

СОЗДАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ БИОТОПЛИВ ДЛЯ ТРАКТОРНЫХ ДИЗЕЛЕЙ

CREATION AND STUDY OF THE PROPERTIES OF MULTICOMPONENT BIOFUELS FOR TRACTOR DIESEL ENGINES

С.А. ПЛОТНИКОВ, д.т.н.
А.Н. КАРТАШЕВИЧ, д.т.н.
М.Н. ГЛУШКОВ
А.И. ШИПИН

Вятский государственный университет (ВятГУ), Киров,
Россия, PlotnikovSA@bk.ru

S.A. PLOTNIKOV, DSc in Engineering
A.N. KARTASHEVICH, DSc in Engineering
M.N. GLUSHKOV
A.I. SHIPIN

Vyatka State University, Kirov, Russia, PlotnikovSA@bk.ru

В настоящее время наблюдается интерес к нетрадиционным видам топлива, сырьем для которого служат возобновляемые ресурсы различного происхождения, предназначенные для получения, прежде всего, биотоплив. Цены биотоплив соизмеримы с ценами топлив нефтяного происхождения, а в некоторых случаях даже ниже. Наиболее значимые для работы свойства биотоплив не совпадают со свойствами товарных дизельное топливо. В силу этого при конвертации ДВС, изначально созданных для работы на дизельном топливе, под биотоплива обозначается перечень проблем. Одним из продуктивных направлений адаптации ДВС может быть использование многокомпонентных смесевых биотоплив. Расширения многотопливности дизелей и приближения нужных свойств биотоплив к аналогичным для товарного дизельного топлива целесообразнее достичь путем использования многокомпонентных составов, вследствие чего свойства одного топлива могут компенсировать свойства другого.

Исследования в области тепловых двигателей обычно базируются на получении данных стендовых испытаний. Учитывая длительность и трудоемкость такого пути, все чаще стали применяться элементы научного планирования эксперимента. Для сокращения количества опытов было применено планирование эксперимента на основе трехфакторного плана Бокса – Бенкина. Строились уравнения регрессии, проводилась оценка адекватности полученных моделей и оценка значимости его коэффициентов. Опираясь на полученные данные в ходе исследований, было определено процентное соотношение ингредиентов биотопливной композиции исходя из условий достаточной стабильности и кинематической вязкости.

Разработана модернизированная конструкция системы питания сельскохозяйственного трактора для его работы на биотопливной композиции, позволяющая сохранять ее вязкостно-температурные свойства в рамках действующего стандарта независимо от температуры окружающего воздуха. Экспериментальным путем получено подтверждение возможности работы трактора на разработанном составе нового топлива.

Ключевые слова: многокомпонентное биотопливо, дизельное топливо, этанол, рапсовое масло, композиция, планирование эксперимента.

Для цитирования: Плотников С.А., Карташевич А.Н., Глушков М.Н., Шипин А.И. Создание и исследование свойств многокомпонентных биотоплив для тракторных дизелей // Тракторы и сельхозмашины. 2020. № 6. С. 6–12. DOI: 10.31992/0321-4443-2020-6-6-12.

There is an interest in unconventional fuels, their feedstock are renewable resources of various origins, intended for the production, primarily, of biofuels. Biofuel prices are commensurate with the prices of petroleum-based fuels, and in some cases biofuel prices are even lower.

The most significant properties of biofuels for operation do not coincide with the properties of commercial diesel fuel. Due to this, when converting ICEs, originally created for operation on diesel fuel, for biofuels, a list of problems is indicated. One of the productive areas of internal combustion engine adaptation can be the use of multicomponent blended biofuels. Expansion of multi-fuel diesel engines and the approximation of the required properties of biofuels to those for commercial diesel fuel are more expedient to achieve by using multicomponent compositions, the result is that the properties of one fuel can compensate the properties of another.

Research in the field of heat engines is usually based on the acquisition of bench test data. Considering the length and complexity of this path, elements of scientific planning of the experiment are increasingly used. To reduce the number of experiments, experimental design based on the Box-Behnken three-factor design was applied. Regression equations were built, the adequacy of the obtained models was assessed, and the significance of its coefficients was evaluated. Based on the data obtained during the research, the percentage of the ingredients of the biofuel composition was determined taking into account the conditions of sufficient stability and kinematic viscosity.

A modernized design of the power supply system of an agricultural tractor has been developed for its operation on a biofuel composition. It allows to maintain its viscosity-temperature properties within the framework of the current standard, regardless of the ambient temperature. The confirmation of the possibility of tractor operation on the developed composition of the new fuel was obtained experimentally.

Keywords: multicomponent biofuel, diesel fuel, ethanol, rapeseed oil, composition, experiment planning.

Cite as: S.A. Plotnikov, A.N. Kartashevich, M.N. Glushkov, A.I. Shipin Creation and study of the properties of multicomponent biofuels for tractor diesel engines. *Traktory i sel'khoz mashiny*. 2020. No 6, pp. 6–12 (in Russ.). DOI: 10.31992/0321-4443-2020-6-6-12.

Введение

В настоящее время наблюдается глобальный интерес к нетрадиционным видам топлива, сырьем для которого служат возобновляемые ресурсы различного происхождения. Объемы таких ресурсов фактически безграничны [1], и предназначены они для получения, прежде всего, биотоплив. Цены биотоплив соизмеримы с ценами топлив нефтяного происхождения, а в некоторых случаях даже ниже [10].

Следует отметить, что моторные свойства биотоплив более соизмеримы с аналогичными цифрами для дизельных топлив (ДТ), чем автотензинов – в частности, обладают надлежащими значениями плотности и вязкости. Заметным отличием также является пониженная испаряемость [9]. Соответственно, применение биотоплив целесообразнее в дизельных ДВС, т.к. двигатели, работающие с воспламенением от сжатия, менее чувствительны к свойствам моторного топлива. Одновременно дизельным ДВС присущи большая степень сжатия, повышенная потребность в избытке воздуха; дизели имеют несравненно лучшие показатели топливной экономичности, меньшую вредность отработавших газов (ОГ) [2].

Наиболее значимые для работы свойства биотоплив не совпадают со свойствами товарных ДТ. В силу этого при конвертации ДВС, изначально созданных для работы на ДТ, под биотоплива обозначается перечень проблем. К которым относятся иная организация рабочего процесса, отличие процессов питания и регулирования топливом, иные характеристики распыливания и смесеобразования топливовоздушной смеси, особенности сгорания [11]. Отмеченные обстоятельства ведут к нарушению заводских регулировок дизеля, падению ряда его эксплуатационных показателей, форсированному износу деталей и снижению надежности и долговечности двигателя в целом. Одним из продуктивных направле-

ний адаптации ДВС может быть использование многокомпонентных смесевых биотоплив. Расширения многотопливности дизелей и приближения нужных свойств биотоплив к аналогичным для товарного дизельного топлива целесообразнее достичь путем использования многокомпонентных составов, вследствие чего свойства одного топлива могут компенсировать свойства другого. Соответственно, совместное использование части дизельного топлива с рапсовым маслом [8] и этанолом является на сегодняшний день весьма интересной и актуальной задачей.

Исследования в области тепловых двигателей обычно базируются на получении данных стендовых испытаний, построении по их результатам характеристик и дальнейшем глубоком теоретическом анализе полученных кривых. В реальности полученная характеристика является не чем иным, как результатом однофакторного эксперимента. Выяснить характер влияния нескольких факторов на искомый результат в отмеченном случае весьма проблематично. Решение может заключаться в одновременном снятии серии однотипных характеристик, а также совместной оценке других – регулировочных, нагрузочных, скоростных, пусковых, регуляторных и т.п. – характеристик. Такая методика позволяет достоверно выявить характер и уровень влияния любого фактора на интересующие исследователя показатели работы ДВС. Учитывая длительность и трудоемкость такого пути, все чаще стали применяться элементы научного планирования эксперимента.

Применение теории планирования экспериментов в двигателестроении может быть оправдано с различных точек зрения. В первую очередь, это сокращение затрат на оптимизацию, несмотря на многочисленность исследуемых факторов. Также преимуществами можно считать: доступность для научного исследования любых природных процессов; способ-

ность управления самим процессом исследования, возможность прогнозирования данных; желание отмечать и даже снижать множество или подмножество изучаемых факторов и параметров из воздействия; очевидность проведения анализа в сравнении с уже опубликованными данными исследований; повышение точности оценки построенных по полученным уравнениям моделей процессов.

Значительный вклад в развитие и внедрение планирования эксперимента внесли разработки Бокса и Уилсона, данные исследований отечественных ученых Г.К. Круга, Е.В. Марковой, В.В. Федорова, В.В. Налимова. В данное время имеется некоторый опыт использования методик планирования эксперимента в тракторном двигателестроении, отмечающийся высоким качеством полученных при этом результатов. В целом анализ литературных источников говорит о том, что дальнейшие исследования идут в двух направлениях. Во-первых, имеет место развитие методов планирования эксперимента. Во-вторых, происходит дальнейшее накопление опыта, что позволяет использовать методику при исследовании малоизученных процессов ДВС.

Как правило, авторы отмечают, что теорию и методику планирования эксперимента целесообразно использовать в исследовании процесса сгорания или процесса образования токсичных компонентов ОГ или в случае ускоренных испытаний. Тем не менее, отмечается, что в большинстве направлений исследований ДВС наиболее достоверные результаты дают планы экстремальных экспериментов. В нашем случае имеет место оптимизация состава топлива. Наиболее реальную картину оптимизации можно увидеть после оценки влияния составов, не только на показатели процесса сгорания, но и на входные показатели – вязкость, плотность, низкотемпературные и другие свойства моторного топлива. Посредством оптимизации исследуемых факторов и построения поверхностей отклика, в дальнейшем открывается путь исследования самих многокомпонентных составов, учитывая непостоянство режимных факторов работы реального двигателя.

Обзор литературы

Следует отметить, что ряд исследователей уже пытались работать в данном направлении. Например, для оценки совместного влияния

подачи воды и метилового спирта на впуске на эффективные показатели дизеля уже использовались элементы теории планирования [4]. Физический эксперимент осуществлялся на номинальной частоте вращения вала дизеля 2Ч 10,5/12,0. Установочный угол опережения впрыскивания топлива был наивыгоднейшим. Использовался симплекс-решетчатый план Шеффе для исследования определенных участков диаграммы, описывающей состав-свойство. Расположение триангулированных компонентов X_1 , X_2 , X_3 и область экспериментирования представлены на рис. 1.

Полученная диаграмма имела вид равносidedного треугольника. Грани треугольника представляли собой оси координат, причем любой точке треугольника был присущ всего единственно возможный состав смеси. Пересчет данных в натуральные значения переменных производился путем решения системы уравнений [4].

Для определения оптимальных нагрузочных и скоростных режимов работы дизеля 2Ч 10,5/12,0, обеспечивающих наибольшую экономию топлива и максимум эффективного КПД при работе на метано-топливных эмульсиях различного состава, авторами [7] было применено планирование эксперимента.

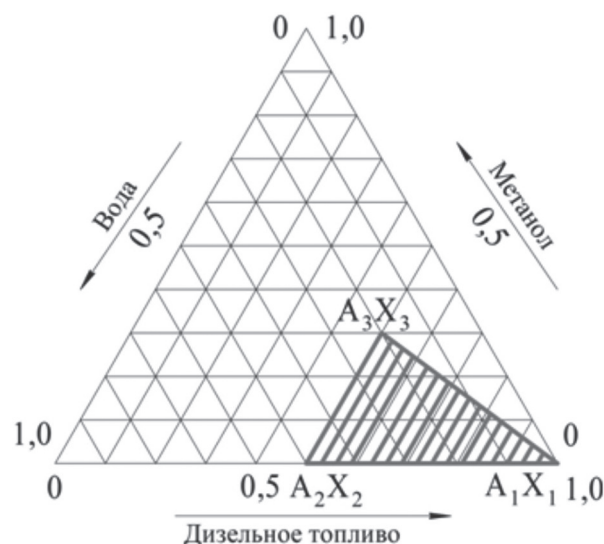


Рис. 1. Нахождение триангулированных компонентов и зона эксперимента при работе дизеля 2Ч 10,5/12/0 с подачей воды и метилового спирта

Fig. 1. Triangulated components location and the test zone during the operation of a 2Ch 10,5/12/0 diesel engine with water and methyl alcohol supply

На рис. 2 показана поверхность отклика, характеризующая зависимость эффективного КПД от режимных факторов. Анализ полученных расчетно-теоретических данных наглядно показывает, при каком содержании метанола в суммарном топливе, при каких частотах вращения коленчатого вала и при какой нагрузке достигается наибольшая эффективность работы дизеля. Нетрудно заметить, что методика позволяет вовлечь в анализ большой диапазон нагрузочных и скоростных режимов дизеля, которые ранее оставались вне внимания исследователей.

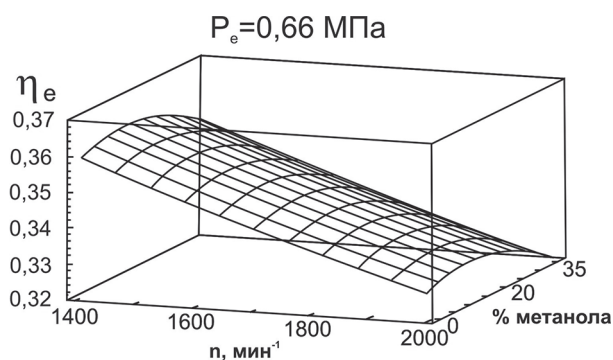


Рис. 2. Зависимость эффективного КПД дизеля от режимных факторов и состава топлива

Fig. 2. Dependence of the effective efficiency of a diesel engine on operating factors and fuel composition

Цель и задачи исследований

Цель исследований – определение оптимального состава биотопливной композиции для тракторного дизеля с улучшенными эксплуатационными свойствами, приближенными к свойствам товарного дизельного топлива.

Задачи: исследование влияния состава компонентов на значения физической стабильности и кинематической вязкости, модернизация системы питания трактора.

Материалы и методы

Для определения оптимального состава топливных композиций, обеспечивающих наибольшую стабильность, при проведении исследований был задействован стандартный трехуровневый план эксперимента Бокса – Бенкена второго порядка для трех факторов.

Факторами служили, соответственно, X1 – содержание рапсового масла в топливе, X2 – содержание этанола в топливе, X3 – содержание дизельного топлива.

В качестве критерия оптимизации принимали время стабильности (в минутах).

Была проведена рандомизация опытов с использованием таблиц случайных чисел [3, 5, 6]. Матрица, названия, кодированные обозначения факторов, значения критериев оптимизации приведены в табл. 1.

Таблица 1

Матрица плана эксперимента Бокса – Бенкена для трех факторов

Table 1. Box-Behnken experimental design matrix for three factors

№ п/п	Фактор 1, РМ (граммы)	Фактор 2, этанол (граммы)	Фактор 3, ДТ (граммы)	Значение критерия оптимизации (стабильность, минуты)
1	3	3	3	26,0
2	1	5	3	16,6
3	1	1	3	3,0
4	3	5	5	35,0
5	5	1	3	15,0
6	1	3	1	13,5
7	5	5	3	35,5
8	3	3	3	24,0
9	1	3	5	15,5
10	3	5	1	15,5
11	3	1	1	15,5
12	5	3	1	21,0
13	5	3	5	36,0
14	3	1	5	26,0
15	3	3	3	28,0

Получение и исследование результатов осуществлялось следующим образом.

1. Подсчитывалась дисперсия ошибок опытов.

2. Подсчитывалась однородность дисперсий ошибок опытов на основе критерия Кохрена.

3. Рассчитывались значения коэффициентов модели регрессионного анализа для выбранного плана эксперимента.

4. Осуществлялась оценка значимости коэффициентов регрессии на основе *t*-критерия Стьюдента.

5. Определялось соответствие найденных математических моделей имеющимся данным эксперимента по *F*-критерию Фишера.

6. Доверительная вероятность проводимых опытов задавалась на уровне $P = 0,95$.

Математическая обработка данных опыта осуществлялась на персональном компьютере с использованием стандартных приложений MicrosoftExcel, StatgraphicsPlus 5.1. Графическая интерпретация поверхностей отклика осуществлялась с использованием приложений StatgraphicsPlus 5.1 и Corel DRAW11.

Результаты и обсуждение

На рис. 3 показана поверхность отклика, построенная на основе полученного регрессионного уравнения. При этом фактор X_3 (содержание ДТ в смеси) был зафиксирован на верхнем уровне.

Комплексный анализ полученных в ходе эксперимента поверхностей отклика показал, что максимальное значение критерия оптимизации – стабильности ($\tau = 39,82$) – имеет место при значениях факторов: $X_1 = 1$; $X_2 = 0,76$ и $X_3 = 1$, что в пересчете дает следующие вели-

чины: рапсовое масло – 34,5 %; этанол – 31,0 %; дизельное топливо – 34,5 %.

Известно, что вязкостно-температурные свойства ДТ оказывают существенное влияние на показатели надежности и долговечности дизельной топливной аппаратуры, а также на характеристики впрыскивания и распыливания топлива, что в конечном случае влияет на мощностные, экономические и показатели надежности самого дизеля. Поэтому стандарт устанавливает вязкость летнего дизельного топлива в пределах 3,0–6,0 сСт.

Значения кинематической вязкости многокомпонентной биотопливной композиции при различных значениях состава ингредиентов и изменении температуры окружающего воздуха приведены в табл. 2. Как видно из данных табл. 2, предложенный состав [12] также позволяет сохранять вязкостно-температурные свойства композиции при изменении температуры

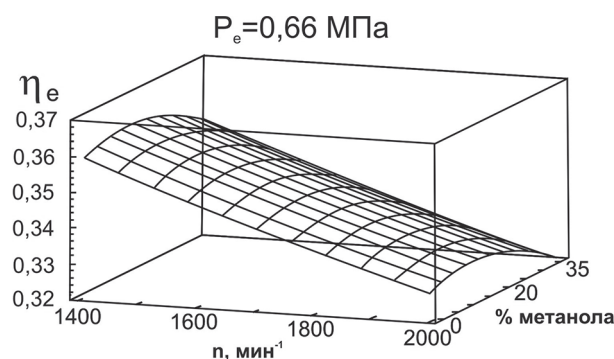


Рис. 3. Зависимость времени физической стабильности от факторов X_1 (РМ) и X_2 (этанол)

Fig. 3. Dependence of the time of physical stability on factors X_1 (PM) and X_2 (Ethanol)

Таблица 2

Значения кинематической вязкости многокомпонентной биотопливной композиции

Table 2. Kinematic viscosity values of multicomponent biofuel composition

Этанол, %	Рапсовое масло, %	Дизельное топливо ДТ-Л-40-К2, %	Температура, °С	Кинематическая вязкость, сСт
30	35,5	35,5	10,0	6,02
30	35,5		20,0	4,95
30	35,5		40,0	3,16
31	34,5	35,5	10,0	5,91
31	34,5		20,0	4,88
31	34,5		40,0	3,07
32	33,5	35,5	10,0	5,80
32	33,5		20,0	4,75
32	33,5		40,0	2,91

окружающего воздуха в рамках действующего стандарта (3,0–6,0 ССт). Увеличение либо уменьшение доли как высоковязкого, так и мало вязкого компонента ведет к выходу значения кинематической вязкости биотопливной композиции при изменении температуры окружающего воздуха за рамки действующего стандарта.

Для работы трактора на многокомпонентной биотопливной композиции была разработана оригинальная система питания, включающая дополнительный топливный бак с установленными в нем смесителем и подогревателем (рис. 4).

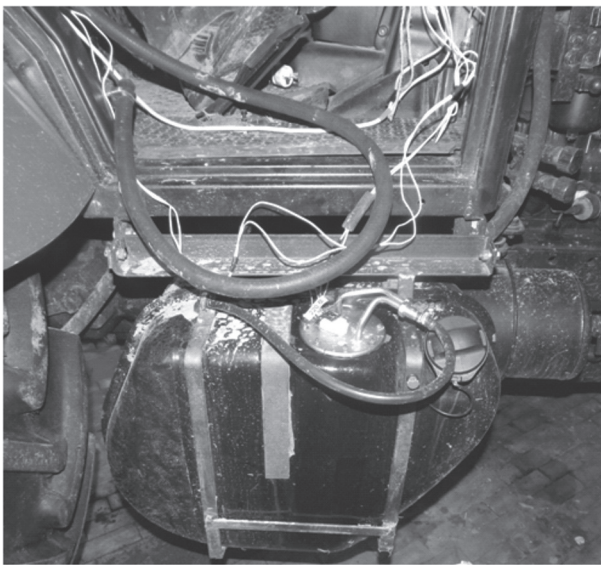


Рис. 4. Дополнительный бак трактора БЕЛАРУС-922 со смесителем и подогревателем

Fig. 4. Additional tank of the BELARUS-922 tractor with a mixing machine and heater

Смеситель приводился в действие насосом лопастного типа с электродвигателем. Это позволяло обеспечить время стабильности, достаточное для поступления биотопливной композиции от топливного бака в цилиндры двигателя. Подогрев биотопливной композиции до температуры 20–40 °С позволял сохранять ее вязкостно-температурные свойства в рамках действующего стандарта независимо от температуры окружающего воздуха [13].

Отказов в работе системы питания трактора при проведении полевых испытаний не наблюдалось.

Выводы

1. Для исследования свойств многокомпонентных биотоплив применение методики

планирования эксперимента является целесообразным и оправданным.

2. В результате проведенных исследований определен оптимальный состав биотопливной композиции из условия достаточной стабильности и кинематической вязкости.

3. Разработана конструкция системы питания трактора, обеспечивающая его работоспособность на биотопливной композиции.

Литература

1. Александров А.А., Архаров И.А., Марков В.А. Альтернативные топлива для двигателей внутреннего сгорания / под ред. А.А. Александрова, В.А. Маркова. М.: ООО НИЦ «Инженер», ООО «Онико-М», 2012. 791 с.
2. Гуреев А.А. О перспективах развития топливного производства в двигателестроении // Химия и технология топлив и масел, 1980. № 9. С. 22–23.
3. Кононюк А.Е. Основы научных исследований (общая теория эксперимента) / монография. К.: 2011. 452 с.
4. Лиханов В.А. Снижение токсичности и улучшение эксплуатационных показателей тракторных дизелей путем применения метанола. Киров: Вятская ГСХА, 2001. 212 с.
5. Мельников С.В., Алешкин В.Р., Рошин П.М. Планирование эксперимента в исследованиях сельскохозяйственных процессов. Л.: Колос, 1980. 168 с.
6. Опрышко В.Н., Степанов В.В., Юдаев Н.В. Основы теории планирования и анализа методов обработки экспериментальных данных. Саратов: Издательский центр «Наука», 2010. 127 с.
7. Плотников С.А. Планирование эксперимента при использовании метанола-топливных эмульсий в дизелях // Тракторы и сельхозмашины: 2009. № 1. С. 28–30.
8. Плотников С.А., Карташевич А.Н., Смольников М.В., Черемисинов П.Н. Расширение много топливности автотракторного дизеля при использовании альтернативных топлив // Известия МГТУ «МАМИ»: 2019. № 3 (41). С. 66–72.
9. Семенов В.Г., Зинченко А.А. Альтернативные топлива растительного происхождения // Химия и технология топлив и масел. 2005. № 1. С. 29–34.
10. Смаль Ф.В., Арсенов Е.Е. Перспективные топлива для автомобилей. М.: Транспорт, 1979. 151 с.
11. Терентьев Г.А., Тюков В.М., Смаль Ф.В. Моторные топлива из альтернативных сырьевых ресурсов. М.: Химия, 1989. 272 с.

12. Плотников С.А., Глушков М.Н., Карташевич А.Н., Шаповрев В.А. Многокомпонентная биотопливная композиция: заявка на выдачу патента РФ № 2020123967(W20041379) от 20.07.2020.
13. Плотников С.А., Шипин А.И., Карташевич А.Н., Малышкин П.Ю. Способ получения многокомпонентной биотопливной композиции: заявка на выдачу патента РФ № 2020120544(W20035021) от 22.06.2020.
6. Opryshko V.N., Stepanov V.V., Yudayev N.V. Osnovy teorii planirovaniya i analiza metodov obrabotki eksperimental'nykh dannykh [Fundamentals of planning theory and analysis of experimental data processing methods]. Saratov: Izdatel'skiy tsentr «Nauka» Publ., 2010. 127 p.
7. Plotnikov S.A. Planning an experiment using methanol-fuel emulsions in diesel engines. Traktory i sel'khoz mashiny, 2009. No 1, pp. 28–30 (In Russ.).
8. Plotnikov S.A., Kartashevich A.N., Smol'nikov M.V., Cheremisinov P.N. Expansion of the multi-fuel capacity of an automotive diesel engine using alternative fuels. Izvestiya MGTU «MAMI», 2019. No 3 (41), pp. 66–72 (In Russ.).
9. Semenov V.G., Zinchenko A.A. Alternative fuels of plant origin. Khimiya i tekhnologiya topliv i masel. 2005. No 1, pp. 29–34 (In Russ.).

References

1. Aleksandrov A.A., Arkharov I.A., Markov V.A. Al'ternativnyye topliva dlya dvigateley vnutrennego sgoraniya [Alternative fuels for internal combustion engines]. Pod red. A.A. Aleksandrova, V.A. Markova. Moscow: OOO NITS «Inzhener», OOO «Oniko-M», 2012. 791 p.
2. Gureyev A.A. Prospects for the development of fuel production in engine building. Khimiya i tekhnologiya topliv i masel, 1980. No 9, pp. 22–23 (In Russ.).
3. Kononyuk A.E. Osnovy nauchnykh issledovaniy (obshchaya teoriya eksperimenta) [Fundamentals of scientific research (general theory of experiment)]. Kiev: 2011. 452 p.
4. Likhanov V.A. Snizheniye toksichnosti i uluchsheniye ekspluatatsionnykh pokazateley traktornykh dizeley putem primeneniya metanola [Reducing toxicity and improving the performance of tractor diesel engines by using methanol]. Kirov: Vyatskaya GSKHA Publ., 2001. 212 p.
5. Mel'nikov S.V., Aleshkin V.R., Roshchin P.M. Planirovaniye eksperimenta v issledovaniyakh sel'skokhozyaystvennykh protsessov [Experiment design in agricultural process research]. Leningrad: Kolos Publ., 1980. 168 p.
10. Smal' F.V., Arsenov YE.E. Perspektivnyye topliva dlya avtomobiley [Promising fuels for vehicles]. Moscow: Transport Publ., 1979. 151 p.
11. Terent'yev G.A., Tyukov V.M., Smal' F.V. Motornyye topliva iz al'ternativnykh syr'yevykh resursov [Motor fuels from alternative raw materials]. Moscow: Khimiya Publ., 1989. 272 p.
12. Plotnikov S.A., Glushkov M.N., Kartashevich A.N., Shaporev V.A. Mnogokomponentnaya biotoplivnaya kompozitsiya. Zayavka na vydachu patenta RF [Multi-component biofuel composition. Application for patent of the Russian Federation] No 2020123967(W20041379) ot 20.07.2020.
13. Plotnikov S.A., Shipin A.I., Kartashevich A.N., Malyshekin P.YU. Sposob polucheniya mnogokomponentnoy biotoplivnoy kompozitsii. Zayavka na vydachu patenta RF [Method for producing multicomponent biofuel composition. Application for patent of the Russian Federation] No 2020120544(W20035021) ot 22.06.2020.