УДК 665.11

DOI: 10.35887/2305-2538-2021-5-96-103

**МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ХОДА РЕАКЦИИ ТРАНСЭТЕРИФИКАЦИИ
И ОЦЕНКИ СОСТАВА СМЕСЕВОГО ТОПЛИВА**¹*Романцова Светлана Валерьевна*²*Нагорнов Станислав Александрович*²*Ликсутина Анна Павловна*²*Корнев Алексей Юрьевич*¹*ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный университет им. Г.Р. Державина»*²*ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве»*

Реферат. Смесевое топливо для дизельных двигателей, получаемое при смешении биодизельного и нефтяного дизельного топлива, обладает улучшенными экологическими и эксплуатационными свойствами. При его использовании в аграрном секторе в выхлопных газах сельскохозяйственной техники будет снижено содержание угарного газа, сажи, несгоревших углеводородов, что повысит экологическую чистоту выращиваемых продуктов. Повышение цетанового числа и противоизносных свойств позволит продлить срок эксплуатации техники. Синтез биодизельного топлива проводится по реакции трансэтерификации. Для контроля хода реакции и определения состава биодизельного и смешанного топлива могут использоваться хроматографические, спектрофотометрические и вискозиметрические методы. Методы тонкослойной и бумажной хроматографии не позволяют проводить оперативный мониторинг хода реакции из-за длительности, не очень точны и довольно чувствительны к присутствию воды. Методы газовой и жидкостной хроматографии требуют применения сложного и дорогостоящего оборудования и специальной подготовки для работы на нем. Анализ занимает довольно много времени (до 45 минут). Применение методов колебательной спектроскопии позволяет достичь необходимой точности и оперативности для контроля хода реакции трансэтерификации по изменению интенсивности полосы при 1377 см^{-1} . Его применение возможно и для установления примесей глицерина и непрореагировавших моно- и диацилглицеринов в готовом продукте (биодизельном топливе). При определении содержания биодизельного топлива в составе смешанного метод ограничен концентрацией 22,7 % (об.) биодизельного топлива. Для определения доли биодизельного топлива в смешанном топливе можно использовать вискозиметрические методы. Анализ однопараметрического уравнения Грюнберга-Ниссана в отношении вязкости смешанного топлива показал, что между углеводородами нефтяного топлива и молекулами сложных эфиров биодизельного топлива существуют слабые взаимодействия.

Ключевые слова: биодизельное топливо, смешанное топливо, ИК-спектроскопия, вискозиметрия.

**METHODS FOR MONITORING THE TRANSESTERIFICATION PROGRESS AND
ESTIMATING THE COMPOSITION OF MIXED FUEL**¹*Romantsova Svetlana*²*Nagornov Stanislav*²*Lixutina Anna*²*Kornev Alexey*¹*Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Tambov State University named after G.R. Derzhavin»*²*Federal State Budgetary Scientific Institution «All-Russian Research Institute for Use machinery and Petroleum products in Agriculture»*

Abstract. *Mixed fuel for diesel engines, obtained by mixing biodiesel and petroleum diesel fuel, has improved environmental and operational properties. When used in the agricultural sector, the content of carbon monoxide, soot, unburned hydrocarbons in the exhaust gases of agricultural machinery will be reduced, which will increase the ecological purity of the grown products. Increasing the cetane number and antiwear properties will extend the service life of the equipment. The synthesis of biodiesel fuel is carried out by the transesterification reaction. Chromatographic, spectrophotometric and viscometric methods can be used to monitor the progress of the reaction and determine the composition of biodiesel and blended fuels. Thin layer and paper chromatography methods do not allow for on-line monitoring of the reaction progress due to the duration, are not very accurate, and are rather sensitive to the presence of water. Gas and liquid chromatography methods require the use of complex and expensive equipment and special training to work on it. The analysis takes quite a long time (up to 45 minutes). The use of vibrational spectroscopy methods makes it possible to achieve the necessary accuracy and efficiency for monitoring the progress of the transesterification reaction by changing the intensity of the band at 1377 cm^{-1} . Its use is also possible for the determination of impurities of glycerin and unreacted mono- and diacylglycerols in the finished product (biodiesel fuel). When determining the content of biodiesel fuel in the composition of the blended method, the concentration is limited to 22.7% (vol.) of biodiesel fuel. Viscometric methods can be used to determine the proportion of biodiesel in blended fuels. Analysis of the one-parameter Grünberg-Nissan equation in relation to the viscosity of the blended fuel showed that there are weak interactions between the hydrocarbons of the fuel oil and the molecules of biodiesel esters.*

Key words: *biodiesel fuel, mixed fuel, IR spectroscopy, viscometry.*

Введение. В последнее время биодизельное топливо постепенно переходит в разряд привычных компонентов топлив для дизельных двигателей. Его добавка к нефтяному дизельному топливу позволяет получить смесевое топливо, которое характеризуется, прежде всего, улучшенными экологическими свойствами за счёт снижения выбросов угарного газа, сажи, несгоревших углеводородов. Также присутствие молекул сложных эфиров метилового или этилового спирта и жирных кислот позволяет улучшить противоизносные свойства смесового топлива, повысить его цетановое число, упростить ликвидацию проливов, процесс транспортировки и хранения. Агропромышленный комплекс нашей страны заинтересован в более широком внедрении биодизельного топлива, т.к. это повысит экологическую чистоту вырабатываемых продуктов и позволит самим предприятиям АПК перерабатывать жидкие и твёрдые жирные отходы в компоненты топлива.

Для мониторинга процесса синтеза и контроля качества синтезированного биодизельного топлива могут применяться различные методы определения состава смесей органических соединений. Это могут быть хроматографические методы, различные виды спектроскопии, гравиметрии, титрования и вискозиметрии [1]. Из всего этого разнообразия необходимо выбрать методы, обеспечивающие необходимую точность, но при этом не требующие сложного и дорогого оборудования, а также длительного времени на проведение анализа.

Цель работы – выбор метода, позволяющего быстро и эффективно определять как состав реакционной смеси для контроля хода реакции трансэтерификации, так и состав готового продукта: биодизельного или смесового топлива.

Экспериментальная часть.

Для синтеза биодизельного топлива по реакции трансэтерификации использовали методы тонкого органического синтеза в условиях гомогенного щелочного катализа. Сырьём для синтеза образцов биодизельного топлива было масло редьки масличной. Вязкость биодизельного, нефтяного и смесового топлив определяли в соответствии с требованиями ГОСТ [2].

Запись ИК-спектров осуществляли с помощью прибора «Infracum FT-801».

Результаты и их обсуждение.

Определить состав реакционной смеси в процессе синтеза биодизельного топлива или качество готового продукта можно хроматографическими методами. Самыми дешёвыми и простыми по способу реализации являются бумажная и тонкослойная хроматография (ТСХ). С помощью ТСХ можно различить нефтяные углеводородные фракции смесового топлива и сложнэфирные молекулы биодизельного топлива. Также можно определить наличие моно-, ди- и триацилглицеринов как в готовом продукте, так и в реакционной массе во время синтеза

биодизельного топлива, т.е. метод позволяет контролировать ход реакции трансэтерификации, оценить целесообразность окончания реакции в тот момент времени, когда достигнута полная конверсия исходного растительного масла или животного жира. При использовании тонкослойной или бумажной хроматографии можно анализировать одновременно несколько образцов реакционной массы или готового смесового топлива, но скорость продвижения элюента по пластине или бумаге невелика и анализ индивидуального образца может занять 30-50 минут, что сопоставимо со временем протекания реакции трансэтерификации (120-140 минут). Кроме того, методы не позволяют определить покомпонентный состав самого биодизельного топлива (наличие индивидуальных сложных эфиров высших карбоновых кислот), они довольно чувствительны к присутствию воды.

Повысить точность анализа позволяет использование жидкостной или газовой хроматографии. Газовая хроматография позволяет с высокой точностью определить покомпонентный состав биодизельного топлива, оценить наличие примесей: непрореагировавших моно- и диглицеринов, глицерина и т.д. Различными группами исследователей разработаны надёжные методики анализа с помощью данного метода, во многих странах метод стандартизирован [3]. Однако метод требует применения сложного оборудования и специальной подготовки для работы на нем. Анализ занимает довольно много времени (до 45 минут). Даже при использовании самых дешевых колонок для разделения компонентов метод довольно дорогостоящий.

При использовании высокоэффективной жидкостной хроматографии упрощается подготовка образца к анализу, сокращается время анализа, достоинством является и отсутствие необходимости использования внутреннего стандарта. Этот метод является более подходящим для анализа сложных многокомпонентных смесей, поэтому с его помощью можно анализировать биодизельное топливо, для синтеза которого использовали самое разное сырьё растительного или животного происхождения.

Однако и этот метод является дорогостоящим, требует сложного оборудования и продолжительного времени для анализа.

В настоящее время существует много спектроскопических методов, пригодных для анализа органических соединений, в том числе компонентов биодизельного топлива. Часто для этого используют методы ядерного магнитного резонанса (ЯМР) и инфракрасной спектроскопии (ИК).

Метод ЯМР отличается очень высокой точностью. Для мониторинга процесса синтеза можно следить за уменьшением интенсивности триплетного сигнала метиленовых групп CH_2 , находящихся в α -положении глицеринового фрагмента триацилглицеринов жира (исходное соединение) или за увеличением интенсивности синглетного сигнала метоксигруппы OCH_3 в продукте реакции. Они находятся в разных областях спектра (2,3 и 3,7 м.д.), не перекрывают друг друга и удобны для наблюдения. Степень конверсии триацилглицеринов можно рассчитать по отношению площадей сигналов метокси- и метиленовой групп. Сдерживает широкое распространение этого метода его сложность, длительность и высокая стоимость оборудования.

Анализ с помощью метода колебательной спектроскопии в ИК-области спектра намного проще, оборудование более компактно и имеет меньшую стоимость. Анализ занимает 5-10 минут (вместе с подготовкой образца), что позволяет использовать его для оперативного контроля за ходом реакции трансэтерификации.

Ещё удобнее использовать этот метод для определения биодизельного топлива в смеси с нефтяным. В отличие от углеводородов нефтяного топлива, молекулы биодизельного топлива представляют собой сложные эфиры, в ИК-спектре базовой полосой для идентификации можно считать валентных колебаний группы C=O , имеющую высокую интенсивность и проявляющуюся в области 1745 см^{-1} (рис. 2) и отсутствующую у углеводородов. В настоящее время метод стандартизован [4].

Мониторинг реакции трансэтерификации осуществлять труднее, т.к. и исходные соединения – триацилглицерины жиров и продукт реакции – компоненты биодизельного топлива относятся к одному и тому же классу органических соединений – сложным эфирам, поэтому их спектры очень похожи и положение полосы валентных колебаний группы C=O идентично (рис. 1 и 2).

При сравнении спектров исходного масла и биодизельного топлива как конечного продукта реакции трансэтерификации выявлена полоса при 1377 см^{-1} , чётко проявляющаяся в спектре масла и отсутствующая в спектре биодизельного топлива. Эту полосу можно отнести к деформационным

колебаниям связи между атомами углерода и водорода, находящимися в β -положении глицеринового фрагмента, присутствующего в молекулах триацилглицеринов. В молекулах биодизельного топлива остаток глицерина отсутствует, полоса в спектре не наблюдается. Снижение интенсивности этой полосы в ходе реакции свидетельствует об успешной конверсии исходного соединения, полное исчезновение сигнализирует об окончании реакции трансэтерификации.

Рисунок 1 – ИК - спектр масла редьки масличной

Рисунок 2 – ИК - спектр биодизельного топлива

ИК-спектры также можно использовать для обнаружения примесей в составе биодизельного топлива. Одной из нежелательных примесей являются жирные кислоты, которые увеличивают коррозионную агрессивность топлива, что оказывает негативное влияние на износ деталей двигателя, прежде всего, топливоподающей аппаратуры.

Как показали наши исследования, при концентрации карбоновой кислоты выше 2 % (об), в ИК-спектре наблюдается полоса средней интенсивности в области $1710\text{--}1713\text{ см}^{-1}$. Эта полоса связана с валентными колебаниями связи углерода и кислорода в карбоксильной группе. Если концентрация кислоты ниже (от 2 до 1 % по объёму), то полоса в спектре не обнаруживается, но её можно увидеть при вычитании из него спектра образца биодизельного топлива, не содержащего свободных карбоновых кислот.

Стандарт, определяющий технические требования к биодизельному топливу [5] нормирует ограничения содержания таких примесей в биодизельном топливе, как глицерин и остатки непрореагировавших моно- и диацилглицеринов. Наличие последних можно обнаружить по широкой полосе в спектре в области 3470 см^{-1} . Вероятно, это полоса, возникающая в результате колебаний гидроксильных групп, содержащихся в продуктах неполной трансэтерификации. Широкую полосу в области 3400 см^{-1} могут дать и валентные колебания гидроксильных групп спиртов – глицерина или метанола (если они присутствуют в качестве примесей в готовом продукте), но при этом обязательно должны наблюдаться полосы при 1115 и $1035\text{--}1075\text{ см}^{-1}$, характерные для колебаний, связанных с группой C--O--H в первичных спиртах.

Видно, что метод колебательной спектроскопии в ИК-области может быть использован как для контроля хода реакции трансэтерификации, так и для определения содержания биодизельного топлива в составе смесового. Однако в последнем случае метод ограничен концентрацией $22,7\%$ (об.) биодизельного топлива в смеси с нефтяными углеводородами. ГОСТ Р 53605-2009 [4] говорит о принципиальной возможности определения и более высоких концентраций, но предупреждает об отсутствии данных о прецизионности результатов вне пределов диапазона $1,7\text{--}22,7\%$ (об.).

Есть ещё один метод, позволяющий определять концентрацию биодизельного топлива в смеси с нефтяным дизтопливом – вискозиметрия. Вязкость смеси непосредственно зависит от концентрации её компонентов. Кинематическая вязкость триацилглицеринов растительного масла очень сильно отличается от вязкости дизельного топлива. Даже при $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ она находится в интервале $27\text{--}37\text{ мм}^2/\text{с}$, что на порядок выше той же характеристики дизельного топлива. Поэтому растительные масла в переработанном виде не используют в качестве топлива для дизельных двигателей [6]. В результате проведения реакции трансэтерификации молекулы триацилглицеринов масел превращаются в метиловые (или этиловые) эфиры высших алифатических кислот, размер которых примерно в 3 раза меньше, что приводит к значительному снижению вязкости ($5\text{--}10\text{ мм}^2/\text{с}$ при $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $3\text{--}5\text{ мм}^2/\text{с}$ при $40\text{ }^{\circ}\text{C}$) [7]. Но вязкость биодизельного топлива всё же немного выше, чем у нефтяного топлива, т.к. размеры и межмолекулярные силы взаимодействия углеводородов нефтяного топлива меньше, чем у сложноэфирных молекул. Этому существует закономерное объяснение. Молекулы углеводородов практически неполярны, между ними могут существовать только самые слабые силы межмолекулярного взаимодействия – силы Ван-дер-Ваальса. Более электроотрицательные атомы кислорода сложноэфирной группы молекул биодизельного топлива вызывают сдвиг электронной плотности связи C--O в сторону атома кислорода, в результате на нём образуется избыток электронной плотности, а на атоме углерода – её недостаток. Поляризация связи приводит к возникновению между молекулами сложных эфиров и другого вида межмолекулярного взаимодействия – электростатического.

Различия в величине кинематической вязкости позволяют определять содержание биодизельного топлива в смеси с нефтяным.

Существуют различные расчётные формулы, позволяющие рассчитать вязкость бинарной смеси. Например, однопараметрическое уравнение Грюнберга-Ниссана (1):

$$\ln \eta_{см} = w_1 \cdot \ln(\eta_1) + w_2 \cdot \ln(\eta_2) + w_1 \cdot w_2 \cdot G_{12} \quad (1)$$

где $\eta_{см}$ – кинематическая вязкость смеси (например, смесового топлива) $\text{мм}^2/\text{с}$, η_1 и η_2 – кинематические вязкости биодизельного и нефтяного топлива, w_1 и w_2 – массовые доли этих топлив в смеси (смесовом топливе), G_{12} – параметр, характеризующий взаимодействие компонентов смеси друг с другом.

Если значения параметра взаимодействия Грюнберга-Ниссана (G_{12}) положительны, взаимодействия между разнородными молекулами сильны, а отрицательные значения означают слабые взаимодействия.

На рисунке 3 представлены зависимости кинематической вязкости смесового топлива от массовой доли биодизельного топлива в нём. Вязкость была измерена при $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Имея такой график, по вязкости смесового топлива можно легко определить содержание биодизельного топлива в нём. Были рассчитаны величины параметра взаимодействия Грюнберга-Ниссана для обеих температур, они составили $-0,25$ и $-0,14$ при $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ соответственно. Отрицательные

величины данного параметра свидетельствуют о наличии слабых взаимодействий между углеводородами нефтяного топлива и молекулами сложных эфиров биодизельного топлива.

Рисунок 3 – Зависимость вязкости смешанного топлива от массовой доли биодизельного топлива:
1 – 40 °C; 2 – 20 °C.

Различия в величине кинематической вязкости между исходным веществом в реакции трансэтерификации (растительное масло) и продуктом реакции (биодизельное топливо) намного больше, чем между молекулами нефтяного и биодизельного топлива. Присутствие непрореагировавшего растительного масла окажет заметное влияние на вязкость реакционной смеси. Следовательно, величину вязкости можно использовать и для оперативного контроля за ходом реакции трансэтерификации. Время определения величины вязкости составляет 2-3 минуты.

Как показано в работах [8], массовая доля метиловых эфиров в образцах биодизельного топлива линейно зависит от логарифма величины кинематической вязкости (1):

$$w = A \cdot \ln(\eta) + B \quad (2)$$

где η – кинематическая вязкость реакционной массы, мм²/с, w – массовая доля биодизельного топлива в реакционной массе.

Величины A и B определяются экспериментально и зависят от условий протекания реакции (температура, тип катализатора, мольное соотношение масло: метанол и т.д.)

Заключение. Изучены методы контроля хода реакции трансэтерификации и оценки состава смешанного топлива. Показано, что для этих целей могут использоваться хроматографические, спектрофотометрические и вискозиметрические методы.

Исследование спектров исходных веществ и продуктов реакции показало, что необходимую точность и оперативность для контроля хода реакции трансэтерификации может обеспечить спектроскопия в ИК-диапазоне.

Определено, что для определения доли биодизельного топлива в смешанном топливе можно использовать вискозиметрические методы.

Анализ однопараметрического уравнения Грюнберга-Ниссана в отношении вязкости смешанного топлива показал, что между углеводородами нефтяного топлива и молекулами сложных эфиров биодизельного топлива существуют слабые взаимодействия.

Список литературы

1. Berchmans H.J., Morishita K., Takarada T. Kinetic study of hydroxide-catalyzed methanolysis of *Jatropha curcas*-waste food oil mixture for biodiesel production // *Fuel*, 2013. – № 104. – P. 46-52.
2. ГОСТ 33-2016. Нефть и нефтепродукты. Прозрачные и непрозрачные жидкости. Определение кинематической и динамической вязкости. – М.: Стандартинформ, 2017. – 39 с.

3. ГОСТ 33018-2014. Топливо базовое биодизельное В100. Определение общего содержания моноглицеридов, диглицеридов, триглицеридов, свободного и общего глицерина газовой хроматографией. – М.: Стандартинформ, 2015. – 20 с.

4. ГОСТ Р ЕН 14078- 2010. Нефтепродукты жидкие. Определение метиловых эфиров жирных кислот (FAME) в средних дистиллятах методом инфракрасной спектроскопии. – М.: Стандартинформ, 2012. – 10 с.

5. ГОСТ Р 53605-2009. Топливо для двигателей внутреннего сгорания. Метиловые эфиры жирных кислот (FAME) для дизельных двигателей. Общие технических требования. – М.: Стандартинформ, 2010. – 15 с.

6. Knothe G. Biodiesel and renewable diesel: a comparison // Progress in Energy and Combustion Science. – 2010. – № 36. – P. 364-373.

7. Methods for changing the composition and properties of biodiesel / Romantsova S.V., Nagornov S.A., Kornev A.Y., Sinyutina S.Y. // Journal of Agriculture and Environment. – 2019. – № 4 (12). – P. 70-77.

8. Sousa F.P., Luciano M.A., Pasa V.M.D. Thermogravimetry and viscometry for assessing the ester content (FAME and FAEE) // Fuel Processing Technology. – 2013. – № 109. – P. 133-140.

References

1. Berchmans H.J., Morishita K., Takarada T. Kinetic study of hydroxide-catalyzed methanolysis of Jatropha curcas-waste food oil mixture for biodiesel production // Fuel, 2013. – № 104. – P. 46-52.

2. GOST 33-2016. Neft' i nefteprodukty. Prozhachnyye i neprozrachnyye zhidkosti. Opredeleniye kinemacheskoy i dinamicheskoy vyazkosti. – М.: Standartinform, 2017. – 39 s.

3. ГОСТ 33018-2014. Toplivo bazovoye biodizel'noye V100. Opredeleniye obshchego soderzhaniya monoglitseridov, diglitseridov, triglitseridov, svobodnogo i obshchego glitserina gazovoy khromatografiyey. – М.: Standartinform, 2015. – 20 s.

4. ГОСТ R YEN 14078- 2010. Nefteprodukty zhidkiye. Opredeleniye metilovykh efirov zhirnykh kislot (FAME) v srednikh distillyatakh metodom infrakrasnoy spektroskopii. – М.: Standartinform, 2012. – 10 s.

5. ГОСТ R 53605-2009. Toplivo dlya dvigateley vnutrennego sgoraniya. Metilovyye efiry zhirnykh kislot (FAME) dlya dizel'nykh dvigateley. Obshchiye tekhnicheskikh trebovaniya. – М.: Standartinform, 2010. – 15 s.

6. Knothe G. Biodiesel and renewable diesel: a comparison // Progress in Energy and Combustion Science. – 2010. – № 36. – P. 364-373.

7. Methods for changing the composition and properties of biodiesel / Romantsova S.V., Nagornov S.A., Kornev A.Y., Sinyutina S.Y. // Journal of Agriculture and Environment. – 2019. – № 4 (12). – P. 70-77.

8. Sousa F.P., Luciano M.A., Pasa V.M.D. Thermogravimetry and viscometry for assessing the ester content (FAME and FAEE) // Fuel Processing Technology. – 2013. – № 109. – P. 133-140.

Сведения об авторах

Принадлежность к организации

Романцова Светлана Валерьевна – кандидат химических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный университет им. Г.Р. Державина», Россия, г. Тамбов, e-mail: svromantsova@yandex.ru.

Нагорнов Станислав Александрович – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве», Россия, г. Тамбов, e-mail: snagornov@yandex.ru.

Ликсутина Анна Павловна – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве», Россия, г. Тамбов, e-mail: vniitinlab7@yandex.ru.

Корнев Алексей Юрьевич – кандидат технических наук, главный научный сотрудник, ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве», Россия, г. Тамбов, e-mail: vniitinlab7@yandex.ru

Author credentials

Affiliations

Romantsova Svetlana – Candidate of chemical sciences, Associate Professor, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Tambov State University named after G.R. Derzhavin», Russia, Tambov, e-mail: svromantsova@yandex.ru.

Nagornov Stanislav – Full Doctor of Technical sciences, Professor, Chief Researcher, Federal State Budgetary Scientific Institution “All-Russian Research Institute for Use machinery and Petroleum products in Agriculture”, Russia, Tambov, e-mail: snagornov@yandex.ru.

Lixutina Anna – Candidate of Technical sciences, Leading Researcher, Federal State Budgetary Scientific Institution “All-Russian Research Institute for Use machinery and Petroleum products in Agriculture”, Russia, Tambov, e-mail: vniitinlab7@yandex.ru.

Kornev Alexey – Candidate of Technical sciences, Chief Researcher, Federal State Budgetary Scientific Institution “All-Russian Research Institute for Use machinery and Petroleum products in Agriculture”, Russia, Tambov, e-mail: vniitinlab7@yandex.ru.

Поступила в редакцию (Received): 07.09.2021 Принята к публикации (Accepted): 20.10.2021