Оригинальная статья / Original article
УДК 662.756.3
DOI: https://doi.org/10.21285/2227-2925-2020-10-1-114-123

Выбор наиболее предпочтительного сырья для синтеза биодизельного топлива с позиции его выхода и физико-химических свойств

© Н.Е. Белозерцева, И.А. Богданов, А.А. Алтынов, А.Т. Бальжанова, Н.С. Белинская, М.В. Киргина

Томский политехнический университет, г. Томск, Российская Федерация

Резюме: *Биодизельное топливо является одним из наиболее перспективных альтернативных источников энергии в настоящее время как в качестве топлива в чистом виде, так и в качестве смесевого компонента нефтяных дизельных топлив. Работы исследователей по всему миру показывают, что добавление биодизельного топлива к нефтяному дизелю позволяет существенно повысить экологичность данного нефтепродукта. Однако влияние на большинство регламентируемых эксплуатационных показателей является неоднозначным в связи с тем, что характеристики биодизельного топлива сильно разнятся в зависимости от исходного сырья. Цель работы – выбор наиболее предпочтительного сырья для синтеза биодизельного топлива с позиции выхода целевого продукта, физико-химических и низкотемпературных свойств. В данном исследовании биодизельное топливо синтезировано из пяти различных пищевых растительных масел (подсолнечное, горчичное, льняное, кукурузное и рыжиковое) с использованием этанола в качестве переэтерифицирующего агента и гидроксида калия в качестве катализатора. Определены основные физико-химические (плотность, динамическая и кинематическая вязкости, молекулярная масса) и низкотемпературные свойства (температуры помутнения и застывания) растительных масел, а также полученных на их основе биодизельных топлив. Установлено, что наиболее предпочтительным сырьем для синтеза биодизельного топлива с позиции выхода целевого продукта является подсолнечное масло; с позиции физико-химических свойств – подсолнечное и кукурузное масла; низкотемпературных свойств – горчичное масло; экономической составляющей – подсолнечное масло. В работе определены рекомендации по выбору наиболее предпочтительного сырья для синтеза биодизельного топлива, которые будут полезны при использовании биодизеля в качестве смесевого компонента товарных дизельных топлив.*

Ключевые слова: *биодизельное топливо, реакция переэтерификации, растительное масло, этанол, физико-химические свойства, низкотемпературные характеристики*

Благодарность: *Работа выполнена в Томском политехническом университете в рамках программы повышения конкурентоспособности среди ведущих мировых научно-образовательных центров и в рамках государственного задания № 10.13268.2018/8.9.*

Информация о статье: *Дата поступления 02 августа 2019 г.; дата принятия к печати 25 февраля 2020 г.; дата онлайн-размещения 31 марта 2020 г.*

Для цитирования: Белозерцева Н.Е., Богданов И.А., Алтынов А.А., Бальжанова А.Т., Белинская Н.С., Киргина М.В. Выбор наиболее предпочтительного сырья для синтеза биодизельного топлива с позиции его выхода и физико-химических свойств. *Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология.* 2020;10(1):114–123. https://doi.org/10.21285/2227-2925-2020-10-1-114-123

Selection of the most beneficial raw materials for the synthesis of biodiesel from a standpoint of its yield and physicochemical properties

© Natalia E. Belozertseva, Ilya A. Bogdanov, Andrey A. Altynov, Aryuna T. Balzhanova, Nataliya S. Belinskaya, Maria V. Kirgina

Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

Abstract: *Biodiesel presents itself as one of the most promising alternative energy sources at the present time, both as a pure fuel and a mixed component of petroleum-based diesel fuels. According to research works carried out around the world, the addition of biodiesel to diesel oil is established to significantly improve the environmental friendliness of this oil product. Nevertheless, its effect on most regulated operational indicators remains ambiguous due to the characteristics of biodiesel fuel varying greatly depending on the feedstock. The present paper is aimed at resolving the issue of selecting the most beneficial raw material for the synthesis of biodiesel from the perspective of the target product yield, physicochemical and low temperature characteristics. In this study, biodiesel was synthesised from five different edible vegetable oils (sunflower, mustard, linseed, corn and camelina) using ethanol and potassium hydroxide as transesterifying agent and catalyst, respectively. The main physicochemical (density, dynamic and kinematic viscosity, molecular weight) and low-temperature (cloud point and pour point) properties of vegetable oils, as well as biodiesel fuels derived therefrom, are determined. According to the obtained yield values of the target product, sunflower oil is shown to be the optimal raw material for the synthesis of biodiesel. From the position of their physical and chemical properties, sunflower and corn oil appear to equally preferential, while, with regard to low temperature properties, mustard oil turns out to be the optimal feedstock. Sunflower oil was additionally determined to be a leader in terms of economics. The paper presents recommendations for choosing the most preferable raw materials for the synthesis of biodiesel, which are useful in application of biodiesel as a mixed component for commercial diesel fuels.*

Keywords: *biodiesel fuel, transesterification reaction, vegetable oil, ethanol, physicochemical properties, low temperature characteristics*

Acknowledgement: *The research is carried out at Tomsk Polytechnic University within the framework of Tomsk Polytechnic University Competitiveness Enhancement Program grant and Russian State Project "Science" no. 10.13268.2018/8.9.*

Information about the article: *Received August 02, 2019; accepted for publication February 25, 2020; available online March 31, 2020.*

For citation: Belozertseva NE, Bogdanov IA, Altynov AA, Balzhanova AT, Belinskaya NS, Kirgina MV. Selection of the most beneficial raw materials for the synthesis of biodiesel from a standpoint of its yield and physicochemical properties. *Izvestiya Vuzov. Prikladnaya Khimiya i Biotekhnologiya* [Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology]. 2020;10(1):114–123. (In Russian) https://doi.org/10.21285/2227-2925-2020-10-1-114-123

ВВЕДЕНИЕ

За последнее столетие потребление человеком энергии в виде нефти и газа выросло кратно. В то же время природные ископаемые истощаются, а спрос на различное моторное топливо только увеличивается [1]. Кроме того, все чаще стали подниматься вопросы экологии в отношении сжигания нефтяных моторных топлив [2–6]. В связи с этим поиск альтернативных источников энергии и топлив, которые будут возобновляемыми и экологически безопасными, является одним из наиболее актуальных в наше время.

Наиболее перспективным из альтернативных топлив является биодизельное топливо (или биодизель) [7]. Во многих странах применение биодизеля в качестве 5–20 %-й добавки к нефтяному дизельному топливу принято законодательно, что, несомненно, способствует развитию биоэнергетики [8].

Биодизельное топливо представляет собой смесь моноалкильных сложных эфиров жирных кислот (чаще всего метиловых или этиловых), полученных в результате реакции переэтерификации возобновляемых биологических ресурсов, таких как растительные масла, животные жиры, водоросли и др. [9].

Наибольшее распространение в качестве сырья для производства биодизеля получили различные масличные культуры. Основными используемыми культурами являются рапс (страны Европейского Союза), подсолнечник (Франция, Италия), соя (США, Бразилия и страны Африки), канола (Канада), пальмовое масло (Индонезия, Малайзия) и ятрофа (Индия, страны Африки).

Характеристики конечного продукта синтеза – биодизельного топлива – зависят от множества факторов: типа сырья, соотношения исходных реагентов и их химического состава, чистоты исходных реагентов, содержания влаги в сырье, условий проведения реакции (температура, время реакции, давление), типа используемого катализатора и др. Работы по определению степени влияния каждого из параметров на синтез биодизеля ведутся многими научными группами по всему миру.

Следует отметить, что реакция переэтерификации может быть катализирована гомогенным щелочным катализатором (гидроксид натрия, метоксид натрия, гидроксид калия) или гомогенным кислотным катализатором (серная или соляная кислоты). Гомогенные катализаторы щелочного типа считаются более предпочти-

тельными несмотря на то, что применение данных катализаторов вызывает омыление триацилглицерина и получаемых эфиров жирных кислот. Омыление приводит к повышению расхода катализатора, снижению выхода биодизеля и усложнению процессов разделения получаемых продуктов [10].

Кислотные катализаторы по сравнению с щелочными не приводят к омылению, однако скорость протекания реакции ниже, в связи с чем требуются более высокие температуры и давления для достижения желаемой конверсии. Разделение и очистка продуктов просты, следовательно, реакция экономически более осуществима, и катализатор может быть повторно использован после простого процесса фильтрации [11, 12].

Помимо названных применяются и такие гетерогенные катализаторы, как карбонаты щелочных металлов (Na_2CO_3, K_2CO_3), карбонаты щелочноземельных металлов ($CaCO_3$), оксиды щелочноземельных металлов (CaO, MgO, SrO, BaO) и другие оксиды (например, ZnO) [13].

Важным параметром, определяющим качество и выход биодизеля, также является концентрация катализатора. Так, авторы работы [14] рассмотрели зависимость выхода этиловых эфиров жирных кислот от концентрации катализатора NaOH при переэтерификации масла семян фирмианы платанолистной в избытке этилового спирта путем варьирования количества катализатора от 0,05 до 0,4 % масс. (от общей сырьевой массы). Была определена оптимальная концентрация катализатора, при которой наблюдался максимальный выход продукта – 0,3 % масс.

При синтезе биодизеля в качестве переэтерифицирующего компонента обычно используют такие спирты, как метанол, этанол, пропанол, бутанол, пентанол и изопропиловый спирт. В большинстве существующих методик применяется метиловый спирт, являющийся токсичной жидкостью III класса опасности, оказывающий поражающее действие на нервную и сосудистую систему человека при попадании в организм через дыхательные пути или кожный покров. Поэтому в целях безопасности целесообразно использовать этиловый спирт, который, кроме того, является более доступным сырьевым компонентом. Однако производство биодизельного топлива с использованием этанола в качестве переэтерифицирующего агента не получило распространения вследствие высокой растворимости получаемых эфиров в данном спирте, что затрудняет выделение целевых продуктов реакции и приводит к более низкому выходу конечного продукта [10].

Важное значение для реакции переэтерификации имеет соотношение сырьевых компонентов. Следует отметить, что спирт должен присутствовать в избытке, но его количество является определяющим для успешного протекания реакции. Авторы работы [11] досконально изучили этот вопрос, варьируя соотношение спирт : масло от 3 : 1 до 15 : 1. Было выявлено, что наибольший выход продукта наблюдается при соотношении 10,8 : 1. Аналогичным образом авторы [14] исследовали влияние времени протекания реакции переэтерификации, наблюдая выход конечного продукта в течение времени от 5 до 40 мин, и выявили, что на 20-й мин наблюдается наибольший выход этиловых эфиров жирных кислот.

Одним из ключевых параметров, влияющих на скорость реакции переэтерификации, является температура. Несмотря на то что реакцию можно проводить и при комнатной температуре (что и реализовали авторы работы [15]), исходя из кинетики скорость реакции возрастает по мере увеличения температуры. Более того, в случае переэтерификации масел более высокие температуры приводят к снижению вязкости масла и лучшему смешиванию реагентов [10].

Вместе с тем увеличение температуры реакции переэтерификации целесообразно до определенного критического значения. Проведение реакции при температуре выше критической приводит к снижению выхода биодизельного топлива из-за омыления (в случае гомогенных катализаторов щелочного типа), а также к повышенному испарению используемого спирта [16]. Температура реакции обычно поддерживается ниже точки кипения спирта, однако, существует возможность проведения реакции при более высоких температурах в условиях дефлегмации или при высоком давлении.

Существует множество работ, посвященных поиску оптимальной температуры синтеза биодизеля. Так, авторы работы [17] исследовали влияние изменения температуры от 30 до 70 °C на реакцию переэтерификации масла канолы при использовании метанола и катализатора NaOH. Была установлена оптимальная температура для максимизации выхода биодизеля, которая составила 45 °C, в то время как повышение температуры реакции с 45 до 70 °C привело к снижению выхода биодизеля с 93,5 до 90,4 % из-за ускоренного омыления при более высоких температурах. Однако при этом время протекания реакции уменьшилось с 60 до 15 мин за счет увеличения скорости реакции.

Авторы работы [11] также проводили исследование влияния температуры в диапазоне 25–70 °C на реакцию переэтерификации семян масла фирмианы платанолистной при использовании этанола и катализатора NaOH. Авторами отмечается, что при увеличении температуры с 25 до 40 °C выход конечного продукта увеличивается практически на 10 % (с 82,8 до 92,3 %) при проведении реакции в течение 20 мин, в то время как увеличение температуры с 40 до 70 °C привело к увеличению выхода продукта лишь на 5 % при аналогичном времени реакции. Таким образом, авторами была определена оптимальная температура проведения реакции переэтерификации, которая составила 52,7 °C.

Проведенный литературный обзор показывает, что к настоящему моменту установлены тенденции и определены оптимальные условия (по ключевым параметрам) для получения высоких выходов биодизеля из различных масличных культур. Однако большая часть описанных результатов получена для определенного типа сырья и не может быть распространена на масла других культур, так как установлено, что каждое растительное масло имеет свой специфический состав, который критическим образом влияет на выбор параметров проведения реакции переэтерификации, выход и качество получаемого биодизеля [18].

Таким образом, целью данной работы являлся выбор наиболее предпочтительного сырья для синтеза биодизельного топлива с позиции выхода целевого продукта, физико-химических и низкотемпературных свойств.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Объект исследования. В данной работе в качестве объекта исследования выступили пищевые нерафинированные растительные масла, полученные из пяти различных масличных культур. Для растительных масел была принята следующая маркировка: подсолнечное масло – П, горчичное масло – Г, льняное масло – Л, кукурузное масло – К, рыжиковое масло – Р.

С использованием имеющихся образцов растительного масла в качестве сырья было синтезировано биодизельное топливо (БиоДТ). Для полученных продуктов была принята следующая маркировка: продукт, полученный из подсолнечного масла – $П_{БиоДТ}$, продукт из горчичного масла – $Г_{БиоДТ}$, продукт из льняного масла – $Л_{БиоДТ}$, продукт из кукурузного масла – $К_{БиоДТ}$, продукт из рыжикового масла – $Р_{БиоДТ}$.

Методы определения состава и свойств. Для определения состава и свойств сырья для синтеза БиоДТ полученных смесей этиловых эфиров жирных кислот, а также смесей БиоДТ/ДТ в работе были использованы следующие методы:

– плотность при температуре 15 °С была определена с использованием вискозиметра Stanbinger SVM3000 Anton Paar в соответствии с методикой, представленной в ISO 12185:1996 «Нефть сырая и нефтепродукты. Определение плотности. Метод с применением осциллирующей U-образной трубки»;

– вязкость при 20 °С определяли с использованием вискозиметра Stanbinger SVM3000 Anton Paar в соответствии с методикой, представленной в ГОСТ 33-2016 «Нефть и нефтепродукты. Прозрачные и непрозрачные жидкости. Определение кинематической и динамической вязкости»;

– молекулярная масса была определена с использованием установки для криоскопического определения молекулярной массы КРИОН-1 в соответствии с методикой, представленной в ASTM D2224-78 «Method of Test for Mean Molecular Weight of Mineral Insulating Oils by the Cryoscopic Method»;

– температура помутнения ($T_п$) была определена с использованием термостата жидкостного низкотемпературного КРИО-Т-05-01 согласно методике, представленной в ГОСТ 5066-91 «Топлива моторные. Методы определения температуры помутнения, начала кристаллизации и кристаллизации»;

– температура застывания ($T_з$) была определена с использованием термостата жидкостного низкотемпературного КРИО-Т-05-01 согласно методике, представленной в ГОСТ 20287-91 «Нефтепродукты. Методы определения температур текучести и застывания».

Синтез БиоДТ проводился в избытке этилового спирта (молярное соотношение растительное масло : спирт составляло 1 : 9), в качестве катализатора был использован гидроксид калия (КОН).

Перед проведением эксперимента с различными образцами растительного масла требовалось приготовить спиртовой раствор КОН. Масса сухого КОН составляла 1 % масс. от общей массы растительного масла и этилового спирта. Приготовление спиртового раствора проводилось на орбитальном шейкере для колб до полного растворения сухого вещества (КОН) в этиловом спирте.

Реактором для синтеза БиоДТ выступил термостойкий стакан 1 объемом 1 л, помещенный на плиту 2, снабженный мешалкой 3 и термометром 4 (рисунок). Верх стакана был изолирован от окружающей среды с помощью металлической фольги для предотвращения улетучивания этилового спирта во время проведения реакции переэтерификации

Растительное масло было помещено в стакан и нагрето до температуры 75 °С при постоянном перемешивании. После достижения маслом установленной температуры к нему был добавлен приготовленный спиртовой раствор КОН. Время реакции переэтерификации составило 6°ч.

После окончания синтеза реакционную смесь охлаждали до комнатной температуры, после чего к смеси добавлялся глицерин в количестве 25 % масс. от массы растительного масла для облегчения отделения смеси этиловых эфиров жирных кислот от остатков непрореагировавших компонентов.

Смесь, полученную после проведения реакции, выдерживали в делительной воронке до образования видимых границ раздела фаз, где верхний слой – смесь продукта и остаточного спирта, средний слой – непрореагировавшие растительное масло и спиртовой раствор щелочи, нижний слой – глицериновая фаза.

Остаточный спирт из продуктовой смеси был отогнан с помощью роторного испарителя.

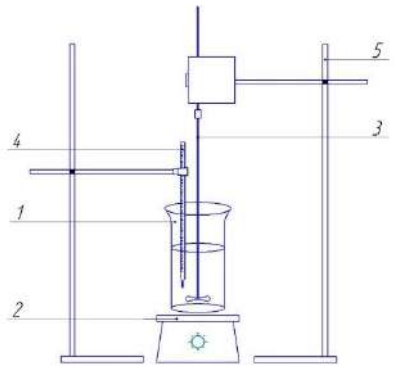

Схема установки для синтеза БиоДТ:
1 – термостойкий стакан; 2 – электронагреватель с регулятором;
3 – автоматическая лопастная мешалка;
4 – термометр; 5 –лабораторный штатив

Installation diagram for the biodiesel synthesis:
1 – heat-resistant beaker; 2 – electric stove with heat control; 3 – automatic blade stirrer;
4 – thermometer; 5 – laboratory stand

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты определения свойств сырья для синтеза БиоДТ. Результаты определения физико-химических свойств растительных масел – сырья для синтеза БиоДТ, полученные с использованием обозначенных методик, представлены в табл. 1.

Из представленных в табл. 1 результатов видно, что наибольшей вязкостью характеризуется кукурузное масло, наименьшей – льняное. При рассмотрении плотности стоит отметить, что наибольшей плотностью характеризуется льняное масло, а наименьшей – горчичное. Наибольшей молекулярной массой характеризуется подсолнечное масло, наименьшей – рыжиковое масло.

Результаты определения молекулярной массы растительных масел также были использованы для определения соотношений реагентов для синтеза БиоДТ, исходя из молярного соотношения растительное масло : спирт – 1 : 9.

Таблица 1

Физико-химические свойства растительных масел

Table 1

Physicochemical properties of vegetable oils

Свойство	П	Г	Л	К	Р
Динамическая вязкость при 20 °С, мПа·с	57,431	66,138	47,411	66,960	59,273
Кинематическая вязкость при 20 °С, мм^2/с	62,455	72,142	51,067	72,984	64,363
Плотность при 15 °С, кг/м^3	922,9	920,1	931,5	920,8	923,8
Молекулярная масса, г/моль	743,207	720,948	708,769	736,112	703,286

Таблица 2

Низкотемпературные свойства растительных масел

Table 2

Low-temperature characteristics of vegetable oils

Свойство	П	Г	Л	К	Р
$T_п$, °С	-9	-18	-13	-11	-7
$T_з$, °С	-19	-29	-16	-14	-17

Из результатов, приведенных в табл. 2, видно, что наилучшие низкотемпературные характеристики имеет горчичное масло; наиболее положительной $T_п$ – рыжиковое масло; наиболее положительной $T_з$ – кукурузное масло.

Результаты синтеза БиоДТ из растительных масел. По представленной методике был проведен синтез БиоДТ из различных растительных масел. Об эффективности синтеза БиоДТ можно судить по степени превращения исходного сырья и выходу целевого продукта – смеси этиловых эфиров жирных кислот. Выходы БиоДТ, полученных реакцией переэтерификации различных растительных масел, приведены в табл. 3.

Из представленных в табл. 3 результатов видно, что наибольший выход БиоДТ наблюдается для подсолнечного масла, наименьший – для рыжикового.

Различие выходов продукта можно объяснить различным составом масел, т.е. содержанием триацилглицеринов различных жирных кислот [19]. Известно, что глубина переэтерификации зависит не только от типа используемого спирта, но и от строения молекул триацилглицеринов жирных кислот, вступающих в реакцию [20].

Результаты определения физико-химических свойств БиоДТ, полученных из различных растительных масел, представлены в табл. 4.

Как можно видеть из результатов, представленных в табл. 4, наибольшей вязкостью характеризуется продукт, полученный из рыжикового масла, наименьшей – продукт, полученный из подсолнечного масла. Наибольшую плотность имеет продукт, полученный из льняного масла, наименьшую – продукт, полученный из кукурузного масла. Кроме того, наибольшую молекулярную массу имеет продукт, полученный из рыжикового масла, наименьшую – продукт, полученный из кукурузного масла.

Таблица 3

Выход БиоДТ из различных растительных масел

Table 3

Biodiesel yield from various vegetable oils

Параметр	$П_{БиоДТ}$	$Г_{БиоДТ}$	$Л_{БиоДТ}$	$К_{БиоДТ}$	$Р_{БиоДТ}$
Масса исходных компонентов, г	584,40	573,20	567,10	580,75	572,70
Масса конечного продукта, г	345,50	288,70	290,80	322,10	247,30
Выход, %	59,12	50,37	51,28	55,46	43,18

Таблица 4

Физико-химические свойства полученных БиоДТ

Table 4

Physicochemical properties of the obtained biodiesels

Свойство	$П_{БиоДТ}$	$Г_{БиоДТ}$	$Л_{БиоДТ}$	$К_{БиоДТ}$	$Р_{БиоДТ}$
Динамическая вязкость при 20 °С, мПа·с	15,488	19,598	16,294	17,297	20,834
Кинематическая вязкость при 20 °С, мм^2/с	17,191	21,734	17,879	19,225	22,988
Плотность при 15 °С, кг/м^3	904,7	905,0	915,1	903,4	910,0
Молекулярная масса, г/моль	260,639	304,633	282,067	205,630	345,024

При сравнении физико-химических свойств сырья для синтеза БиоДТ (см. табл. 1) и полученных продуктов (см. табл. 4) можно отметить, что наблюдается существенное уменьшение значений всех физико-химических свойств. Вязкость полученных БиоДТ по сравнению с исходными растительными маслами снизилась в среднем более чем в 3 раза; плотность продуктов снизилась на 13–18 кг/м^3 по сравнению с сырьем для синтеза. Из представленных результатов видно, что значения молекулярной массы БиоДТ в сравнении с исходным сырьем снизились в среднем более чем в 2,5 раза. Наблюдаемые тенденции объясняются тем, что в ходе реакции переэтерификации триацилглицерины, имеющие достаточно высокую молекулярную массу, переходят в сложные смеси этиловых эфиров жирных кислот, молекулярная масса которых, как известно, значительно ниже.

Существенное снижение всех физико-химических свойств продуктов по сравнению с сырьем положительно сказывается на возможности применения полученных БиоДТ для транспортных средств, так как вязкое и тяжелое топливо затрудняет работу двигателя.

Результаты определения низкотемпературных свойств ($T_п$ и $T_з$) полученных БиоДТ представлены в табл. 5.

Из представленных в табл. 5 данных видно, что полученные БиоДТ характеризуются более положительными $T_п$ и $T_з$ по сравнению с растительными маслами, из которых они синтезированы (см. табл. 3). Продукт, полученный из горчичного масла, имеет наилучшие низкотемпературные свойства, продукт, полученный из подсолнечного масла – наихудшие.

Таблица 5

Низкотемпературные свойства полученных БиоДТ

Table 5

Low-temperature characteristics of the obtained biodiesels

Свойство	$П_{БиоДТ}$	$Г_{БиоДТ}$	$Л_{БиоДТ}$	$К_{БиоДТ}$	$Р_{БиоДТ}$
$T_п$, °С	+7	-11	-10	+5	-5
$T_з$, °С	-8	-14	-12	-10	-11

Выбор наиболее предпочтительного сырья для синтеза БиоДТ. Наиболее предпочтительным в качестве смесевого компонента ДТ будет БиоДТ, характеризующееся наименьшей плотностью, вязкостью и молекулярной массой, имеющее наиболее отрицательные низкотемпературные свойства, при этом выход БиоДТ при переэтерификации растительного масла должен быть максимален.

С целью выбора наиболее предпочтительного сырья для синтеза БиоДТ было проведено ранжирование полученных продуктов с присвоением баллов. Полученным БиоДТ были присвоены баллы от 1 до 5 в порядке увеличения плотности, вязкости и низкотемпературных свойств (от более отрицательных к менее отрицательным температурам), а также в порядке уменьшения выхода. Сложение баллов позволяет определить наиболее предпочтительное сырье для синтеза

БиоДТ: следуя представленной логике, наиболее предпочтительным будет сырье с наименьшей суммой баллов.

Результаты сравнения полученных БиоДТ (в баллах) представлены в табл. 6.

Таблица 6
Выбор наиболее предпочтительного сырья для синтеза БиоДТ

Таблица 6
Choice of the most preferred feedstock for the biodiesel synthesis

Критерий оценки	Баллы				
	$П_{БиоДТ}$	$Г_{БиоДТ}$	$Л_{БиоДТ}$	$К_{БиоДТ}$	$Р_{БиоДТ}$
Выход	1	4	3	2	5
Вязкость	1	4	2	3	5
Плотность	2	3	5	1	4
Молекулярная масса	2	4	3	1	5
$T_п$	5	1	2	4	3
$T_з$	5	1	2	4	3
Сумма баллов по физико-химическим свойствам	*5*	*11*	*10*	*5*	*14*
Сумма баллов по низко-температурным свойствам	*10*	*2*	*4*	*8*	*6*
Общая сумма баллов	*16*	*17*	*17*	*15*	*25*

Исходя из результатов, представленных в табл. 6, можно заключить, что с точки зрения физико-химических свойств наиболее предпочтительным сырьем для синтеза БиоДТ являются подсолнечное и кукурузное масла, с точки зрения низкотемпературных свойств – горчичное масло.

ВЫВОДЫ

1. Из пяти рассмотренных растительных масел (подсолнечное, горчичное, льняное, кукурузное, рыжиковое) с использованием этанола в качестве переэтерифицирующего агента и гидроксида калия в качестве катализатора было синтезировано БиоДТ и рассчитаны его выходы для каждого из масел. Установлено, что наибольший выход БиоДТ наблюдается для подсолнечного масла (59,12 %), наименьший – для рыжикового (43,18 %). Различие выходов БиоДТ объясняется различным составом масел и различной реакционной способностью жирных кислот, входящих в состав масел.

2. Определены основные физико-химические и низкотемпературные свойства исходных растительных масел. Показано, что наибольшей вязкостью характеризуется кукурузное масло, наименьшей – льняное; наибольшей плотностью характеризуется льняное масло, наименьшей – горчичное; наибольшей молекулярной массой характеризуется подсолнечное масло, наименьшей – рыжиковое. Выявлено, что наилучшие низкотемпературные характеристики имеет горчичное масло; наиболее положительной $T_п$ – рыжиковое; наиболее положительной $T_з$ – кукурузное масло.

3. Определены основные физико-химические и низкотемпературные свойства полученных БиоДТ. Выявлено, что наибольшей вязкостью характеризуется БиоДТ, полученное из рыжикового масла, наименьшей – БиоДТ из подсолнечного масла; наибольшей плотностью характеризуется БиоДТ, полученное из льняного масла, наименьшей – БиоДТ из кукурузного масла; наибольшей молекулярной массой характеризуется БиоДТ, полученное из рыжикового масла, наименьшей – БиоДТ из кукурузного масла. Также показано, что наилучшие низкотемпературные свойства имеет БиоДТ, полученное из горчичного масла, наихудшими – БиоДТ из подсолнечного масла.

4. Установлено, что с точки зрения физико-химических свойств наиболее предпочтительным сырьем для синтеза БиоДТ являются подсолнечное и кукурузное масла, с точки зрения низкотемпературных свойств – горчичное масло. В целом наиболее предпочтительным сырьем является кукурузное масло, однако, с учетом стоимости, популярности и доступности масел на рынке, наиболее предпочтительным сырьем для синтеза БиоДТ является подсолнечное масло.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Erdiwansyah, Mamat R., Sani M.S.M., Sudhakar K., Kadarohman A., Sardjono R.E. An overview of Higher alcohol and biodiesel as alternative fuels in engines // Energy Reports. 2019. Vol. 5. P. 467–479. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2019.04.009

2. Марков В.А., Каськов С.И. Лобода С.С. Растительные масла как экологическая добавка к нефтяному дизельному топливу // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2018. N 7. С. 48–60. https://doi.org/10.18698/0536-1044-2018-7-48-60

3. Dwivedi G., Jain S., Sharma M.P. Impact analysis of biodiesel on engine performance – A review // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2011. Vol. 15. P. 4633–4641. https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.089

4. Srithar K., Balasubramanian K.A. Dual biodiesel for diesel engine -Property, performance and emission analysis // International Energy Journal. 2014. Vol. 14. Issue 3. P. 107–120.

5. Tongroon M., Saisirirat P., Suebwong A., Aunchaisri J., Kananont M., Chollacoop N. Combustion and emission characteristics investigation of diesel-ethanol-biodiesel blended fuels in a compression-ignition engine and benefit analysis // Fuel. 2019. Vol. 255. 115728. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.115728

6. Богданов И.А., Алтынов А.А., Белинская Н.С., Киргина М.В. Исследование влияния состава прямогонных дизельных топлив на эффектив-

ность действия низкотемпературных присадок // Нефтепереработка и нефтехимия. Научно-технические достижения и передовой опыт. 2018. N 11. С. 37–42.

7. Капустин В.М., Карпов С.А., Сайдахмедов А.И. Биодизельное топливо: преимущества, недостатки и перспективы промышленного производства // Нефтепереработка и нефтехимия. Научно-технические достижения и передовой опыт. 2011. N 4. С. 49–54.

8. Левтеров А.М., Савицкий В.Д., Левтерова Л.И. Экспериментальные исследования моторных качеств смесевого биодизельного топлива // Автомобильный транспорт. 2011. N 28. С. 81–84.

9. Дворецкий С.И., Зазуля А.Н., Нагорнов С.А., Романцова С.В., Рязанцева И.А. Производство биодизельного топлива из органического сырья // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. 2012. N 5 (39). С. 126–135.

10. Günay M.E., Türker L., Tapan N.A. Significant parameters and technological advancements in biodiesel production systems // Fuel. 2019. Vol. 250. P. 27–41. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.03.147

11. Tapan N.A., Yıldırım R., Günay M.E. Analysis of past experimental data in literature to determine conditions for high performance in biodiesel production // Biofuels, Bioproducts and Biorefining. 2016. Vol. 10. N 4. P. 422–434. https://doi.org/10.1002/bbb.1650

12. Islam A., Taufiq-Yap Y.H., Chan E.S. Moniruzzaman M., Islam S., Nabi M.N. Advances in solid-catalytic and non-catalytic technologies for biodiesel production // Energy Conversion and Management. 2014. Vol. 88. P. 1200–1218. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.04.037

13. Gusniah A., Veny H., Hamzah F. Ultrasonic assisted enzymatic transesterification for biodiesel production // Industrial and Engineering Chemistry Research. 2019. Vol. 58. Issue 2. P. 581–589. https://doi.org/10.1021/acs.iecr.8b03570

14. Sun S., Guo J., Duan X. Biodiesel preparation from Phoenix tree seed oil using ethanol as acyl acceptor // Industrial Crops and Products. 2019. Vol. 137. P. 270–275.

15. Yang X.X., Wang Y.T., Yang Y.T., Feng E.Z., Luo J., Zhang F., et al. Catalytic transesterification to biodiesel at room temperature over several solid bases // Energy Conversion and Management. 2018. Vol. 164. P. 112–121. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.02.085

16. Abbah E.C., Nwandikom G.I., Egwuonwu C.C., Nwakuba N.R. Effect of reaction temperature on the yield of biodiesel from neem seed oil // American Journal of Energy Science. 2016. Vol. 3. N 3. P. 16–20.

17. Leung D.Y.C., Guo Y. Transesterification of neat and used frying oil: optimization for biodiesel production // Fuel Processing Technology. 2006. Vol. 87. N 10. P. 883–890. https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2006.06.003

18. Singh D., Sharma D., Soni S.L., Sharma S., Kumar D. Chemical compositions, properties, and standards for different generation biodiesels: A review // Fuel. 2019. Vol. 253. P. 60–71. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.04.174

19. Сноре М., Мяки-Арвела П., Симакова И.Л., Мюллюойа Ю., Мурзин Д.Ю. Обзор каталитических методов производства биодизельного топлива из натуральных масел и жиров // Сверхкритические флюиды: теория и практика. 2009. Т. 4. N 1. С. 3–17.

20. Саргужиева Б.А. Реакции алкоголиза и переэтерификации в процессе производства биотоплива // Наука в центральной России. 2015. N 5 (17). С. 75–84.

REFERENCES

1. Erdiwansyah, Mamat R, Sani MSM, Sudhakar K, Kadarohman A, Sardjono RE. An overview of Higher alcohol and biodiesel as alternative fuels in engines. *Energy Reports.* 2019;5:467–479. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2019.04.009

2. Markov VA, Kaskov SI, Loboda SS. Vegetable Oils as an Environmentally Safe Additive to Petroleum Diesel Fuel. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroenie* = Proceedings of Higher Educational Institutions. Mashine Building. 2018;7:48–60. (In Russian) https://doi.org/10.18698/0536-1044-2018-7-48-60

3. Dwivedi G, Jain S, Sharma MP. Impact analysis of biodiesel on engine performance – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2011;15:4633–4641. https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.089

4. Srithar K, Balasubramanian KA. Dual biodiesel for diesel engine -Property, performance and emission analysis. *International Energy Journal.* 2014;14(3):107–120.

5. Tongroon M, Saisirirat P, Suebwong A, Aunchaisri J, Kananont M, Chollacoop N. Combustion and emission characteristics investigation of diesel-ethanol-biodiesel blended fuels in a compression-ignition engine and benefit analysis. *Fuel.* 2019;255:115728. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.115728

6. Bogdanov IA, Altynov AA, Belinskaya NS, Kirgina MV. Study of the influence of the composition of straight-run diesel fuels on the effectiveness of low-temperature additives. *Neftepererabotka i neftekhimiya. Nauchno-tekhnicheskie dostizheniya i peredovoi opyt* = Oil refining and petrochemistry. Scientific and technological achievements and advanced experience. 2018;11:37–42. (In Russian)

7. Kapustin VM, Karpov SA, Saydakhmedov AI. Biodiesel: advantages, lacks and prospects of industrial production. *Neftepererabotka i neftekhimiya. Nauchno-tekhnicheskie dostizheniya i peredovoi opyt*

= Oil refining and petrochemistry. scientific and technological achievements and advanced experience. 2011;4:49–54. (In Russian)

8. Levterov A, Savitskyi V, Levterova L. Experimental researches of motor qualities of blenderized biodiesel fuel. *Avtomobil'nyi transport* = Automobile transport. 2011;28:81–84. (In Russian)

9. Dvoretsky SI, Zazulya AN, Nagornov SA, Romantsova SV, Ryazantseva IA. Biodiesel Production from Organic Raw Materials *Voprosy sovremennoi nauki i praktiki. Universitet im. V.I. Vernadskogo* = Problems of Contemporary Science and Practice. Vernadsky University. 2012;5:126–135. (In Russian)

10. Günay ME, Türker L, Tapan N.A. Significant parameters and technological advancements in biodiesel production systems. *Fuel.* 2019;250:27–41. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.03.147

11. Tapan NA, Yıldırım R, Günay ME. Analysis of past experimental data in literature to determine conditions for high performance in biodiesel production. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining.* 2016; 10(4):422–434. https://doi.org/10.1002/bbb.1650

12. Islam A, Taufiq-Yap YH, Chan ES Moniruzzaman M, Islam S, Nabi MN. Advances in solid-catalytic and non-catalytic technologies for biodiesel production. *Energy Conversion and Management.* 2014;88:1200–1218. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.04.037

13. Gusniah A, Veny H, Hamzah F. Ultrasonic assisted enzymatic transesterification for biodiesel production. *Industrial and Engineering Chemistry Research*. 2019;58(2):581–589. https://doi.org/10.1021/acs.iecr.8b03570

14. Sun S, Guo J, Duan X. Biodiesel preparation from Phoenix tree seed oil using ethanol as acyl acceptor. *Industrial Crops and Products*. 2019;137:270–275.

15. Yang XX, Wang YT, Yang YT, Feng EZ, Luo J, Zhang F, et al. Catalytic transesterification to biodiesel at room temperature over several solid bases. *Energy Conversion and Management.* 2018; 164:112–121. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.02.085

16. Abbah EC, Nwandikom GI, Egwuonwu CC, Nwakuba NR. Effect of reaction temperature on the yield of biodiesel from neem seed oil. *American Journal of Energy Science*. 2016; 3(3):16–20.

17. Leung DYC, Guo Y. Transesterification of neat and used frying oil: optimization for biodiesel production. *Fuel Processing Technology*. 2006;87 (10):883–890. https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2006.06.003

18. Singh D, Sharma D, Soni SL, Sharma S, Kumar D. Chemical compositions, properties, and standards for different generation biodiesels: A review. *Fuel.* 2019;253:60–71. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.04.174

19. Snåre M., Mäki-Arvela P., Simakova I.L., Myllyoja J., Murzin D.Yu. Overview of catalytic methods for production of next generation biodiesel from natural oils and fats. *Sverkhkriticheskie flyuidy: teoriya i praktika.* = Supercritical Fluids: Theory and Practice. 2009;4(1):3–17. (In Russian)

20. Sarguzhieva BA. Alcoholysis and transesterification in the production process biofuel. *Nauka v tsentral'noi Rossii* = Science in Central Russia. 2015;5(7):75–84. (In Russian)

Критерии авторства

Белозерцева Н.Е., Богданов И.А., Алтынов А.А., Бальжанова А.Т., Белинская Н.С., Киргина М.В. выполнили экспериментальную работу, на основании полученных результатов провели обобщение и написали рукопись. Белозерцева Н.Е., Богданов И.А., Алтынов А.А., Бальжанова А.Т., Белинская Н.С., Киргина М.В. имеют на статью равные авторские права и несут равную ответственность за плагиат.

Contribution

Natalia E. Belozertseva, Ilya A. Bogdanov, Andrey A. Altynov, Aryuna T. Balzhanova, Nataliya S. Belinskaya, Maria V. Kirgina carried out the experimental work, summarized the material and wrote the manuscript. Natalia E. Belozertseva, Ilya A. Bogdanov, Andrey A. Altynov, Aryuna T. Balzhanova, Nataliya S. Belinskaya, Maria V. Kirgina have equal author's rights and bear equal responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Белозерцева Наталья Евгеньевна,
аспирант,
Томский политехнический университет,
634050, г. Томск, пр-т Ленина, 30,
Российская Федерация,
✉ e-mail: belozertsevanatasha@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Natalia E. Belozertseva,
Postgraduate Student,
Tomsk Polytechnic University,
30 Lenin Ave., Tomsk 634050,
Russian Federation,
✉ e-mail: belozertsevanatasha@mail.ru

Богданов Илья Александрович,
аспирант,
Томский политехнический университет,
634050, г. Томск, пр-т Ленина, 30,
Российская Федерация,
e-mail: bogdanov_ilya@mail.ru

Алтынов Андрей Андреевич,
аспирант,
Томский политехнический университет,
634050, г. Томск, пр-т Ленина, 30,
Российская Федерация,
e-mail: andrey_altun@mail.ru

Бальжанова Арюна Тогмитовна,
студентка,
Томский политехнический университет,
634050, г. Томск, пр-т Ленина, 30,
Российская Федерация,
e-mail: balzhanova@mail.ru

Белинская Наталия Сергеевна,
к.т.н., научный сотрудник,
Томский политехнический университет,
634050, г. Томск, пр-т Ленина, 30,
Российская Федерация,
e-mail: belinskaya@tpu.ru

Киргина Мария Владимировна,
к.т.н., доцент,
Томский политехнический университет,
634050, г. Томск, пр-т Ленина, 30,
Российская Федерация,
e-mail: mkirgina@tpu.ru

Ilya A. Bogdanov,
Postgraduate Student,
Tomsk Polytechnic University,
30 Lenin Ave., Tomsk 634050,
Russian Federation,
e-mail: bogdanov_ilya@mail.ru

Andrey A. Altynov,
Postgraduate Student,
Tomsk Polytechnic University,
30 Lenin Ave., Tomsk 634050,
Russian Federation,
e-mail: andrey_altun@mail.ru

Aryuna T. Balzhanova,
Student,
Tomsk Polytechnic University,
30 Lenin Ave., Tomsk 634050,
Russian Federation,
e-mail: balzhanova@mail.ru

Nataliya S. Belinskaya,
Cand. Sci. (Engineering), Researcher,
Tomsk Polytechnic University,
30 Lenin Ave., Tomsk 634050,
Russian Federation,
e-mail: belinskaya@tpu.ru

Maria V. Kirgina,
Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor,
Tomsk Polytechnic University,
30 Lenin Ave., Tomsk 634050,
Russian Federation,
e-mail: mkirgina@tpu.ru