

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ДИЗЕЛЬНОЙ ФОРСУНКИ НА СМЕСЕВЫХ ТОПЛИВАХ С НЕДОСТАТОЧНЫМИ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫМИ СВОЙСТВАМИ

THE STUDY OF THE PERFORMANCE OF A DIESEL NOZZLE ON MIXED FUELS WITH INSUFFICIENT LOW-TEMPERATURE PROPERTIES

С.А. ПЛОТНИКОВ, д.т.н.
Ш.В. БУЗИКОВ, к.т.н.
И.С. КОЗЛОВ

Вятский государственный университет, Киров, Россия,
shamilvb@mail.ru

S.A. PLOTNIKOV, DSc in Engineering
SH.V. BUZIKOV, PhD in Engineering
I.S. KOZLOV

Vyatka State University, Kirov, Russia, shamilvb@mail.ru

На сегодняшний день свойствами рапсового масла, влияющими на процессы топливоподачи в тракторном дизеле, являются плотность, кинематическая и динамическая вязкость, а также поверхностное натяжение. Целью настоящих исследований является расширение пределов топливной базы тракторных дизелей путем применения смесевых топлив с недостаточными низкотемпературными свойствами. В связи с этим определением оптимального состава смесевых топлив для работы топливоподающей аппаратуры тракторных дизелей является весьма актуальной задачей. Для ее решения были проведены теоретические исследования по определению влияния добавок рапсового масла на свойства смесевых топлив, а также испытания дизельной топливной форсунки. В результате исследований были определены зависимости вязкости смесевых топлив, давления начала впрыскивания, герметичности по запирающему конусу и гидроплотности распылителя форсунки от добавки рапсового масла с присадкой. На основании теоретических расчетов получено значение вязкости смесевых топлив, удовлетворяющей требованиям ТУ завода-изготовителя для топливных форсунок. Анализ экспериментальных зависимостей показал, что при увеличении доли рапсового масла в смесевом топливе 0 до 100 % увеличились: давление начала впрыскивания с 20,88 до 21,08 МПа, время до отрыва капли топлива от носика распылителя с 18 с до 104 с, а время снижения давления уменьшилось с 5,2 до 11,3 с. Испытания показали, что на всех составах смесевых топлив давление начала впрыскивания, герметичность по запирающему конусу, гидроплотность распылителей и подвижность иглы распылителя соответствуют требованиям ГОСТ 10579-2017, однако качество распыливания соответствует на составах смесевых топлив с долей рапсового масла до 60 %. Таким образом, применение предложенных составов топлив позволит улучшить низкотемпературные свойства смесевых топлив с добавками рапсового масла, а значит, расширить топливную базу тракторных дизелей.

Ключевые слова: смесевое топливо, рапсовое масло, стендовые испытания.

Today, the properties of rapeseed oil, affecting the fuel supply processes in a tractor diesel, are density, kinematic and dynamic viscosity, as well as surface tension. The purpose of this research is to expand the limits of the fuel base of tractor diesel engines by using mixed fuels with insufficient low-temperature properties. In this regard, the determination of the optimal composition of mixed fuel for the operation of the fuel supply equipment of tractor diesels is a very urgent task. To solve this problem, theoretical studies were conducted to determine the effect of rapeseed oil additives on the properties of mixed fuels, as well as testing a diesel fuel injector. As a result of the studies, the dependences of the viscosity of the mixed fuel, the pressure of injection beginning, the tightness of the locking cone, and the hydro-density of the spray nozzle on the addition of rapeseed oil with an additive were determined. Based on theoretical calculations, the value of the viscosity of mixed fuel that meets the requirements of the manufacturer's specifications for fuel injectors is obtained. An analysis of the experimental dependences showed that with an increase in the proportion of rapeseed oil in mixed fuel from 0 to 100 %, there increased: the pressure at the beginning of injection from 20,88 to 21,08 MPa, the time until a drop of fuel comes off from the nozzle of the spray from 18 to 104 s, and pressure reduction time decreased from 5,2 to 11,3 s. Tests shown that for all mixed fuel compositions, the injection start pressure, tightness on the locking cone, spray water density and spray needle mobility meet the requirements of GOST 10579-2017, however, the spray quality corresponds to mixed fuel compositions with rapeseed oil up to 60 %. Thus, the use of the proposed fuel compositions will improve the low-temperature properties of mixed fuels with additives of rapeseed oil, and thus expand the fuel base of tractor diesels.

Keywords: mixed fuel, rapeseed oil, bench tests.

Введение

На сегодняшний день одним из видов моторного топлива является рапсовое масло, полученное из растительной биомассы [1, 2]. Переход на его применение в качестве альтернативы моторному топливу позволяет удовлетворить потребности в энергии без ущерба для окружающей среды [1, 2]. В связи с этим экологический фактор является основным, обуславливающим необходимость применения рапсового масла [2].

Свойствами рапсового масла, влияющими на процессы топливоподачи в тракторном дизеле, являются плотность, кинематическая и динамическая вязкость и поверхностное натяжение [1, 3–5]. Использование чистого рапсового масла взамен традиционному дизельному топливу затруднено ввиду ее высокой вязкости [6–10]. Наиболее перспективным является применение смесевое топлива, состоящего из дизельного с добавками доли рапсового масла [6–10]. Данный способ позволяет сократить расход дизельного топлива по сравнению с расходом смесевое топлива [1, 6–10]. Однако вязкость смесевое топлива выше, чем традиционно. Повышенная вязкость топлива, в конечном счете, ухудшает процессы впрыскивания и смесеобразования в цилиндрах дизеля, что в свою очередь приводит к снижению как эффективных, так и экологических показателей работы [11–16]. Для решения данной проблемы, на сегодняшний момент, существует ряд способов. Одним из них является предварительный подогрев смесевое топлива до температур, при которых значение вязкости снижается до оптимальных значений [12]. Однако данный способ требует дополнительных затрат на устройство подогревателя и его применение [7, 8]. В настоящее время более перспективным способом является введение в состав смесевое топлива присадок с целью снижения его вязкости [9, 10].

Цель исследований

Расширение пределов топливной базы тракторных дизелей путем применения смесевых топлив с недостаточными низкотемпературными свойствами.

Материалы и методы

В связи с вышесказанным, определение оптимального состава смесевое топлива для работы топливоподающей аппаратуры тракторных дизелей является весьма актуальной задачей.

Для решения поставленной задачи были проведены теоретические исследования по определению влияния добавок доли рапсового масла с присадками на низкотемпературные свойствами смесевое топлива.

В работах, проведенных ранее [9, 10], был исследован ряд различных депрессорно-диспергирующих присадок. На основании проведенных исследований определена присадка DIFRON H372, оказывающая наибольшее влияние на вязкость смесевое топлива при ее наименьшей концентрации.

Расчет свойств состава смесевое топлива с добавками рапсового масла и присадки через взвешенное среднее текучести компонентов обычно приводил к результатам, в несколько раз отличающимся от экспериментальных данных (табл.).

Данные концентрационных зависимостей (табл.) позволяли допустить квадратичную зависимость между кинематической вязкостью и долей c рапсового масла в смесевом топливе:

$$v = v_0 + ac + bc^2. \quad (1)$$

В случае смесевое топлива с добавками рапсового масла значения параметров регрессии, найденные по экспериментальным данным, оказались следующими: $v_0 = 4,524 \cdot 10^{-6}$, $a = 96,54 \cdot 10^{-3}$ и $b = 3,407 \cdot 10^{-3}$ (v – в m^2/c ; c – в %).

Таблица

Зависимость свойств смесевое топлива от доли рапсового масла и концентрации присадки

$c, \%$	Вязкость смесевое топлива $v, m^2/c$, при концентрации присадки $C_D, \%$			
	0	0,5	1,0	2,0
0	$4,524 \cdot 10^{-6}$	$4,492 \cdot 10^{-6}$	$4,455 \cdot 10^{-6}$	$4,405 \cdot 10^{-6}$
10	$6,008 \cdot 10^{-6}$	$5,945 \cdot 10^{-6}$	$5,873 \cdot 10^{-6}$	$4,811 \cdot 10^{-6}$
20	$7,885 \cdot 10^{-6}$	$7,739 \cdot 10^{-6}$	$7,633 \cdot 10^{-6}$	$7,123 \cdot 10^{-6}$
30	$10,264 \cdot 10^{-6}$	$10,096 \cdot 10^{-6}$	$9,984 \cdot 10^{-6}$	$9,860 \cdot 10^{-6}$
40	$13,899 \cdot 10^{-6}$	$13,468 \cdot 10^{-6}$	$13,270 \cdot 10^{-6}$	$12,968 \cdot 10^{-6}$
50	$17,894 \cdot 10^{-6}$	$17,692 \cdot 10^{-6}$	$17,400 \cdot 10^{-6}$	$16,985 \cdot 10^{-6}$

Расхождения между экспериментальными и вычисленными по квадратичной регрессии значениями вязкости не превышали 3 %.

Ввиду того что вязкость определялась, в первую очередь, усредненными характеристиками межмолекулярного взаимодействия, рассматривали вязкость смесового топлива в зависимости от мольной доли примеси. С этой целью вышеприведенные массовые концентрации с пересчитаны в мольные доли примеси:

$$x = v_2 / (v_1 + v_2), \quad (2)$$

где v_1 – количество молей дизельного топлива; v_2 – количество молей рапсового масла в смесовом топливе.

Молярные массы дизельного топлива, рапсового масла и присадки DIFRON H372 приняты равными, соответственно, 226, 932 и 175 г/моль. Получено уравнение линейной регрессии:

$$\nu = 4,17 \cdot 10^{-6} + 69,24 \cdot 10^{-6} x, \text{ [м}^2/\text{с]}. \quad (3)$$

Сопоставление линейной модели с полученными экспериментальными результатами дало удовлетворительное совпадение – погрешность не превысила 5 %. В результате зависимость вязкости от массовой концентрации рапсового масла удовлетворительно описывала линейная регрессия.

В итоге получены зависимости вязкости смесового топлива от доли рапсового масла и концентрации присадки. Согласно полученным расчетным данным определены: максимальная доля рапсового масла и концентрации присадки, равная 60 % и 2 %, соответственно, при которых значение вязкости удовлетворяет требованиям ТУ завода-изготовителя для дизельных топливных форсунок. Также определено, что введение присадки в смесовое топливо расширяет предел применения смесовых топлив с недостаточными низкотемпературными свойствами.

Для определения показателей работы дизельных форсунок на смесовом топливе с добавками рапсового масла и присадки проведены испытания на стенде М-107 CR (рис. 1).

Испытания проводились согласно ГОСТ 10579-2017. Для испытаний применялась бесштифтовая форсунка артикула 455.1112010-50 марки ФД-22 закрытого типа, четырехдырчатая, с распылителем и гидравлически управляемой иглой, с диаметром распыливающих отверстий 0,32 мм.



Рис. 1. Общий вид стенда М-107 CR

Результаты и их обсуждение

В ходе проведения испытаний были определены зависимости давления начала впрыскивания, герметичности по запирающему конусу и гидроплотности распылителей от добавки доли рапсового масла и концентрации присадки DIFRON H372 в смесовое топливо (рис. 2–4). На всех составах смесового топлива с добавкой доли рапсового масла от 0 до 100 %, концентрация присадки составляла 2 %. Остальные показатели, такие как подвижность иглы распылителя, качество распыливания и герметичность уплотнений, оценивали согласно ГОСТ 10579-2017.

На первоначальном этапе определяли влияние состава смесового топлива на давление начала впрыскивания. Форсунка была отрегулирована на давление начала впрыскивания 20,5 МПа. Согласно ГОСТ, увеличение давления для форсунок автотракторных дизелей с регулировочными шайбами не должно превышать 1,2 МПа.

Данные, представленные на рис. 2, показывают, что с увеличением доли рапсового масла от 0 до 100 % кривая давления начала впрыскивания изменяется по параболическому закону от 20,88 до 21,08 МПа, что удовлетворяет

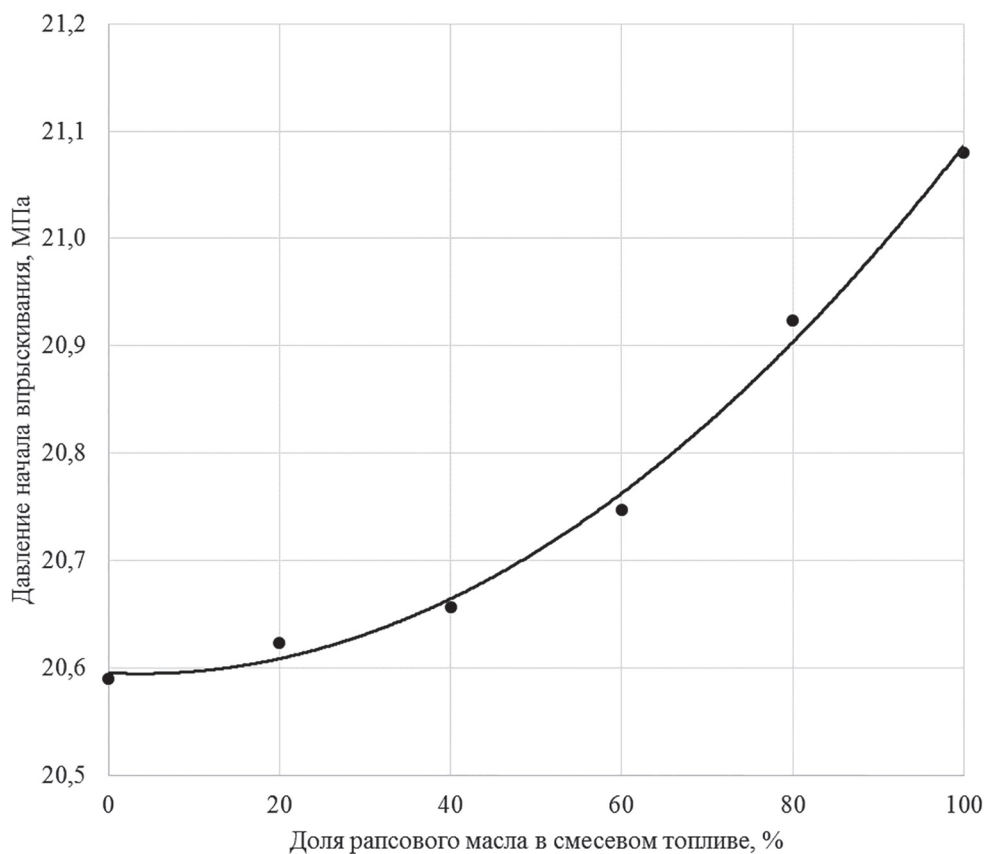


Рис. 2. Зависимость давления начала впрыскивания от состава смешанного топлива

требованиям ГОСТа и свидетельствует о работоспособности форсунки даже на чистом рапсовом масле. Данное обстоятельство объясняется тем, что рапсовое масло обладает более высокой кинематической вязкостью ($54,1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ при температуре $20 \text{ }^\circ\text{C}$) по сравнению с чистым летним дизельным топливом ($0,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$) [12, 13].

На втором этапе определяли герметичность по запирающему конусу и герметичность уплотнений, соединений и наружных поверхностей полости высокого давления форсунки в зависимости от состава смешанного топлива.

Из проведенного анализа зависимости, представленной на рис. 3 видно, что время отрыва капли топлива от носика распылителя увеличивается с 18 до 104 с, значения удовлетворяют требованиям ГОСТа (минимальное время отрыва капли топлива от носика распылителя под действием собственной массы не менее 15 с). Данное обстоятельство объясняется тем, что сила поверхностного натяжения капли дизельного топлива гораздо меньше, чем у капли рапсового масла [12, 13].

Герметичность уплотнений, соединений и наружных поверхностей полости высокого

давления форсунки проверяли одновременно с испытаниями на герметичность по запирающему конусу. Во всех случаях и на всех составах смешанного топлива течей и увлажнений не наблюдалось что удовлетворяет требованиям ГОСТа и свидетельствует о работоспособности форсунки.

На третьем этапе определяли зависимость гидроплотности распылителей от состава смешанного топлива.

Анализ полученной зависимости, представленной на рис. 4, показал, что время снижения давления с 19,6 до 17,6 МПа, согласно ГОСТу, не превышал 5 с для всех составов смешанного топлива. А при увеличении доли рапсового масла от 0 до 100 % данный показатель даже увеличился с 5,2 до 11,3 с. Полученные данные свидетельствуют о том, что по данному показателю на всех составах смешанного топлива работоспособность форсунки обеспечена согласно ГОСТу. Данное обстоятельство объясняется тем, что рапсовое масло обладает более высокой плотностью, равной $915 \text{ кг}/\text{м}^3$ при температуре $20 \text{ }^\circ\text{C}$, по сравнению с чистым летним дизельным топливом – $860 \text{ кг}/\text{м}^3$ [12, 13].

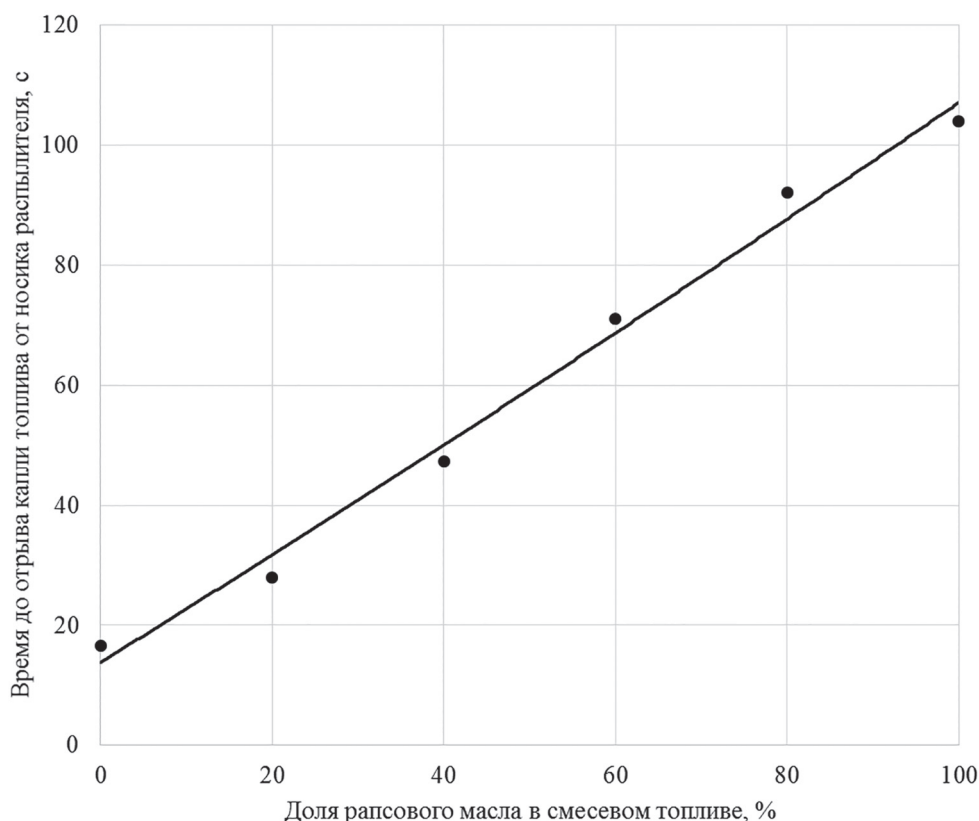


Рис. 3. Зависимость герметичности по запирающему конусу от состава смеси топлива

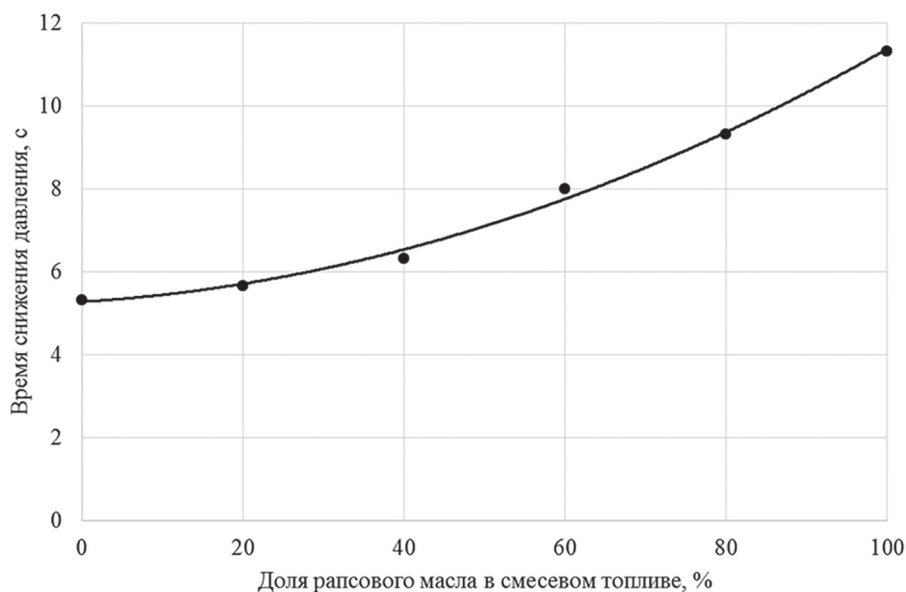


Рис. 4. Зависимость гидроплотности распылителей от состава смеси топлива

На последнем этапе проводились испытания подвижности иглы распылителя одновременно с проверкой качества распыливания смеси топлива, согласно требованиям ГОСТа.

Подвижность иглы распылителя определяли по параметру «звонкость». На всех составах смеси топлива подвижность иглы распылителя была обеспечена, что, в свою очередь, свидетельствует о работоспособности форсунок по данному показателю.

Согласно ГОСТу, на испытаниях форсунок качество распыливания должно соответствовать следующим требованиям: распыленное топливо при визуальном наблюдении должно быть туманообразным, без сплошных струек и легко различимых местных сгущений. Однако в ходе проведения испытаний выяснилось, что при увеличении доли рапсового масла в смеси топлива свыше 60 % наблюдалось отсутствие тумана после распыливания, при-

сутствие сплошных струек и местных сгущений (рис. 5). Это не соответствует требованиям ГОСТа и является фактом неработоспособности форсунки по данному показателю. Данное обстоятельство свидетельствует том, что использование смесового топлива, содержащего долю рапсового масла свыше 60 %, может приводить к ухудшению процесса впрыскивания, распыливания и смесеобразования в цилиндрах дизеля, что повлечет за собой ухудшение эффективных и экологических показателей работы.



Рис. 5. Пятно факела распыленного топлива

В целом проведенные испытания показали, что на всех составах смесового топлива такие показатели работы форсунки, как давление начала впрыскивания, герметичность по запирающему конусу, гидроплотность распылителей и подвижность иглы распылителя соответствуют требованиям ГОСТ 10579-2017. Однако показатель качества распыливания соответствует ГОСТу лишь на составах смесового топлива с долей рапсового масла до 60 %. В связи с этим для сохранения работоспособности форсунок, а также эффективных и экологических показателей работы тракторного дизеля долю рапсового масла в смесовом топливе рекомендуется ограничить на уровне 60 %.

Выводы

В результате проведенных теоретических и экспериментальных исследований определены вязкость и показатели работы форсунки тракторного дизеля в зависимости от доли рапсового масла в смесовом топливе.

Анализ теоретических зависимостей вязкости смесового топлива от доли рапсового масла и концентрации присадки показал, что предельным составом, удовлетворяющим требования ТУ завода-изготовителя для топливных форсунок тракторных дизелей, явля-

ется состав с максимальной долей рапсового масла 60 % и концентрацией присадки 2 %.

Данные лабораторных испытаний дизельной топливной форсунки показали, что при увеличении доли рапсового масла в смесовом топливе 0 до 100 % увеличилось: давление начала впрыскивания с 20,88 до 21,08 МПа, время до отрыва капли топлива от носика распылителя с 18 до 104 с, а время снижения давления уменьшилось с 5,2 до 11,3 с, соответственно.

Проведенными испытаниями выявлено, что на всех составах смесового топлива давление начала впрыскивания, герметичность по запирающему конусу, гидроплотность распылителей и подвижность иглы распылителя соответствуют требованиям ГОСТ 10579-2017, однако качество распыливания соответствует требованиям на составах смесового топлива с долей рапсового масла до 60 %.

Применение предложенных составов топлив позволит улучшить низкотемпературные свойства смесового топлива с добавками рапсового масла, а значит, расширить топливную базу тракторных дизелей.

Литература

1. Уханов А.П., Уханов Д.С., Шеменев Д.А. Дизельное смесовое топливо: монография. Пенза: РИО ПГСХА, 2012. 147 с.
2. Карташевич А.Н., Плотников С.А., Товстыка В.С. Применение топлив на основе рапсового масла в тракторных дизелях. Киров: Типография «Авангард», 2014. 144 с.
3. Карташевич А.Н., Товстыка В.С., Плотников С.А. Показатели работы тракторного дизеля на рапсовом масле // Двигателестроение. 2011. № 2. С. 39–41.
4. Плотников С.А., Черемисинов П.Н. Недостатки применения топлив на основе рапсового масла в дизельных двигателях // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2015. Т. 3. № 4. С. 97–101.
5. Плотников С.А., Черемисинов П.Н. Влияние присадок на кинематическую вязкость топлив на основе рапсового масла // Общество, наука, инновации (НПК-2016): сборник статей. 2-е издание, испр. и дополн. Вятский государственный университет. 2016. С. 1378–1382.
6. Карташевич А.Н., Товстыка В.С., Плотников С.А. Оценка дымности и токсичности тракторного дизеля при работе на рапсовом масле // Тракторы и сельхозмашины. 2011. № 9. С. 11–13.

7. Карташевич А.Н., Товстыка В.С., Плотников С.А. Оптимизация параметров топливоподачи тракторного дизеля для работы на рапсовом масле // Тракторы и сельхозмашины. 2011. № 3. С. 13–16.
8. Карташевич А.Н., Товстыка В.С., Плотников С.А. Анализ результатов работы топливного насоса высокого давления на смесях рапсового масла с дизельным топливом // Агропанорама. 2009. № 2. С. 34–37.
9. Плотников С.А., Бузиков Ш.В., Козлов И.С. Разработка методики исследования применимости растительных масел в качестве альтернативного топлива для дизелей // В сборнике: Общество, наука, инновации (НПК-2017): сборник статей. Всероссийской ежегодной научно-практической конференции. Вятский государственный университет. 2017. С. 1800–1807.
10. Плотников С.А., Бузиков Ш.В., Козлов И.С. Исследование моторных свойств рапсового масла // Общество, наука, инновации (НПК-2017): сборник статей Всероссийской ежегодной научно-практической конференции. Вятский государственный университет. 2017. С. 1808–1816.
11. Сафонов А.С., Ушаков А.И., Гришин В.В. Химотология горюче-смазочных материалов. СПб.: НПИКЦ. 2007. 488 с.
12. Руденко И.И. Работоспособность форсунок дизелей на биотопливе // Вестник МГУЛ – Лесной вестник. 2010. № 1.
13. Керученко Л.С., Даманский Р.В. Влияние неисправностей распылителей дизельных форсунок на процесс впрыска топлива // Международный научно-исследовательский журнал. 2017. № 01 (55). Ч. 4. С. 78–81.
- XXI veka: teoriya i praktika. 2015. Vol. 3. No 4, pp. 97–101 (in Russ.).
5. Plotnikov S.A., Cheremisinov P.N. The effect of additives on the kinematic viscosity of rapeseed oil fuels. V sbornike: Obshchestvo. Nauka. Innovacii (NPK-2016) Sbornik statej 2-e izdanie, ispravlennoe i dopolnennoe. Vyatskij gosudarstvennyj universitet Publ. 2016, pp. 1378–1382 (in Russ.).
6. Kartashevich A.N., Tovstyka V.S., Plotnikov S.A. Assessment of smoke and toxicity of tractor diesel when working on rapeseed oil. Traktory i sel'hozmashiny. 2011. No 9, pp. 11–13 (in Russ.).
7. Kartashevich A.N., Tovstyka V.S., Plotnikov S.A. Optimization of fuel supply for tractor diesel operating on rape-seed oil. Traktory i sel'hozmashiny. 2011. No 3, pp. 13–16 (in Russ.).
8. Kartashevich A.N., Tovstyka V.S., Plotnikov S.A. Analysis of the results of the high-pressure fuel pump on mixtures of rapeseed oil with diesel fuel. Agropanorama. 2009. No 2, pp. 34–37 (in Russ.).
9. Plotnikov S.A., Buzikov SH.V., Kozlov I.S. Development of a methodology for studying the applicability of vegetable oils as an alternative fuel for diesel engines, V sbornike: Obshchestvo. Nauka. Innovacii (NPK-2017) sbornik statej. Vserossijskaya ezhegodnaya nauchno-prakticheskaya konferenciya [In the collection: Society. Science. Innovation (NPK-2017) collection of articles. All-Russian annual scientific and practical conference]. Vyatskij gosudarstvennyj universitet Publ. 2017, pp. 1800–1807 (in Russ.).
10. Plotnikov S.A., Buzikov SH.V., Kozlov I.S. The study of the motor properties of rapeseed oil. V sbornike: Obshchestvo. Nauka. Innovacii (NPK-2017) sbornik statej. Vserossijskaya ezhegodnaya nauchno-prakticheskaya konferenciya [In the collection: Society. Science. Innovation (NPK-2017) collection of articles. All-Russian annual scientific and practical conference]. Vyatskij gosudarstvennyj universitet Publ. 2017, pp. 1808–1816 (in Russ.).
11. Safonov A.S., Ushakov A.I., Grishin V.V. Himotologiya goryuche-smazochnyh materialov [Chemotology of fuels and lubricants]. SPb.: NPIKC Publ. 2007. 488 p.
12. Rudenko I.I. The performance of diesel injectors on biofuel. Vestnik MGUL – Lesnoj vestnik. 2010. No 1 (in Russ.).
13. Keruchenko L.S., Damanskij R.V. The effect of malfunctions of atomizers of diesel nozzles on the fuel injection process. Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal. 2017. No 01(55) CH. 4, pp. 78–81 (in Russ.).

References

1. Uhanov A.P., Uhanov D.S., SHemenev D.A. Dizel'noe smesevoe toplivo: monografiya [Diesel mixed fuel: mono-graph]. Penza: RIO PGSKHA Publ., 2012. 147 p.
2. Kartashevich A.N., Plotnikov S.A., Tovstyka V.S. Primenenie topliv na osnove rapsovogo masla v traktornyh dizelyah [The use of rapeseed oil fuels in tractor diesels]. Kirov: Tipografiya «Avangard» Publ., 2014. 144 p.
3. Kartashevich A.N., Tovstyka V.S., Plotnikov S.A. Rapeseed tractor diesel performance characteristics. Dvigatel'stroenie. 2011. No 2, pp. 39–411 (in Russ.).
4. Plotnikov S.A., Cheremisinov P.N. Disadvantages of using rapeseed oil fuels in diesel engines. Aktual'nye napravleniya nauchnyh issledovanij