



Исследование составов и способов подачи новых топлив с добавками сурепного масла в дизель

С. А. Плотников¹✉, А. Н. Карташевич², Г. Э. Заболотских¹

¹ Вятский государственный университет

(г. Киров, Российская Федерация)

² Белорусская ГСХА (г. Горки, Республика Беларусь)

✉ plotnikovsa@bk.ru

Аннотация

Введение. Исследованы физико-химические свойства эмульсии дизельного топлива с сурепным маслом и этанолом. При использовании смесового топлива не производили конструктивные изменения в двигателе, а только усовершенствовали навесное оборудование: систему питания двигателя внутреннего сгорания.

Цель статьи. Определить влияние добавок сурепного масла и этанола в разных количествах в товарное дизельное топливо на показатели, такие как плотность, кинематическая вязкость, низшая удельная теплота сгорания смесей. Определить оптимальную смесь топлив для стендовых испытаний на дизеле.

Материалы и методы. Использовано следующее оборудование: весы лабораторные VIBRAAJH-620CE, пикнометр ПЖ2-10-КШ 7/16, вискозиметр ВПЖ-2, электронный секундомер.

Результаты исследования. Установлена зависимость между плотностью, кинематической вязкостью и концентрацией добавок в смесевые топлива. Отмечена взаимосвязь кинематической вязкости масел и низшей удельной теплоты сгорания. Представлена динамика снижения средней низшей удельной теплоты сгорания смесей относительно увеличения концентрации смесевых топлив.

Обсуждение и заключение. Для дальнейших стендовых испытаний на двигателе были определены 2 смеси 10%СурМ+10%Э+80%ДТ и 25%СурМ+25%Э+50%ДТ. При выборе этих смесей основное внимание уделялось 4 параметрам: кинематической вязкости, плотности, времени стабильности и низшей удельной теплоте сгорания.

Ключевые слова: сурепка, сурепное масло, этанол, дизельное топливо, кинематическая вязкость, плотность, низшая удельная теплота сгорания, зависимость, динамика, смесевое топливо, система питания

Благодарности: авторы выражают признательность сторонним участникам, которые внесли значительный вклад в исследование.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Плотников С. А., Карташевич А. Н., Заболотских Г. Э. Исследование составов и способов подачи новых топлив с добавками сурепного масла в дизель // Инженерные технологии и системы. 2023. Т. 33, № 1. С. 100–113. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202301.100-113>

© Плотников С. А., Карташевич А. Н., Заболотских Г. Э., 2023



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

The Study of Compositions and Methods of Supplying New Fuels with Additives of Brassica Rapa Oil to the Diesel

S. A. Plotnikov^a✉, A. N. Kartashevich^b, G. E. Zabolotskikh^a

^a Vyatka State University (Kirov, Russian Federation)

^b Belarusian State Agricultural Academy

(Gorki, Republic of Belarus)

✉ plotnikovsa@bk.ru

Abstract

Introduction. Physico-chemical properties of the diesel fuel emulsion with Brassica rapa oil and ethanol have been studied. The use of blended fuel does not make structural changes in the engine, but only the improvement of the attachments: the power supply system of the internal combustion engine.

Aim of the Article. The article aims at determining the effect of additives of Brassica rapa oil and ethanol in commercial diesel fuel in different quantities on such indicators as density, kinematic viscosity, and the lowest specific heat of combustion of mixtures and determining the optimal mixture of fuels for bench tests on the diesel.

Materials and Methods. There were used the following equipment: laboratory scales VIBRAAJH-620CE, pycnometer PZh2-10-KSh 7/16, viscosimeter VPZh-2, and electronic stopwatch.

Results. The dependence between the density, kinematic viscosity and concentration of additives in blended fuels has been determined. The relationship between the kinematic viscosity of oils and the lower specific heat of combustion has been noted. The dynamics of a decrease in the average lower specific heat of combustion of blends relative to an increase in the concentration of blended fuels is presented.

Discussion and Conclusion. For bench tests on the engine, there were selected two blends 10% Brassica rapa +10% Ethanol+80% Diesel and 25% Brassica rapa +25% Ethanol +50% Diesel. When selecting the mixtures, the focus was on 4 parameters: kinematic viscosity, density, stability time, and lower specific heat of combustion.

Keywords: Brassica rapa, Brassica rapa oil, ethanol, diesel fuel, kinematic viscosity, density, lower specific heat of combustion, dependence, dynamics, mixed fuel, power system

Acknowledgements: The authors would like to thank the outside contributors who made significant contributions to the study.

Conflict of interest: The authors declare no conflict of interest.

For citation: Plotnikov S.A., Kartashevich A.N., Zabolotskikh G.E. The Study of Compositions and Methods of Supplying New Fuels with Additives of Brassica Rapa Oil to the Diesel. *Engineering Technologies and Systems*. 2023;33(1):100–113. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202301.100-113>

Введение

В настоящее время все чаще встает вопрос развития альтернативной энергетики. Это связано с дефицитом энергоносителей и увеличением их стоимости [1].

Technologies, machinery and equipment

Для экономии ископаемых энергоресурсов необходимо внедрение новых технологий энергосбережения. К такому можно отнести, например, альтернативные виды топлив для

автотракторных дизельных двигателей на основе растительных масел. Однако по причине различий физико-химических и энергетических свойств альтернативных топлив использование их в чистом виде в двигателях ограничено по ряду конструктивных причин. Они вносятся в классическое дизельное топливо (ДТ) в виде добавок [1; 2].

Необходимо создать такой состав смесового топлива, который будет близок к чистому минеральному ДТ по физико-химическим свойствам (плотности, кинематической вязкости и т. д.), позволит при этом сохранить моторные качества двигателя и снизить эмиссию выхлопных газов. Важно отметить, что при использовании выведенного в статье состава смесового топлива не будет производиться конструктивных изменений в двигателе, а только усовершенствование навесного оборудования (системы питания ДВС).

Использование масел в производстве биодизельного топлива находит активное применение уже несколько лет, например в странах Европы. Для производства этого топлива применяют метиловый эфир рапсового масла, который вносится в чистое ДТ¹ [3]. Данный вид топлива позволяет снизить содержание вредных веществ в процессе работы двигателя, таких как сажа, формальдегид, оксиды азота, углеводороды, оксид углерода, диоксид серы, бензоперен [4; 5]. Эти и многие другие компоненты негативно действуют как на здоровье человека, так и на окружающую среду. Но производство метилового эфира требует использования сложного дорогостоящего оборудования, что делает получение этого продукта затратным.

В данной статье внимание будет уделено добавке сурепно-этаноловой эмульсии к ДТ, так как по своим физико-химическим свойствам сурепное

масло близко к рапсовому маслу. Кроме того, обе этих культуры хоть и различны в ботаническом отношении, но схожи в сельскохозяйственном плане. Обе они являются сидератами, обогащают в ходе своего роста почву азотом и угнетают рост сорняков. Сурепицу отличает высокая урожайность, а значит, и объем производимого масла будет выше. На данный момент распространение сурепицы на территории РФ нельзя сравнить с более популярным рапсом, хотя она выгодно отличается от рапса своей неприхотливостью и способна произрастать на разнообразных почвах [6].

В. В. Крюков в своих исследованиях обращал внимание на возможность использования топлива на сурепно-минеральной основе для работы автотракторного двигателя, но добавок спиртов к этому смесовому топливу применено не было. В нашем исследовании решено было добавить этиловый спирт к сурепному маслу (СурМ) и ДТ. Выбор именно этого вида спирта основывался на меньшей токсичности и окисляемости относительно, например, метилового спирта. Но спирты в маслах и ДТ практически не растворяются, что приводит к фазовому разделению компонентов. Именно для этой цели необходимо разработать оборудование для топливоподготовки, которое будет готовить однородное топливо при постоянном перемешивании компонентов.

Было проведено исследование необходимой концентрации добавки компонентов. Учитывались такие параметры, как плотность, кинематическая вязкость и низшая удельная теплота сгорания. На основе этих параметров был выявлен ряд зависимостей.

Цель исследования – определение влияния добавок сурепного масла и этанола разных концентраций в чистое

¹ Was ist Biodiesel [Электронный ресурс]. URL: <http://https://www.bioe.ch/biodiesel/was-ist-biodiesel> (дата обращения: 10.10.2022).

дизельное топливо на показатели, такие как плотность, кинематическая вязкость, низшая удельная теплота сгорания смесей, чтобы найти оптимальную смесь для стеновых испытаний на дизеле.

Обзор литературы

Сурепица (лат. *Brassica rapa*) известна человечеству приблизительно 4 000–6 000 лет. Данный вид был примечателен тем, что имел в своем генетическом коде три набора хромосом. Такой обширный генетический потенциал обеспечил создание разнообразных подвидов дикорастущей сурепицы. В результате одомашнивания появились современные овощи и масличные культуры, которые содержали уже два набора хромосом [7]. Позднее сурепицу стали выращивать в Европе. Например, в Древнем Риме она являлась важным продуктом питания, а масло из ее семян служило заправкой для лампад. Позднее сурепица распространилась на Востоке и по всему миру² [8].

Сурепица озимая наиболее приспособлена к климату России. Данный подвид европейского вида репы характеризуется тонким несъедобным корнем, продолжительной стадией яровизации, высокой зимостойкостью. В связи с «утопленностью» точки роста сурепицы в почву эта культура способна успешно противостоять влиянию неблагоприятных факторов зимнего периода [9–11].

А. П. Уханов и Д. А. Уханов активно изучали сурепное масло в качестве добавки к минеральному дизельному топливу [12]. Проведен

хроматографический анализ СурМ и дизельного смесового топлива (жирно-кислотный состав и физико-химические свойства) для оценки целесообразности использования СурМ в качестве добавки для минерального ДТ для автотракторных дизелей. Анализ данных показал обратно пропорциональную зависимость концентрации минерального ДТ в смесовом топливе и жирно-кислотного состава смесового топлива. Так, при увеличении концентрации чистого ДТ до 75 % в смеси был отмечен рост содержания эруковой, стеариновой, бегеновой и арахиновой кислот. Для улучшения качества смешивания ученые предложили метод ультразвуковой обработки при помощи диспергатора УЗДН-2Т. Обработка ультразвуком привела к изменению вида содержащихся в смесовых топливах высших жирных кислот³.

В. В. Крюков продолжил изучать физико-химические свойства сурепного масла. Исходя из результатов анализа сурепного масла с применением хроматографа, удалось вычислить низшую теплоту сгорания и рассчитать элементарный состав, а также разработать систему питания, которая позволяет производить смешивание компонентов, контролируя при этом соотношение биоконпонента в чистом ДТ в зависимости от требуемого режима работы и погодных (температурных) условий эксплуатации двигателя⁴.

В. В. Крюков отмечает, что при росте концентрации СурМ в ДТ наблюдается снижение средней скорости нарастания давления газов в рабочей камере дизеля,

² Tarlach G. The Deep Roots of the Vegetable That ‘Took Over the World’ [Электронный ресурс] // Atlas Obscura. 30 June 2021. URL: <https://www.atlasobscura.com/articles/brassica-rapa-vegetable-domestication> (дата обращения: 10.10.2022).

³ Влияние ультразвуковой обработки биотоплива на показатели работы тракторного дизеля / Д. А. Уханов [и др.] // Вклад молодых ученых в инновационное развитие АПК России : сб. материалов Всероссийской НПК. Пенза : РИО ПГСХА, 2009. С. 11–13.

⁴ Крюков В. В. Оценка эксплуатационных показателей сельскохозяйственного трактора при работе на сурепно-минеральном топливе: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Пенза, 2014. 20 с. ; Крюков В. В. Смесовое сурепно-минеральное топливо: результаты экспериментальных исследований и технические решения // Вклад молодых ученых в инновационное развитие АПК России : сб. материалов Всероссийской НПК. Пенза : РИО ПГСХА, 2012. С. 202–204.

а также уменьшение максимального давления цикла, что делает рабочий процесс двигателя на смесевых топливах, в сравнении с работой на чистом ДТ, более «мягким»⁵.

Вторым дополнительным компонентом, который планируется добавить в исследуемую смесь, является этанол (Э). Увеличение его содержания делает рабочий процесс более «жестким», что связано с повышением максимума скорости активного тепловыделения при работе двигателя на смеси этанола с чистым ДТ при частоте 1 200 мин⁻¹. С повышением частоты вращения происходит снижение максимума скорости активного тепловыделения⁶ [13; 14].

Предположительно, добавление сурепного масла к этанолу в равных концентрациях позволит максимально приблизить работу двигателя по моторным характеристикам к работе на чистом ДТ.

Следовательно, мы должны определить такое содержание компонентов СурМ и Э в смесевом топливе на основе ДТ, которое будет соответствовать физико-химическим характеристикам

чистого ДТ (плотности, кинематической вязкости, низшей удельной теплоте сгорания)⁷ [15].

Материалы и методы

Первоначально были изучены физико-химические свойства смесевых топлив. В качестве объектов для исследования были подготовлены смеси сурепного масла, этилового спирта и ДТ разных концентраций: 5%СурМ+5%Эт+90% ДТ, 10%СурМ+10%Эт+80% ДТ, 15%СурМ+15%Эт+70% ДТ, 20%СурМ+20%Эт+60% ДТ, 25%СурМ+25%Эт+50%ДТ. Кроме этого, в каждый образец было добавлено от 0,5 до 1,0 % диспергирующей присадки С-5А для увеличения времени стабильности смесей. Определяли плотность и кинематическую вязкость, а также время стабильности смесей к фазовому разделению.

Использовали физико-химическое (вискозиметр ВПЖ-2, пикнометр ПЖ2-10-КШ 7/16), а также сопутствующее ему (весы лабораторные VIBRAAJH-620CE, электронный секундомер) оборудование (рис. 1).



Р и с. 1. Используемое оборудование: а) пикнометр ПЖ2-10-КШ 7/16; б) весы лабораторные VIBRAAJH-620CE; в) электронный секундомер; д) вискозиметр ВПЖ-2

F i g. 1. The equipment used: а) pycnometer PZh 2-10-KSh 7/16; б) laboratory scales VIBRAAJH-620CE; в) electronic stopwatch; д) viscometer VPZh-2

⁵ Там же.

⁶ Там же.

⁷ Плотников С. А., Черемисинов П. Н. Исследование свойств альтернативных топлив на основе рапсового масла // Общество, наука, инновации (НПК-2017): Всерос. ежегод. науч.-практ. конф. : сб. статей. Киров, 2017. С. 1875–1882.

Необходимо было для каждой пробы определить такие физические величины, как кинематическая вязкость, плотность и время стабильности смеси. Нужно отметить, что опыты проводились при нормальном атмосферном давлении (760 мм рт. ст.) при температуре окружающей среды 20 °С.

Поскольку при использовании пикнометра ПЖ2-10-КШ 7/16 плотность является расчетной величиной, для проведения эксперимента дополнительно понадобились лабораторные весы VIBRAALH-620CE (рис. 1 а, б). Метод и выходные значения были взяты из ГОСТ 3900-85 «Нефть и нефтепродукты. Методы определения плотности».

Расчет производился согласно формуле:

$$\rho = \frac{m_{\text{пик. смес.}} - m_{\text{пус. пик.}}}{m_{\text{пик. дис.}} - m_{\text{пус. пик.}}} \cdot 0,99703, \text{ г/см}^3, (1)$$

где $m_{\text{пик. смес.}}$ – суммарная масса, состоящая из массы пустого пикнометра и массы смеси; $m_{\text{пус. пик.}}$ – масса пустого пикнометра; $m_{\text{пик. дис.}}$ – суммарная масса, состоящая из массы пикнометра и массы содержащейся в нем дистиллированной воды; 0,99703 – коэффициент,

характеризующий относительную плотность воды при температуре 20 °С.

Для определения динамической вязкости использовался вискозиметр ВПЖ-2 (диаметр капилляра $d = 0,99$ мм) (рис. 2д).

Расчет кинематической вязкости был произведен по формуле:

$$\nu = \frac{\eta}{\rho}, \text{ см}^2/\text{с}, (2)$$

где η – динамическая вязкость, г/см·с; ρ – плотность исследуемой жидкости, г/см³.

Время стабильности смеси T было определено в результате визуального наблюдения. С помощью электронного секундомера фиксировался момент фазового разделения образцов смесей [16].

Результаты исследования

На основе результатов исследования (табл. 1) получены наглядные графики.

Как видно из таблицы 1, был проведен анализ 5 образцов ДТ, СурМ и Э. Ниже описываются результаты произведенных наблюдений.

Отмечено, что с увеличением содержания СурМ и Э в ДТ увеличивается кинематическая вязкость (рис. 2). Можно объяснить это тем, что вязкость СурМ существенно выше, чем у ДТ, и составляет $\nu_{\text{СурМ}} = 77,2$ сСт против $\nu_{\text{ДТ}} = 4,5$ сСт.

Т а б л и ц а 1

T a b l e 1

Результаты исследования

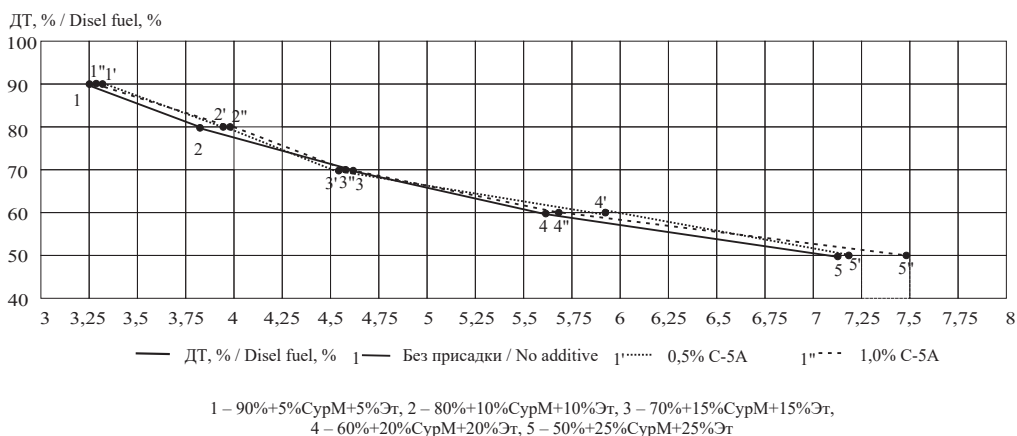
The results of the study

ДТ, % / Diesel fuel, %	СурМ, % / Brassica rapa, %	Эт., % / Ethanol, %	Кинематич. вязкость при $T = 20$ °С, сСт / Kinematic viscosity at $T = 20$ °С, cSt			Плотность при $T = 20$ °С, г/см ³ / Density at $T = 20$ °С, g/cm ³			Время стабильности, мин / Stability time, min		
			Без присадки / No additive	0,5 % C-5A	1,0 % C-5A	Без присадки / No additive	0,5 % C-5A	1,0 % C-5A	Без присадки / No additive	0,5 % C-5A	1,0 % C-5A
90	5	5	3,246	3,322	3,253	0,821	0,816	0,823	>75	78	66
80	10	10	3,838	3,855	3,723	0,818	0,820	0,821	>75	60	52
70	15	15	4,636	4,555	4,440	0,824	0,822	0,825	40	40	33
60	20	20	5,596	5,851	5,659	0,824	0,827	0,829	7	16	18
50	25	25	7,125	7,164	7,469	0,830	0,831	0,834	4,7	11	15

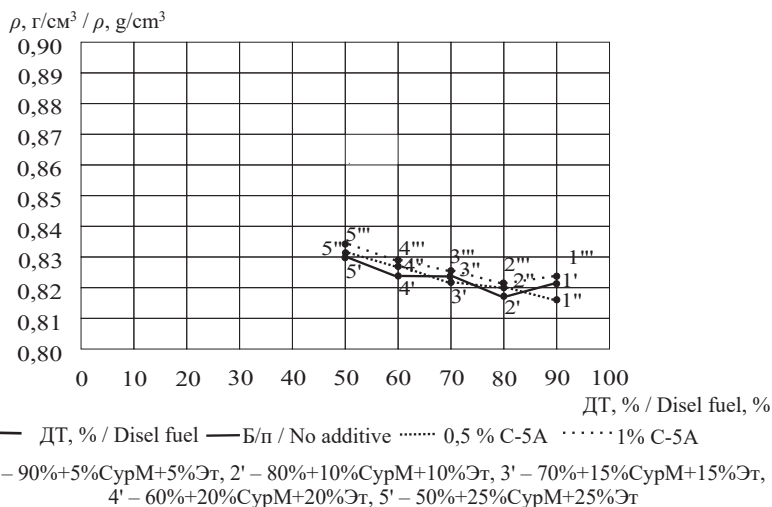
Наличие в смеси этанола снижает общую вязкость смесевоего топлива, но этого недостаточно, чтобы она находилась в рамках, определенных для летнего ДТ (ГОСТ 305–2013 «Топливо дизельное. Технические условия»). Внесение С-5А тоже увеличивает кинематическую вязкость.

Плотность, как и кинематическая вязкость, в смесевых топливах возрастает

при увеличении содержания СурМ и Э, но не так сильно. Наибольшее увеличение плотности смеси на 0,1 г/см³ зафиксировано при 25%СурМ+25%Э+50%ДТ (рис. 3). Таким образом, согласно ГОСТ 305–2013 «Топливо дизельное. Технические условия», плотность чистого ДТ составляет 0,80–0,86 г/см³, а это значит, что все образцы смесей укладываются в эти рамки.



Р и с. 2. Влияние концентрации компонентов (ДТ, СурМ и Э) на кинематическую вязкость смеси
 F i g. 2. The effect of the concentration of components (diesel fuel, Brassica rapa oil, ethanol) on the kinematic viscosity of the mixture



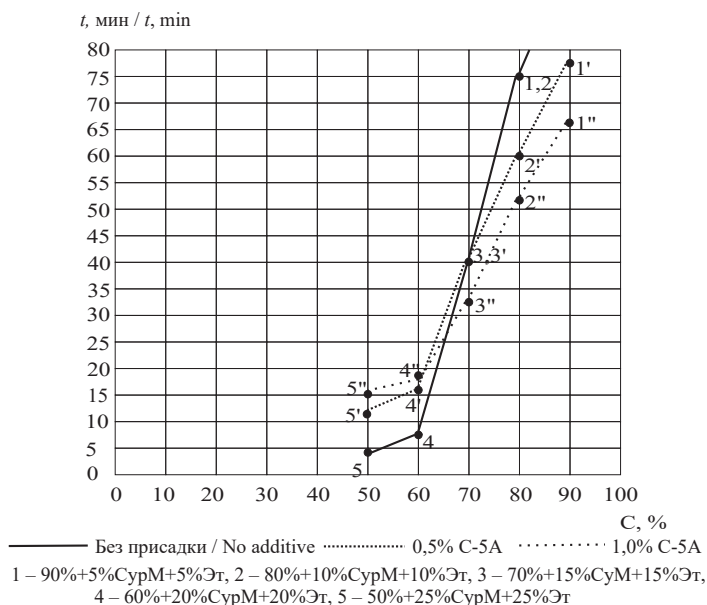
Р и с. 3. Влияние концентрации компонентов на плотность смеси
 F i g. 3. The effect of the concentration of components on the density of the mixture

Экспериментально установлено, что при увеличении содержания СурМ и Э в ДТ снижается время стабильности. Положительное влияние присадки было отмечено с 30 % от общего содержания СурМ и Э (рис. 4).

Отмечена зависимость между кинематической вязкостью масел и низшей удельной теплотой сгорания. Была составлена таблица 2, содержащая вышеизложенные параметры на примере трех масел (хлопковое, рапсовое, сурепное)

и летнего ДТ, для того чтобы проследить взаимосвязь.

График (рис. 5.) показывает, что с ростом кинематической вязкости смесевых топлив снижается низшая удельная теплота сгорания. Предположительно, данный эффект можно объяснить тем, что масла, обладающие наименьшей вязкостью, быстрее испаряются, и содержание газовой фазы, соответственно, выше, а это значит, что фактическая температура возгорания и низшая удельная теплота сгорания топлив будут выше.



Р и с. 4. Влияние концентрации компонентов и наличия присадки в смесях на изменение времени стабильности

Fig. 4. The effect of the concentration of components and the presence of additives in mixtures on the change in stability time

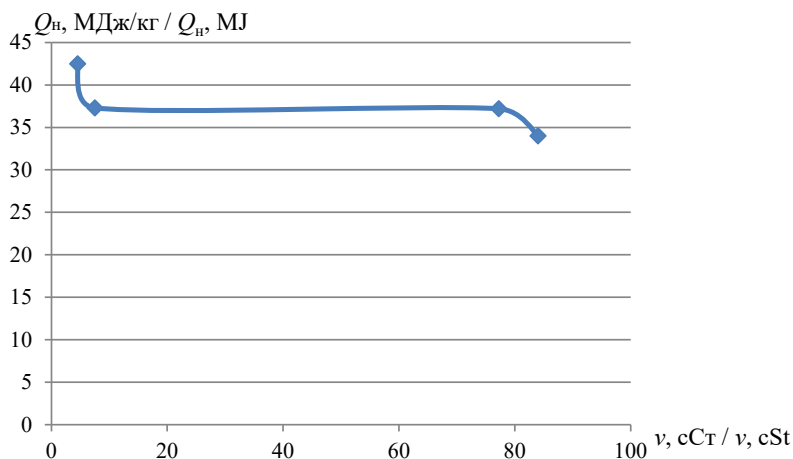
Т а б л и ц а 2

T a b l e 2

Отношение кинематической вязкости растительных масел и ДТ к их низшей удельной теплоте сгорания

Ratio of the kinematic viscosity of vegetable oils and Diesel fuel to their lowest specific heat of combustion

	ХлопокМ / Cotton oil	СурМ / Brassica rapa oil	PM / Rapeseed oil	ДТ / Diesel fuel
ν , cСт / ν , cSt	84	77,2	7,5	4,5
$Q_{н'}$, МДж/кг / $Q_{н'}$, MJ/kg	34	37,2	37,3	42,5

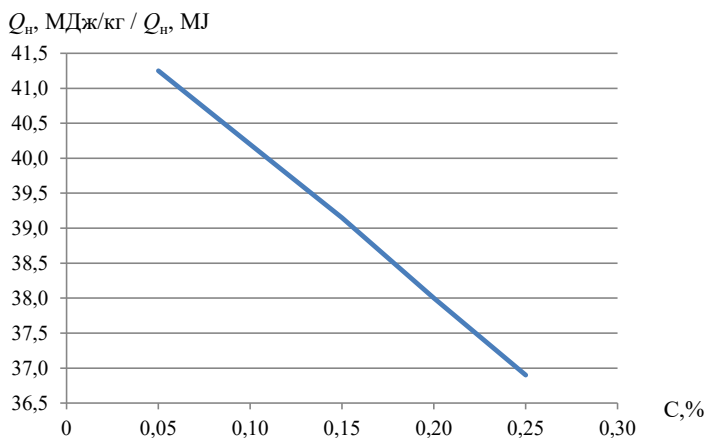


Р и с. 5. Отношение кинематической вязкости растительных масел и ДТ к их низшей удельной теплоте сгорания

F i g. 5. Ratio of the kinematic viscosity of vegetable oils and diesel fuel to their lowest specific heat of combustion

Среди проанализированных видов масел видно, что наиболее близко к ДТ по Q_n рапсовое и сурепное масла, но рапсовое масло уже давно нашло свое применение в производстве альтернативного топлива, тогда как сурепное на данный момент недостаточно изучено в этом отношении. Но кинематическая вязкость СурМ выше вязкости ДТ примерно в 17,2 раза, а это значит, что

в процессе топливоподготовки перед смешением на него придется произвести либо физическое, либо химическое воздействие [17; 18]. Возможно в этом случае применение Э, так как он при $v = 1,5 \text{ сСт}$ имеет $Q_n = 30,6 \text{ МДж/кг}$, что позволило бы при постоянном смешивании в равных соотношениях с СурМ добиться $v_{\text{ср}} = 39,4 \text{ сСт}$, а $Q_{n(\text{ср})} = 33,9 \text{ МДж/кг}$, при этом средняя вязкость снизится примерно в 2 раза.



Р и с. 6. Снижение $Q_{n(\text{средн.})}$ при увеличении концентрации смеси СурМ:Э:ДТ (5:5:90, 10:10:80, 15:15:70, 20:20:60, 25:25:50)

F i g. 6. A decrease in $Q_{n(\text{средн.})}$ with an increase in the concentration of a mixture of Brassica rapa oil, ethanol and diesel fuel (5:5:90, 10:10:80, 15:15:70, 20:20:60, 25:25:50)

Из данного графика (рис. 6.) видна динамика снижения $Q_{n(\text{средн.})}$ относительно увеличения концентрации смесевых топлив. При 10%СурМ+10%Э+80%ДТ она составляет 40,2 МДж/кг, а при 25%СурМ+25%Э+50%ДТ – 36,9 МДж/кг. Таким образом, согласно ГОСТ «305-2013 Топливо дизельное. Технические условия», Q_n смесей указанных концентраций близка к $Q_{n(\text{ДТлетн.})} = 42,5$ МДж/кг.

Опираясь на вышеизложенные результаты исследования, приходим к выводу, что возникает необходимость усовершенствования системы питания дизеля. Проанализировав двухтопливные системы питания с возможностью автоматического регулирования состава смесевых топлив, установили, что они имеют общий недостаток, а именно невозможность автоматического регулирования оптимального установочного угла опережения впрыскивания топлива при работе двигателя на разных смесевых составах [19; 20].

Обсуждение и заключение

Для дальнейших стендовых испытаний на двигателе были определены 2 смеси 10%СурМ+10%Э+80%ДТ и 25%СурМ+25%Э+50%ДТ. При выборе этих смесей основное внимание уделялось 4 параметрам, а именно: кинематической вязкости, плотности, времени стабильности и низшей удельной теплоте сгорания:

1. Кинематическая вязкость летнего ДТ составляет 4,5 сСт. При увеличении концентрации добавок она увеличивается при 1 % С-5А до 7,5 сСт. Это связано с тем, что $v_{\text{СурМ}}$ выше $v_{\text{ДТ}}$ в 17,2 раза. Это значит, что при использовании смеси 25%СурМ+25%Э+50%ДТ на нее нужно будет оказывать тепловое воздействие перед подачей на форсунки. В смеси 10%СурМ+10%Э+80%ДТ с 1 % содержания С-5А она $Q_n = 3,7$ сСт, что ниже $Q_{n(\text{ДТ})}$.

2. При увеличении концентрации смесевых топлив плотность тоже

несущественно возрастает, но ее динамика выражена менее явно. Только на максимальном содержании добавок 25%СурМ+25%Э+50%ДТ она увеличится на 0,1 г/см³. Согласно ГОСТ 305—2013 «Топливо дизельное. Технические условия», плотность чистого ДТ составляет 0,80–0,86 г/см³, а это значит, что все образцы смесей укладываются в эти рамки.

3. При увеличении содержания СурМ и Э в смеси отмечено снижение времени стабильности. На увеличение времени стабильности влияет добавление присадки, начиная с 30 % от общего содержания СурМ и Э. Лучший результат достигнут при 10%СурМ+10%Э+80%ДТ, он составил 52 мин. То есть применяемое смесевое топливо нуждается в постоянном перемешивании для стабильности смеси.

4. Низшая удельная теплота сгорания СурМ, по сравнению с другими растительными маслами, относительно высока ($Q_{n(\text{СурМ})} = 37,2$ МДж/кг, $Q_{n(\text{ДТ})} = 42,5$ МДж/кг) и примерно равна РМ. РМ уже долгое время активно применяется в мировой промышленности как компонент для производства биодизеля, тогда как СурМ не так хорошо изучено. Но $v_{\text{СурМ}}$ выше $v_{\text{ДТ}}$ примерно в 17,2 раза, следовательно, в процессе топливоподготовки перед смешением на него придется произвести либо физическое, либо химическое воздействие. Возможно в этом случае применение Э, так как он при $v = 1,5$ сСт имеет $Q_n = 30,6$ МДж/кг, что позволило бы при постоянном смешивании в равных соотношениях с СурМ добиться $v_{\text{ср}} = 39,4$ сСт, а $Q_{n(\text{ср})} = 33,9$ МДж/кг, при этом средняя вязкость снизится примерно в 2 раза.

Поскольку смесевые топлива всегда будут в некоторой степени отличаться друг от друга по своим физико-химическим свойствам, необходимо проводить работу над усовершенствованием системы питания⁸ [21; 22]. Изученные

⁸ Плотников С. А., Черемисинов П. Н. Исследование свойств альтернативных топлив на основе рапсового масла // Общество, наука, инновации (НПК-2017) : Всерос. ежегод. науч.-практ. конф. : сб. статей. Киров, 2017. С. 1875–1882.

системы питания для дизеля с добавлением биокомпонента имеют ряд преимуществ. К ним можно отнести наличие установленных перед смесителем специальных дозаторов. Эти дозаторы могут управляться, либо кинематически (посредством тяг со впускным коллектором дизеля) [19], либо электронным способом (через ЭБУ с датчиком температуры растительного топлива и индуктивным датчиком нагрузочного и скоростного

режимов двигателя) [20]. Основным недостатком этих систем является то, что они не имеют возможности автоматического регулирования угла опережения впрыска для оптимальной работы дизеля, хотя разработка таковой позволила бы двигателю работать на любом из предложенных составов смесевых топлив. Это могло бы гарантировать экономичность, надежность и увеличить ресурс ДВС при работе на смесях с растительными добавками.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белов В. М., Деянин С. Н., Слепцов О. Н. Применение в дизелях топлива растительного происхождения // Вести Моск. гос. агроинж. ун-та. 2003. Вып. 4. С. 15–21.
2. Карташевич А. Н., Плотников С. А., Черемисинов П. Н. Исследование свойств альтернативных топлив на основе рапсового масла // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. 2017. № 3. С. 144–147. URL: <https://clck.ru/33Zrjc> (дата обращения: 10.10.2022).
3. Effect of Two-Stage Injection on Combustion and Emissions under High EGR Rate on a Diesel Engine by Fueling Blends of Diesel/Gasoline, Diesel/N-Butanol, Diesel/Gasoline/N-Butanol and Pure Diesel / Z. Zheng [et al.] // Energy Conversion and Management. 2015. Issue 90. doi: <http://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.11.011>
4. Emission and Vibration Analysis of Diesel Engine Fueled Diesel Fuel Containing Metallic Based Nanoparticles / A. Yasar [et al.] // Fuel. 2018. Issue 239. P. 1224–1230. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.11.113>
5. Specific Features of Diesel Fuel Supply under Ultra-High Pressure / J. Zhao [et al.] // Applied Thermal Engineering. 2020. Issue 179. doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115699>
6. Виноградов Д. В. Сурепица яровая в южной части нечерноземной зоны // АГРО XXI: электрон. научн. журн. 2010. № 7–9.
7. Brassica Rapa Domestication: Untangling Wild and Feral Forms and Convergence of Crop Morphotypes / A. C. McAlvay [et al.] // Molecular Biology and Evolution. 2021. Vol. 38, Issue 8. P. 3358–3372. doi: <https://doi.org/10.1093/molbev/msab108>
8. Oil Content and Fatty Acids Composition in Brassica Species / Y. Sharafi [et al.] // International Journal of Food Properties. 2015. Vol. 18, Issue 10. P. 2145–2154. doi: <https://doi.org/10.1080/10942912.2014.968284>
9. Svalof F. Per en Vinterhardig Lagerukahostrybs // Aktuell. 1985. Issue 2. P. 8–9.
10. Grabiek B. Reacjia rzepaku ozimego na nizkie temperatury // Nove rol. 1970. Issue 1. P. 10–11.
11. Dhahad H. A., Chaichan M. T. The Impact of Adding Nano-Al₂O₃ and Nano-Zn to Iragi Diesel Fuel in Terms of Compression Ignition Engines' Performance And Emitted Pollutants // Thermal Science and Engineering Progress. 2020. Issue 18. doi: <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2020.100535>
12. Использование сурепно-минерального топлива в тракторном дизеле / А. П. Уханов [и др.] // Нива Поволжья. 2012. № 2. С. 70–75. URL: <https://clck.ru/33ZrZq> (дата обращения: 10.10.2022).
13. Effects of Gasoline Research Octane Number on Premixed Low-Temperature Combustion of Wide Distillation Fuel by Gasoline/Diesel Blend / H. Liu [et al.] // Fuel. 2014. Issue 134. P. 381–388. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.06.019>

14. Venu H., Madhavan V. Effect of Al₂O₃ Nanoparticles in Biodiesel-Diesel-Ethanol Blends at Various Injection Strategies: Performance, Combustion and Emission Characteristics // *Fuel*. 2016. Issue 186. P. 176–189. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.08.046>
15. Плотников С. А., Карташевич А. Н., Черемисинов П. Н. Улучшение смесей дизельного топлива с рапсовым маслом для использования в тракторных дизелях // *Двигателестроение*. 2017. № 4. С. 21–25.
16. Исследование свойств новых топлив для автотракторной техники / С. А. Плотников [и др.] // *Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета имени П. А. Костычева*. 2022. Т. 14, № 1. С. 117–125. doi: <https://doi.org/10.36508/RSATU.2022.92.31.014>
17. Lenin M. A., Swaminathan M. R., Kumaresan G. Performance and Emission Characteristics of a DI Diesel Engine with a Nanofuel Additive // *Fuel*. 2013. Issue 109. P. 362–365. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.03.042>
18. Preferential Cavitation and Friction-Induced Heating of Multi-Component Diesel Fuel Surrogates Up to 450MPa / A. Vidal [et al.] // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2021. Issue 166. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120744>
19. Двухтопливная система питания дизеля с автоматическим регулированием состава смеси топлива : патент Российская Федерация 2476716 / Уханов А. П. [и др.]. Аналог.
20. Двухтопливная система питания : патент 2484291 Российская Федерация / Уханов А. П. [и др.]. Прототип.
21. Марков В. А. Теплоэнергетические установки и их системы автоматического управления и регулирования // *Вестник Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Серия Машиностроение*. 2020. № 6. С. 106–130. doi: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2020-6-106-130>
22. Исследование работы автотракторного дизеля 4ЧН 11,0/12,5 на смесях дизельного топлива с рапсовым маслом / С. А. Плотников [и др.] // *Молочнохозяйственный вестник*. 2017. № 1. С. 110–118. URL: <https://click.ru/33ZsbC> (дата обращения: 10.10.2022).

Поступила 17.10.2022; одобрена после рецензирования 15.02.2023; принята к публикации 20.02.2023

Об авторах:

Плотников Сергей Александрович, доктор технических наук, профессор кафедры технологии машиностроения Вятского государственного университета (610000, Российская Федерация, г. Киров, ул. Московская, д. 36), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8887-4591>, Researcher ID: R-8491-2016, plotnikovsa@bk.ru

Карташевич Анатолий Николаевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой тракторов, автомобилей и машин для природообустройства Белорусской ГСХА (213410, Республика Беларусь, г. Горки, ул. Мичурина, д. 5), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3649-1521>

Заболотских Георгий Эдуардович, аспирант кафедры технологии машиностроения Вятского государственного университета (610000, Российская Федерация, г. Киров, ул. Московская, д. 36), Researcher ID: GWV-5405-2022, zabolotskikh88@yandex.ru

Заявленный вклад авторов:

С. А. Плотников – общее руководство, постановка задач исследования.

А. Н. Карташевич – теоретический анализ, формулировка выводов.

Г. Э. Заболотских – проведение лабораторных исследований.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Belov V.M., Devyanin S.N., Sleptsov O.N. [The Use of Plant-Based Fuels in Diesels]. *Vesti Mosk. gos. agroinzh. un-ta*. 2003;4:15–21. (In Russ.)

2. Kartashevich A.N., Plotnikov S.A., Cheremisinov P.N. [Study of Properties of Alternative Fuels Based on Rapeseed Oil]. *Vestnik Belorusskoy gosudarstvennoy selskokhozyaystvennoy akademii*. 2017;(3):144–147. Available at: <https://clck.ru/33Zrjc> (accessed 10.10.2022). (In Russ.)
3. Zheng Z., Yue L., Liu H., et al. Effect of Two-Stage Injection on Combustion and Emissions under High EGR Rate on a Diesel Engine by Fueling Blends of Diesel/Gasoline, Diesel/N-Butanol, Diesel/Gasoline/N-Butanol and Pure Diesel. *Energy Conversion and Management*. 2015;(90). doi: <http://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.11.011>
4. Yasar A., Keskin A., Yıldızhan S., Uludamar E. Emission and Vibration Analysis of Diesel Engine Fueled Diesel Fuel Containing Metallic Based Nanoparticles. *Fuel*. 2018;239:1224–1230. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.11.113>
5. Zhao J., Grekhov L., Ma X., Denisov A. Specific Features of Diesel Fuel Supply under Ultra-High Pressure. *Applied Thermal Engineering*. 2020;(179). doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaling.2020.115699>
6. Vinogradov D.V. [Spring Brassica Rapa in the Southern Part of the Non-Chernozem Zone]. *AGRO XXI: elektron. nauchn. zhurn*. 2010;(7–9). (In Russ.)
7. McAlvay A.C., Ragsdale A.P., Mabry M.E., et al. Brassica Rapa Domestication: Untangling Wild and Feral Forms and Convergence of Crop Morphotypes. *Molecular Biology and Evolution*. 2021;38(8):3358–3372. doi: <https://doi.org/10.1093/molbev/msab108>
8. Sharafi Y., Majidi M.M., Goli A.M.H., Rashidi F. Oil Content and Fatty Acids Composition in Brassica Species. *International Journal of Food Properties*. 2015;18(10):2145–2154. doi: <https://doi.org/10.1080/10942912.2014.968284>
9. Svalof F. Per en Vinterhardig Lagerukahostrybs. *Aktuellt*. 1985;(2):8–9.
10. Grabiek B. Reacjia rzepaku ozimego na nizkie temperatury. *Nove rol*. 1970;(1):10–11.
11. Dhahad H.A., Chaichan M.T. The Impact of Adding Nano-Al₂O₃ and Nano-Zn to Iragi Diesel Fuel in Terms of Compression Ignition Engines' Performance And Emitted Pollutants. *Thermal Science and Engineering Progress*. 2020;(18). doi: <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2020.100535>
12. Ukhanov A.P., Ukhanov D.A., Chernyakov A.A., Kryukov V.V. [Use of Brassica Rapa Oil and Mineral Fuel in a Tractor Diesel Engine]. *Niva Povolzhya*. 2012;(2):70–75. Available at: <https://clck.ru/33Zrzq> (accessed 10.10.2022). (In Russ.)
13. Liu H., Wang Z., Wang J., He X. Effects of Gasoline Research Octane Number on Premixed Low-Temperature Combustion of Wide Distillation Fuel by Gasoline/Diesel Blend. *Fuel*. 2014;(134):381–388. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.06.019>
14. Venu H., Madhavan V. Effect of Al₂O₃ Nanoparticles in Biodiesel-Diesel-Ethanol Blends at Various Injection Strategies Strategies: Perfomance, Combustion and Emission Characteristics. *Fuel*. 2016;(186):176–189. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.08.046>
15. Plotnikov S.A., Kartashevich A.N., Cheremisinov P.N. [Improving Blends of Diesel Fuel with Rapeseed Oil for Use in Tractor Diesels]. *Dvigatelistroenie*. 2017;(4):21–25. (In Russ.)
16. Plotnikov S.A., Zabolotskikh G.E., Kantor P.Ya., Vtyurina M.N. Investigation of the Properties of New Fuels for Automotive Equipment. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo agrotekhnologicheskogo universiteta imeni P. A. Kostycheva*. 2022;14(1):117–125. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.36508/RSATU.2022.92.31.014>
17. Lenin M.A., Swaminathan M.R., Kumaresan G. Perfomance and Emission Characteristics of a DI Diesel Engine with a Nanofuel Additive. *Fuel*. 2013;(109):362–365. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.03.042>
18. Vidal A., Kolovos K., Gold M.R., et al. Preferential Cavitation and Friction-Induced Heating of Multi-Component Diesel Fuel Surrogates Up to 450MPa. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2021;(166). doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120744>
19. Ukhanov A.P., Ukhanov D.A., Sidorov Ye.A., et al. [Dual-Fuel Diesel Fuel System With Automatic Regulation of the Blend Fuel Composition]. Patent 2,476,716 Russian Federation. Analogue. (In Russ.)



20. Ukhanov A.P., Ukhanov D.A., Godina Ye.D., Khokhlova Ye.A. [Dual-Fuel Power System]. Patent 2,484,291 Russian Federation. Prototype. (In Russ.)

21. Markov V.A. Heat and Power Plants and Their Automatic Control and Regulation Systems. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering*. 2020;(6):106–130. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2020-6-106-130>

22. Plotnikov S.A., Cheremisinov P.N., Kartashevich A.N., Biryukov A.L. Study of Car-And-Tractor Diesel 4c4ss (4 Cylinder 4 Stroke Supercharger) 11,0/12,5 Work on Diesel Fuel Mixtures with Rapeseed Oil. *Molochnokhozyaystvennyy vestnik*. 2017;(1):110–118. Available at: <https://clck.ru/33ZsbC> (accessed 10.10.2022). (In Russ., abstract in Eng.)

Submitted 17.10.2022; revised 15.02.2023; accepted 20.02.2023

About the authors:

Sergey A. Plotnikov, Dr.Sci. (Engr.), Professor of the Chair of Mechanical Engineering Technology, Vyatka State University (36 Moskovskaya St., Kirov 610000, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8887-4591>, Researcher ID: R-8491-2016, plotnikovsa@bk.ru

Anatoly N. Kartashevich, Dr.Sci. (Engr.), Professor, Head of the Chair of Tractors, Automobiles and Environmental Engineering Machines, Belarusian State Agricultural Academy (5 Michurin St., Gorki 213410, Republic of Belarus), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3649-1521>

Georgiy E. Zabolotskikh, Postgraduate Student of the Chair of Mechanical Engineering Technology, Vyatka State University (36 Moskovskaya St., Kirov 610000, Russian Federation), Researcher ID: [GWV-5405-2022](https://orcid.org/0000-0002-5405-2022), zabolotskikh88@yandex.ru

Authors contribution:

S. A. Plotnikov – general management, setting research objectives.

A. N. Kartashevich – theoretical analysis, formulation of conclusions.

G. E. Zabolotskikh – conducting laboratory tests.

All authors have read and approved the final manuscript.