesel/ethanol, and diesel/n-butanol. *Fuel*, 2021, vol. 304, art. 121360, doi: https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121360

[2] Buzikov Sh.V., Plotnikov S.A. Analysis of research concepts for the use of alternative fuels in diesels. *Transport na alternativnom toplive* [Alternative Fuel Transport], 2022, no. 1, pp. 66–70. (In Russ.).

[3] Hsieh R.U., Bruno T.J. A perspective on the origin of lubricity in petroleum distillate motor fuels. *Fuel Process. Technol.*, 2015, vol. 129, pp. 52–60, doi: https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2014.08.012

[4] Plotnikov S.A., Kartashevich A.N., Plyago A.V. Carrying out of probes of working capacity of fuel system of the diesel engine on structures of fuel with the limiting maintenance of ethanol. *Vestnik RGATU im. P.A. Kostycheva* [Herald of the Ryazan State Agrotechnological University Named After P.A. Kostychev], 2019, no. 1, pp. 134–137. (In Russ.).

[5] Nie Y., Chen Y., Li J.Z. et al. Research on ethanol blending matching strategies for high-altitude non-road diesel engines under various load conditions. *Results Eng.*, 2025, vol. 28, art. 107271, doi: https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.107271

[6] Baczewski K., Kałdoński T. *Paliwa do silników o zapłonie samoczynnym*. Komunikacji i łączności, 2008. 224 p.

[7] Hong F.T., Singh E., Sarathy S.M. On the origins of lubricity and surface cleanliness in ethanol-diesel fuel blends. *Fuel*, 2021, vol. 302, art. 121135, doi: https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121135

[8] Hong F.T., Alghamdi N.M., Bailey A.S. et al. Chemical and kinetic insights into fuel lubricity loss of low-sulfur diesel upon the addition of multiple oxygenated compounds. *Tribol. Int.*, 2020, vol. 152, art. 106559, doi: https://doi.org/10.1016/j.triboint.2020.106559

[9] Sippel I.Ya., Magdin K.A Effect of ethanol additives on the properties of automotive diesel fuels. *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatelskiy zhurnal* [International Research Journal], 2021, no. 1–1, pp. 135–138, doi: https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.103.1.020 (in Russ.).

[10] Kuszewski H., Jaworski A., Ustrzycki A. Lubricity of ethanol–diesel blends — study with the HFRR method. *Fuel*, 2017, vol. 208, pp. 491–498, doi: https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.07.046

[11] Kuszewski H., Jaworski A., Mądziel M. Lubricity of ethanol-diesel fuel blends-study with the four-ball machine method. *Materials*, 2021, vol. 14, no. 10, art. 2492, doi: https://doi.org/10.3390/ma14102492

[12] Lapuertaa M., Sánchez-Valdepeñasa O., Sukjitb E. Effect of ambient humidity and hygroscopy on the lubricity of diesel fuels. *Wear*, 2014, vol. 309, no. 1–2, pp. 200–207, doi: https://doi.org/10.1016/j.wear.2013.11.017

[13] Chybowski L., Wójcik W., Szczepan M. Evaluation of rheological and lubrication properties of selected alcohol fuels. *Energies*, 2025, vol. 18, no. 5, art. 1038, doi: https://doi.org/10.3390/en18051038

[14] Lapuerta M., García-Contreras R., Agudelo J.R. Lubricity of ethanol-biodiesel-diesel fuel blends. *Energy Fuels*, 2010, vol. 24, no. 2, pp. 1374–1379, doi: https://doi.org/10.1021/ef901082k

[15] Jamrozik A. The effect of the alcohol content in the fuel mixture on the performance and emissions of a direct injection diesel engine fueled with diesel-methanol and diesel-ethanol blends. *Energy Convers. Manag.*, 2017, vol. 148, pp. 461–476, doi: https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.06.030

[16] Odziemkowska M., Matuszewska A., Czarnocka J. Diesel oil with bioethanol as a fuel for compression-ignition engines. *Appl. Energy*, 2016, vol. 184, pp. 1264–1272, doi: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.07.069

Статья поступила в редакцию 21.12.2025

## Информация об авторах

**БУЗИКОВ Шамиль Викторович** — доктор технических наук, доцент, профессор кафедры строительного производства. ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет» (610000, Киров, Российская Федерация, ул. Московская, д. 36, e-mail: shamilvb@mail.ru).

**МОТОВИЛОВА Марина Владимировна** — кандидат технических наук, доцент кафедры промышленной безопасности и инженерных систем. ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет» (610000, Киров, Российская Федерация, ул. Московская, д. 36, e-mail: marina_mtd@mail.ru).

## Information about the authors

**BUZIKOV Shamil Viktorovich** — Doctor of Science (Eng.), Associate Professor, Professor of Construction Production Department. Vyatka State University (610000, Kirov, Russian Federation, Moskovskaya St., Bldg. 36, e-mail: shamilvb@mail.ru).

**MOTOVILOVA Marina Vladimirovna** — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Industrial Safety and Engineering Systems. Vyatka State University (610000, Kirov, Russian Federation, Moskovskaya St., Bldg. 36, e-mail: marina_mtd@mail.ru).

**Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:**
Бузиков Ш.В., Мотовилова М.В. Исследование работоспособности дизельной форсунки при работе на обратных топливных эмульсиях. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2026, № 11, с. 133–142.

**Please cite this article in English as:**
Buzikov Sh.V., Motovilova M.V. Performance of a diesel injector operating on reverse fuel emulsions. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2026, no. 11, pp. 133–142.




**Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана предлагает читателям сборник статей V Международной научно-практической конференции «Нанохимия и современные нанотехнологии»**

В сборник включены статьи, подготовленные по материалам докладов V Международной научно-практической конференции «Нанохимия и современные нанотехнологии». Тематика конференции охватывает фундаментальные проблемы современной нанохимии и разработку перспективных нанотехнологий для создания новых «умных» функциональных материалов и наноустройств, применяемых в различных областях науки и техники, прежде всего в микроэлектронике, фотонике и катализе. Рассматриваются также вопросы создания искусственных метаматериалов с уникальными оптическими и магнитными свойствами, безопасных («зеленых») нанотехнологий, а также развития инновационных и цифровых технологий преподавания химии и нанохимии в вузах. Отдельный раздел посвящен инжинирингу энергоресурсоэффективных химико-технологических процессов и систем малотоннажной химии, включая вопросы перехода от лабораторных методов синтеза к промышленному производству.

Для специалистов в области нанохимии, нанотехнологий, функциональных материалов и малотоннажной химии, а также преподавателей, аспирантов, магистрантов и студентов технических и естественно-научных вузов.

**По вопросам приобретения обращайтесь:**
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;
press@bmstu.ru; https://press.bmstu.ru