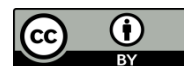


Научная статья

УДК 665.753.5

DOI: <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2022-12-1-130-140>



Исследование целесообразности использования биодизельных топлив в качестве смесового компонента товарных дизельных топлив

Наталья Евгеньевна Белозерцева, Ольга Михайловна Торчакова,
Илья Александрович Богданов, Мария Владимировна Киргина

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
г. Томск, Российская Федерация

Автор, ответственный за переписку: Киргина Мария Владимировна, mkirgina@tpu.ru

Аннотация. Сокращение выбросов от сжигания углеводородного топлива и увеличение объемов потребления биотоплив – актуальная экономическая и экологическая задача. Биодизель является альтернативой нефтяному дизельному топливу и широко используется во всем мире в качестве смесового компонента товарного топлива. Важной задачей становится оценка целесообразности применения биодизеля, полученного из различного сырья, в качестве смесового компонента товарных дизельных топлив, а также выбор оптимальных соотношений биодизельное/нефтяное дизельное топливо, так как даже добавление небольшого количества биодизеля положительно сказывается на экологических свойствах топлива. В работе реакцией переэтерификации с использованием этилового спирта в качестве переэтерифицирующего агента и гидроксида натрия в качестве катализатора синтезировано биодизельное топливо из подсолнечного, кукурузного и рапсового масел; определены состав и свойства синтезированных биодизельных топлив. Приготовлены смеси биодизельное/нефтяное дизельное топливо с содержанием биодизеля в смеси 5, 10, 15, 20% об.; определены состав и свойства полученных смесей. Установлено, что добавление биодизельного топлива приводит к увеличению плотности, вязкости и самовоспламеняемости, снижению содержания серы и утяжелению фракционного состава топлива. С увеличением концентрации биодизеля в смеси эффект усиливается. Выявлен эффект снижения предельной температуры фильтруемости смесового топлива при добавлении биодизеля, максимальный эффект достигается при различных концентрациях в смеси биодизеля, синтезированного из подсолнечного, кукурузного и рапсового масел. Показано, что для производства летнего товарного дизельного топлива рекомендуется использовать смеси 10% об. биодизельного топлива, полученного из любого из растительных масел, и 90% об. нефтяного дизельного топлива.

Ключевые слова: биодизельное топливо, смесовое топливо, низкотемпературные свойства, переэтерификация, рапсовое масло, марки топлива

Для цитирования: Белозерцева Н. Е., Торчакова О. М., Богданов И. А., Киргина М. В. Исследование целесообразности использования биодизельных топлив в качестве смесового компонента товарных дизельных топлив // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2022. Т. 12. N 1. С. 130–140. <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2022-12-1-130-140>.

CHEMICAL TECHNOLOGY

Original article

Feasibility study of using biodiesel fuels as a blendstock of commercial diesel fuels

Natalia E. Belozertseva, Olga M. Torchakova,
Ilya A. Bogdanov, Maria V. Kirgina

National Research Tomsk Polytechnic University,
Tomsk, Russian Federation

Corresponding author: Mariya V. Kirgina, mkirgina@tpu.ru

© Белозерцева Н. Е., Торчакова О. М., Богданов И. А., Киргина М. В., 2022

Abstract. Reducing emissions associated with the combustion of hydrocarbon fuels and increasing the consumption of biofuels represents an urgent economic and environmental task. Biodiesel is an alternative to petroleum diesel fuel and is widely used as a commercial fuel blendstock. In this regard, it is important to study the feasibility of using biodiesel obtained from various raw materials as a blendstock of commercial diesel fuels, as well as to identify optimal ratios of biodiesel fuel/petroleum diesel fuel. The addition of even small amounts of biodiesel has a positive effect on the environmental properties of the fuel. In the present study, we synthesize biodiesel fuel from sunflower, corn, and rapeseed oils by the reaction of interesterification using ethyl alcohol as an interesterifying agent and sodium hydroxide as a catalyst. The composition and properties of the synthesized biodiesel fuels were determined. Blends of biodiesel/petroleum diesel fuel with 5, 10, 15, 20 vol.% biodiesel blend content were prepared followed by determination of their composition and properties. It was found that the addition of biodiesel fuel increases the density, viscosity, and self-ignition of the resulting fuel, at the same time as decreasing the sulfur content and making the fractional composition heavier. This effect is directly proportional to the concentration of biodiesel in the blend. The effect of reducing the limiting filterability temperature of the blend fuel by the addition of biodiesel was revealed, with its maximum achieved at different concentrations of biodiesel synthesized from sunflower, corn, and rapeseed oils. For the production of a summer commercial diesel fuel, we recommend blends of 10vol.% biodiesel fuel, derived from any of the vegetable oils under study, and 90vol.% petroleum diesel fuel.

Keywords: biodiesel fuel, blend fuel, low temperature properties, interesterification, rapeseed oil, fuel grades

For citation: Belozertseva N. E., Torchakova O. M., Bogdanov I. A., Kirgina M. V. Feasibility study of using biodiesel fuels as a blendstock of commercial diesel fuels. *Izvestiya Vuzov. Prikladnaya Khimiya i Biotekhnologiya* = *Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2022;12(1):130-140. (In Russian). <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2022-12-1-130-140>.

ВВЕДЕНИЕ

Сжигание ископаемого топлива вносит существенный вклад в выбросы парниковых газов, которые негативно влияют на атмосферу. Изменение климата является важной проблемой современного мира, так как влечет за собой частичную или полную потерю экосистем и видов. Курс многих стран направлен на снижение выбросов парниковых газов¹ и вредных веществ [1–4]. Одним из инструментов для достижения данной цели является использование альтернативных источников энергии, к которым относятся жидкие биотоплива для моторных двигателей.

Производство жидкого биотоплива за последние десятилетия резко возросло (в 2020 году мировые объемы производства биоэтанола составили порядка 1700 тыс. баррелей в день, биодизеля – порядка 2700 тыс. баррелей в день) и, согласно прогнозам экспертов, будет только расти^{2,3} [5–7]. Биодизель (БиодТ) является альтернативой нефтяному дизельному топливу (ДТ) и может использоваться в дизельных двигателях внутреннего сгорания как в чистом виде, так и в качестве смесового компонента.

БиодТ представляет собой жидкое топливо, состоящее из метиловых или этиловых эфиров

жирных кислот, полученных в результате переэтерификации растительных масел, животных жиров, а также липидов микроводорослей^{4,5} [8–13].

Свойства БиодТ во многом схожи со свойствами нефтяного ДТ, но БиодТ обладает рядом преимуществ. Прежде всего БиодТ является возобновляемым топливом, что особенно актуально при современном уровне потребления ископаемого сырья. Экологическая обстановка в мире требует снижения выбросов парниковых газов в атмосферу, а применение БиодТ в качестве топлива позволяет значительно сократить данные выбросы. Так, исследования показывают, что выбросы парниковых газов при использовании чистого БиодТ в качестве топлива на 74% ниже, чем для нефтяного ДТ. Это связано с тем, что в качестве сырья для синтеза БиодТ выступают растения или животные жиры, которые в течение своего жизненного цикла поглощали CO₂ из воздуха. При сжигании БиодТ CO₂ возвращается в атмосферу, и для выращивания последующего сырья будет использоваться этот же газ.

БиодТ можно отнести к экологически чистому источнику энергии, так как БиодТ не содержит в своем составе ароматических соединений, которые негативно влияют на живые организмы. При

¹NDC Synthesis Report. Available from: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/nationally-determined-contributions-ndcs/nationally-determined-contributions-ndcs/ndc-synthesis-report#eq-7> [Accessed 20th August 2021].

²Major biodiesel producing countries 2019. Available from: <https://www.statista.com/statistics/271472/biodiesel-production-in-selected-countries/> [Accessed 20th August 2021].

³Алексеев А. Перспективы биотоплива: «за» и «против» // Сибирская нефть [Электронный ресурс]. URL: <https://www.gazprom-neft.ru/press-center/sibneft-online/archive/2021-april/5380269/> (20.08.2021).

⁴Бурункова Ю. Э., Успенская М. В., Самуйлова Е. О. Растительные масла: свойства, технологии получения и хранения, окислительная стабильность: учебно-методическое пособие. СПб.: ИТМО, 2020. 82 с.

⁵Формула жира // SolverBook [Электронный ресурс]. URL: <http://ru.solverbook.com/spravochnik/formuly-poximii/formula-zhira/> (20.08.2021).

попадании в почву или сточные воды БиодТ полностью разлагается микроорганизмами. В почве или в воде БиодТ перерабатывается на 99% приблизительно за 20 дней [14, 15].

Кроме того, БиодТ характеризуется хорошей смазывающей способностью, но при этом практически не содержит серы и сернистых соединений. БиодТ имеет высокую температуру воспламенения (не менее 120 °С), это делает его безопасным для использования и хранения. Цетановое число БиодТ превышает 51 пункт, т.е. топливо может применяться без введения дополнительных иницирующих добавок.

Но также БиодТ имеет и ряд недостатков, к которым можно отнести невысокую химическую стабильность, в связи с чем срок хранения данного топлива не превышает 3–4-х месяцев. Кроме того, БиодТ характеризуется неудовлетворительными низкотемпературными свойствами.

Таким образом, БиодТ во многом схоже с нефтяным ДТ и может использоваться в качестве моторного топлива для дизельных двигателей. Однако молекулы, входящие в состав БиодТ, имеют совершенно иную структуру, нежели молекулы нефтяного ДТ, и свойства БиодТ будут в значительной степени зависеть от исходного сырья. Для разных регионов характерно распространение различных посевных культур, которые могут выступить сырьем для производства БиодТ, в связи с чем необходимо проводить анализ свойств БиодТ, синтезированных из различного сырья, для оценки возможности использования биотоплива в том или ином климатическом поясе.

Большая часть территории Российской Федерации располагается в холодных климатических поясах, поэтому обеспечение автопарка низкозастывающими моторными топливами является актуальной задачей. Использование БиодТ в чистом виде требует внесения изменений в конструкцию дизельного двигателя, и, как правило, данное топливо характеризуется низкотемпературными свойствами, не соответствующими требованиям современных стандартов^{6,7}. Наиболее перспективным является использование БиодТ в качестве смесового компонента.

Существует зарубежный стандарт ASTM D7467-20a «Standard Specification for Diesel Fuel Oil, Biodiesel Blend (B6 to B20)»⁸, который распространяется на топливные смеси с содержанием БиодТ от 6 до 20% об. Исследования многих ученых направлены на поиск оптимального

соотношения БиодТ/ДТ, которое позволит получать топливо, соответствующее всем требованиям стандартов.

Одной из стран, где большой популярностью пользуется биотопливо, является Малайзия. Производство БиодТ в Малайзии растет с каждым годом⁹. Так, авторы работы [16] охарактеризовали физико-химические и низкотемпературные свойства смесей товарного ДТ с 10, 20, 30, 40 и 50% об. БиодТ, синтезированного из пальмового масла. Согласно исследованию, плотность смесового топлива растет с увеличением содержания БиодТ в смеси. Авторы отмечают, что смесовое топливо с содержанием до 30% об. БиодТ соответствует требованиям стандарта⁸. По кинематической вязкости возможным является вовлечение в смешение до 50% об. БиодТ. Таким образом, авторы работы пришли к выводу, что оптимальной концентрацией БиодТ из пальмового масла в смеси с ДТ является 30% об., при данной концентрации значения плотности и вязкости топлива находятся в допустимых пределах. Кроме того, в работе показано, что температура помутнения и застывания смесей повышается с увеличением содержания БиодТ в смеси. Вовлечение 30% об. БиодТ повышает температуру застывания смеси до 0 °С, что является оптимальным для стран с более мягким климатом. Авторы допускают вовлечение в смешение до 30% об. БиодТ, данная концентрация обеспечивает удовлетворительные низкотемпературные характеристики топлива.

Авторами работы [17] проведено исследование влияния добавления БиодТ, синтезированного из сафлорового масла, на физико-химические свойства смесового топлива. Для исследования были приготовлены смеси с содержанием БиодТ от 10 до 90% об. с шагом 10% об. Авторы отмечают, что увеличение доли БиодТ в смеси приводит к увеличению плотности и вязкости. Оптимальное вовлечение БиодТ составляет 20% об., при данной концентрации значения кинематической вязкости лежат в допустимых пределах, смесовое топливо соответствует требованиям стандарта⁸.

Как уже было отмечено ранее, для производства БиодТ могут использоваться различные виды сырья. В работе [18] были исследованы физико-химические и низкотемпературные свойства смесей БиодТ/ДТ, где БиодТ было синтезировано реакцией переэтерификации из отработанного пищевого масла, куриного и козьего жира, а также пальмоядрового масла. Авторы от-

⁶ГОСТ 305-2013. Топливо дизельное. Технические условия [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200107826> (20.08.2021).

⁷ТР ТС 013 2011. Технический регламент таможенного союза «О требованиях к автомобильному и авиационному бензину, дизельному и судовому топливу, топливу для реактивных двигателей и мазуту» [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/902307833> (20.08.2021).

⁸ASTM D7467-20a Standard Specification for Diesel Fuel Oil, Biodiesel Blend (B6 to B20). Available from: <https://www.astm.org/Standards/D7467.htm> [Accessed 20th August 2021].

⁹Малайзия – Производство биотоплива // Мировой атлас данных [Электронный ресурс]. URL: <https://knoema.ru/atlas/> (20.08.2021).

мечают, что рассмотренное в работе нефтяное ДТ характеризуется сравнительно низкой кинематической вязкостью, целью исследования являлось получение смесового топлива с более высокой вязкостью путем вовлечения БиоДТ. Для исследования образцы БиоДТ, полученные из различного сырья, смешивались в соотношении 10, 20, 50, 60, 80% об. с нефтяным ДТ. Результаты исследования показывают общую тенденцию, сводящуюся к увеличению кинематической вязкости с увеличением содержания БиоДТ в смеси. Авторы отмечают, что БиоДТ из пальмоядрового масла является наиболее предпочтительным смесевым компонентом, так как характеризуется наибольшей вязкостью. Наименьшей вязкостью характеризуются смеси с добавлением отработанного растительного масла, данное БиоДТ предпочтительно для смешения с более высоковязким нефтяным ДТ. Исследование влияния добавления БиоДТ на плотность показало, что с увеличением концентрации БиоДТ в смеси плотность увеличивается. Смеси с добавлением БиоДТ из отработанного растительного масла характеризуются наименьшей плотностью, в то время как смеси с добавлением козьего жира – наибольшей. Авторами было установлено, что все смеси по значениям плотности и кинематической вязкости соответствуют требованиям стандарта⁸. Кроме того, в работе было установлено, что все синтезированные БиоДТ характеризуются неудовлетворительными низкотемпературными свойствами. Применение их в чистом виде в холодном климате не представляется возможным, смешение с нефтяным ДТ позволит улучшить низкотемпературные свойства топлива. По результатам, полученным авторами, можно сделать вывод, что для Российской Федерации, как страны с более жесткими климатическими условиями, наилучшим смесевым компонентом является БиоДТ, синтезированное из козьего жира, а наихудшим – БиоДТ из пальмоядрового масла.

Анализ литературных источников показывает, что влияние добавления БиоДТ к нефтяному ДТ на большинство регламентируемых показателей товарного топлива является не столь положительным. Таким образом, цель работы заключается в оценке целесообразности использования БиоДТ, полученного из различного сырья, в качестве смесового компонента товарных ДТ, в выборе оптимальных соотношений БиоДТ/нефтяное ДТ, так как даже добавление небольшого количества БиоДТ положительно сказывается на экологических свойствах топлива.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Объект исследования. Объектами исследования в работе выступили образец прямогонного нефтяного ДТ; образцы БиоДТ, синтезированные из различных растительных масел (подсолнеч-

ного (ПБиоДТ), кукурузного (КБиоДТ) и рапсового (РБиоДТ)), а также смеси БиоДТ/ДТ.

С использованием нефтяного ДТ и синтезированных из различных растительных масел БиоДТ были приготовлены смеси с соотношением смешиваемых компонентов, представленные в табл. 1.

Таблица 1. Маркировки смесей биодизеля / нефтяного дизельного топлива

Table 1. Marking of biodiesel / petroleum diesel

Обозначение смеси	Расшифровка
B5	5% об. биодизеля и 95% об. нефтяного дизельного топлива
B10	10% об. биодизеля и 90% об. нефтяного дизельного топлива
B15	15% об. биодизеля и 85% об. нефтяного дизельного топлива
B20	20% об. биодизеля и 80% об. нефтяного дизельного топлива

Синтез БиоДТ. Синтез БиоДТ проводился согласно методике, представленной в [19, 20]. В качестве переэтерифицирующего агента выступил этиловый спирт, в качестве катализатора – гидроксид натрия. Этиловый спирт использован как альтернатива токсичному метиловому спирту.

Реакция переэтерификации растительных масел осуществлялась при температуре 45 °С, времени синтеза – 1 ч, при молярном соотношении масло: спирт – 1:6 и концентрации катализатора 1,75% масс. от массы растительного масла.

Методы определения состава и свойств. Для определения состава и свойств исследуемых чистых и смесевых топлив были использованы следующие оборудование и методики: кинематическая и динамическая вязкости определялись с применением вискозиметра Штанбингера SVM 3000 (Anton Paar, Австрия) в соответствии с методикой, представленной в ГОСТ 33-2016 «Нефть и нефтепродукты. Прозрачные и непрозрачные жидкости. Определение кинематической и динамической вязкости»; плотность определялась также с использованием вискозиметра Штанбингера SVM 3000 (Anton Paar, Австрия) по методике, представленной в ISO 12185:1996 «Нефть сырая и нефтепродукты. Определение плотности. Метод с применением осциллирующей U-образной трубки»; содержание серы устанавливалось с использованием анализатора «СПЕКТРОСКАН S» (НПО «СПЕКТРОН», Россия) в соответствии с методикой, представленной в ГОСТ 32139-2013 «Нефть и нефтепродукты. Определение содержания серы методом энергодисперсионной рентгенофлуоресцентной спектроскопии»; фракционный со-

став определялся согласно методике, представленной в ГОСТ 2177-99 «Нефтепродукты. Методы определения фракционного состава»; расчет цетанового индекса (ЦИ) производился согласно зарубежному стандарту ISO 4264 «Petroleum products – Calculation of cetane index of middle distillate fuels by the four variable equation»; предельная температура фильтруемости (ПТФ) была определена согласно методике, представленной в ГОСТ 22254-92 «Топливо дизельное. Метод определения предельной температуры фильтруемости на холодном фильтре».

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты определения состава и свойств дизельного топлива. Результаты определения состава и основных свойства образца нефтяного ДТ представлены в табл. 2.

Таблица 2. Состав и свойства образца нефтяного дизельного топлива

Table 2. Composition and properties of petroleum diesel sample

Параметр	Значение
Плотность при 15 °С, кг/м ³	837,3
Вязкость кинематическая при 20 °С, мм ² /с	3,963
Содержание серы, мг/кг	5781
Цетановый индекс, пункты	44,53
Предельная температура фильтруемости, °С	-5
Фракционный состав, °С	
начало кипения	145
10	190
50	261
90	329

Из результатов, представленных в табл. 2, можно видеть, что образец нефтяного ДТ соответствует требованиям стандартов^{6,7} для марок Л (летнее), Е (межсезонное) и З (зимнее) по плотности (*не более 843,4 кг/м³*); по вязкости образец ДТ соответствует всем маркам (*1,5–6,0 мм²/с*). При этом по показателям воспламеняемости (*не менее 45 пунктов*) и содержанию серы (*не более 2000 мг/кг*) образец ДТ не соответствует ни одной из марок, согласно требованиям стандартов^{6,7}. По низкотемпературным свойствам образец ДТ соответствует марке Л (*ПТФ не выше -5 °С*). По фракционному составу исследуемый образец ДТ соответствует маркам Л, Е и З (*температура отгона 50% об. не превышает 280 °С, 95% об.*

не превышает 360 °С).

Таким образом, исходя из несоответствия ДТ требованиям стандартов^{6,7} по ЦИ и содержанию серы, смешение данного образца ДТ с БиоДТ представляется перспективным, так как, согласно литературным данным, ЦИ БиоДТ выше, чем нефтяного ДТ, кроме того, БиоДТ характеризуется отсутствием серы в своем составе.

Результаты определения свойств биодизельного топлива. Результаты определения физико-химических и низкотемпературных свойств БиоДТ, синтезированных из различных растительных масел (подсолнечного, кукурузного, рапсового), представлены в табл. 3.

БиоДТ не содержит в своем составе серу, поэтому ее определение не производилось, также не производился расчет ЦИ по причине отсутствия данных по фракционному составу.

В соответствии с данными табл. 3, все БиоДТ, синтезированные из различных растительных масел, по плотности и вязкости не соответствуют ни одной из марок ДТ, согласно требованиям стандартов^{6,7}. Можно заметить, что БиоДТ из подсолнечного и кукурузного масел имеют практически одинаковое значение плотности, которое меньше, чем у БиоДТ из рапсового масла. БиоДТ из подсолнечного масла характеризуется наименьшей вязкостью, а БиоДТ из рапсового масла – наибольшей.

По низкотемпературным свойствам БиоДТ из подсолнечного и кукурузного масел соответствуют требованиям стандартов^{6,7} для марки Л, а БиоДТ из рапсового масла – для марок Л и Е (*ПТФ не выше 15 °С*).

Результаты определения состава и свойств смесей биодизельного и дизельного топлива. Результаты определения основных регламентируемых характеристик для смесей нефтяного ДТ и БиоДТ, синтезированного из различных растительных масел, представлены в табл. 4 и на рис. 1–3.

Как можно видеть из результатов, представленных в табл. 4, все смеси соответствуют требованиям стандартов^{6,7} для марок Л, Е и З по температуре отгона 95% об. Однако только смеси В5 и В10 для БиоДТ, синтезированных из всех растительных масел, соответствуют требованиям для марок Л, Е и З по температуре отгона 50% об., смеси В15 и В20 требованиям стандартов^{6,7} не соответствуют.

Таблица 3. Свойства синтезированного биодизеля

Table 3. Properties of synthesized biodiesel

	Биодизель из подсолнечного масла	Биодизель из кукурузного масла	Биодизель из рапсового масла
Плотность при 15 °С, кг/м ³	885,5	885,7	889,6
Вязкость кинематическая при 20 °С, мм ² /с	9,842	11,370	16,013
Предельная температура фильтруемости, °С	-8	-5	-18

Таблица 4. Фракционный состав смесей биодизеля / дизельного топлива

Table 4. Fractional composition of biodiesel / diesel fuel

Доля отгона, % об.	Температура, °C											
	Смесь биодизеля из подсолнечного масла / дизельного топлива				Смесь биодизеля из кукурузного масла / дизельного топлива				Смесь биодизеля из рапсового масла / дизельного топлива			
	B5	B10	B15	B20	B5	B10	B15	B20	B5	B10	B15	B20
начало кипения	122	117	126	140	114	97	132	122	133	134	134	137
10	189	189	189	189	189	195	195	195	193	189	189	191
50	271	273	285	290	270	276	282	282	273	273	283	288
90	333	335	342	352	330	332	334	342	340	341	353	345

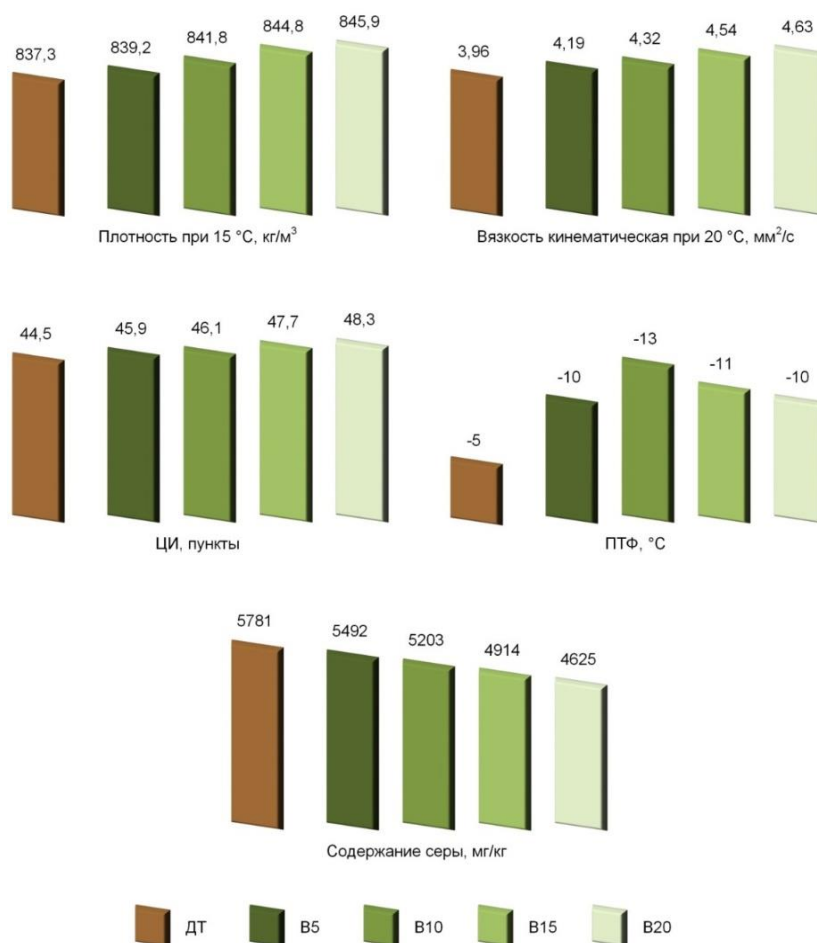


Рис. 1. Основные регламентируемые свойства смесей биодизеля из подсолнечного масла / дизельного топлива в сравнении с образцом чистого нефтяного дизельного топлива

Fig. 1. Main regulated properties of biodiesel from sunflower oil / diesel fuel blends compared to pure petroleum diesel sample

Из полученных результатов можно сделать вывод, что добавление БиодТ к ДТ приводит к утяжелению фракционного состава (с увеличением концентрации БиодТ эффект усиливается), что связано с тем, что БиодТ является более высококипящим компонентом по сравнению с ДТ.

Как можно видеть из результатов, представленных на рис. 1–3:

– по плотности при 15 °C: для БиодТ, синтезированных из всех масел, смеси B5 и B10 соот-

ветствуют требованиям для марки 3 (не более 843,4 кг/м³), смеси B15 и B20 – маркам Л и Е (не более 863,4 кг/м³);

– по кинематической вязкости при 20 °C: для ПБиодТ и КБиодТ все смеси соответствуют требованиям для марок Л, Е и 3 (1,8–5,0 мм²/с); для РБиодТ смеси B5, B10 и B15 соответствуют требованиям для марок Л, Е и 3, смесь B20 – для марок Л и Е (3,0–6,0 мм²/с);

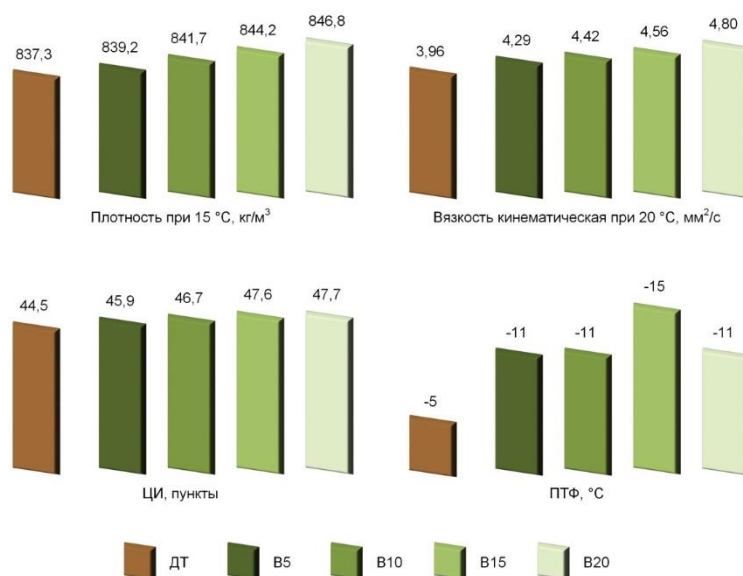


Рис. 2. Основные регламентируемые свойства смесей биодизеля из кукурузного масла / дизельного топлива в сравнении с образцом чистого нефтяного дизельного топлива

Fig. 2. Main regulated properties of biodiesel from corn oil / diesel fuelblends compared to pure petroleum diesel sample

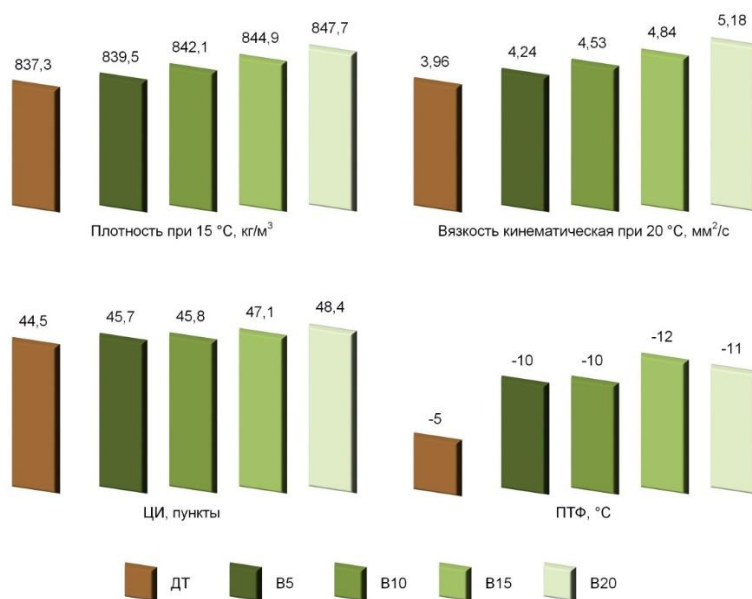


Рис. 3. Основные регламентируемые свойства смесей биодизеля из рапсового масла / дизельного топлива в сравнении с образцом чистого нефтяного дизельного топлива

Fig. 3. Main regulated properties of biodiesel from rapeseed oil / diesel fuel blends compared to pure petroleum diesel sample

– по ПТФ: для ПБиодТ и РБиодТ все смеси соответствуют требованиям для марки Л; для КБиодТ смеси В5, В10 и В20 соответствуют требованиям для марки Л, смесь В15 – для марки Е;
 – по содержанию серы: для БиодТ, синтезированных из всех масел, все смеси не соответствуют требованиям ни для одной марки ДТ;
 – по ЦИ: для БиодТ, синтезированных из всех масел, все смеси соответствуют требованиям для всех марок ДТ.

Кроме того, при анализе полученных данных можно отметить, что:

– смеси ПБиодТ/ДТ характеризуются лучшими (наименьшими) значениями плотности и вязкости, худшими (наибольшими) – смеси РБиодТ/ДТ;
 – смеси ПБиодТ/ДТ характеризуются лучшими значениями воспламеняемости, худшими – смеси РБиодТ/ДТ;
 – смеси КБиодТ/ДТ характеризуются лучшими низкотемпературными свойствами, низкотемпературные свойства смесей ПБиодТ/ДТ и РБиодТ/ДТ сравнимы;
 – наиболее низкими температурами начала

кипения (н.к.) и отгона 90% об. характеризуются смеси КБиодТ/ДТ, наиболее высокими – смеси РБиодТ/ДТ.

Как можно видеть из результатов, представленных на рис. 1–3, добавление БиодТ к ДТ приводит к увеличению плотности и вязкости (с увеличением концентрации БиодТ эффект усиливается), что связано с более высокими значениями плотности и вязкости для БиодТ по сравнению с ДТ. Также можно видеть, что для всех смесей с увеличением доли БиодТ снижается содержание серы, вследствие отсутствия таковой в чистом БиодТ, и увеличивается ЦИ, что объясняется хорошей самовоспламеняемостью БиодТ, а также увеличением плотности и утяжелением фракционного состава при добавлении БиодТ к ДТ.

Наиболее интересен эффект улучшения ПТФ при добавлении БиодТ к чистому ДТ. Для БиодТ, полученного из различных масел, максимальный эффект достигается при различных концентрациях БиодТ в смеси, так, для ПБиодТ максимальный эффект наблюдается для смеси В10, для КБиодТ и РБиодТ – для смеси В15.

Данные эффекты можно объяснить различиями в составе нефтяного ДТ и БиодТ. Если ДТ в своем составе содержит большое количество парафинов, которые при снижении температуры начинают кристаллизоваться и образовывать прочные кристаллические каркасы, то БиодТ состоит из кислородсодержащих молекул (сложных эфиров). БиодТ при снижении температуры приобретают желеобразную структуру, что в смеси с нефтяным ДТ позволяет оставаться топливу при низких температурах более подвижным и при этом при его разбавлении не забивать стандартный фильтрующий элемент.

Таким образом, использование БиодТ в качестве смесового компонента товарного ДТ является целесообразным, но допустимое количество определяется требуемой маркой товарного топлива. Кроме того, несомненным преимуществом такого биокomпонента является улучшение ПТФ, что особенно важно при работе двигателей в холодном климате.

ВЫВОДЫ

1. Реакцией переэтерификации с использованием этилового спирта в качестве переэтерифицирующего агента и гидроксида натрия в качестве катализатора синтезировано БиодТ из трех различных растительных масел – подсолнечного, кукурузного и рапсового.

2. Определены физико-химические и низкотемпературные свойства образца чистого ДТ и синтезированных БиодТ. Показано, что по физико-химическим свойствам ни один синтезированный образец БиодТ не соответствует требованиям стандартов^{6,7}, по низкотемпературным характеристикам ПБиодТ и КБиодТ соответствуют требованиям для летней марки, а РБиодТ – для

летней и межсезонной марок.

3. Приготовлены смеси БиодТ/ДТ с содержанием БиодТ в смеси 5, 10, 15, 20% об. Определены состав и свойства приготовленных смесей. Показано, что смеси ПБиодТ/ДТ характеризуются лучшими (наименьшими) значениями плотности и вязкости, худшими (наибольшими) – смеси РБиодТ/ДТ; смеси ПБиодТ/ДТ характеризуются лучшими значениями воспламеняемости, худшими – смеси РБиодТ/ДТ; смеси КБиодТ/ДТ характеризуются лучшими низкотемпературными свойствами, низкотемпературные свойства смесей ПБиодТ/ДТ и РБиодТ/ДТ сравнимы.

4. Выявлены закономерности влияния содержания БиодТ в смеси на состав и свойства топлива. Показано, что добавление БиодТ приводит к увеличению плотности, вязкости и ЦИ, снижению содержания серы и утяжелению фракционного состава топлива. С увеличением концентрации БиодТ в смеси эффект усиливается. Вместе с тем добавление БиодТ приводит к улучшению (снижению) ПТФ топлива. Для БиодТ, полученного из различных масел, максимальный эффект достигается при различных концентрациях БиодТ в смеси: для ПБиодТ максимальный эффект наблюдается при добавлении 10% об. (снижение на 8 °С), для КБиодТ и РБиодТ – при добавлении 15% об. (снижение на 10 и 7 °С соответственно).

5. Выработаны рекомендации по использованию БиодТ в качестве смесового компонента товарных ДТ. Показано, что с точки зрения физико-химических свойств наилучшей добавкой будет ПБиодТ, добавление которого в количестве 10% об. увеличивает плотность (на 4,5 кг/м³) и вязкость (на 0,352 мм²/с) в наименьшей степени. С точки зрения низкотемпературных свойств наилучшей добавкой будет КБиодТ, добавление которого позволяет снизить ПТФ до -15 °С (на 10 °С при добавлении 15% об. КБиодТ) и получить межсезонное топливо. Однако вовлечение более 10% об. БиодТ невозможно в связи с превышением требований по температуре отгона 50%-й фракции. Показано, что для производства летнего товарного ДТ рекомендуется использовать смеси 10% об. БиодТ, полученного из любого из растительных масел, и 90% об. ДТ. Для полученных смесей все показатели соответствуют требованиям стандартов^{6,7}, кроме содержания серы.

Таким образом, установлено, что использование БиодТ в качестве смесового компонента товарных ДТ является целесообразным. Выявленные закономерности и выработанные рекомендации позволяют производить смесовые топлива, соответствующие требованиям стандартов, с вовлечением в переработку различного растительного сырья. Использование БиодТ в качестве смесового компонента позволит расширить сырьевой пул для производства товарных ДТ с улучшенными экологическими характеристиками.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Захарова Е. А., Лихачева Н. А. Оценка экологической эффективности нефтеперерабатывающих производств // *Химия и технология топлив и масел*. 2021. Т. 57. N 3. С. 49–52. <https://doi.org/10.32935/0023-1169-2021-625-3-49-52>.
2. Головин М. С., Кудрявцева О. В. Государственная политика по развитию отрасли транспортного биотоплива в Европейском Союзе // *Государственное управление. Электронный вестник*. 2020. N 78. С. 72–90. <https://doi.org/10.24411/2070-1381-2020-10034>.
3. Рагимов Э. А. Влияние альтернативных топлив на окружающую среду // *Транспорт на альтернативном топливе*. 2020. N 2. С. 64–70.
4. Медведева Н. Д. Перспективы развития производства биотоплива: мировой опыт // *Экономика, труд, управление в сельском хозяйстве*. 2019. N 3. С. 45–53.
5. Рюль К. ВР: Прогноз развития мировой энергетики до 2030 года // *Вопросы экономики*. 2013. N 5. С. 109–128.
6. Гончаров С. В., Карпачев В. В. Перспективы развития биодизеля в России // *Масличные культуры*. 2021. N 3. С. 71–77. <https://doi.org/10.25230/2412-608X-2021-3-187-71-77>.
7. Боровицкая П. С., Варламова Е. С. Проблемы и перспективы развития российского рынка биотоплива // *Экономические исследования и разработки. Научно-исследовательский журнал*. 2021. N 2. С. 63–76.
8. Марков В. А., Девянин С. Н., Семенов В. Г., Шахов А. В., Багров В. В. Использование растительных масел и топлив на их основе в дизельных двигателях. М.: Инженер, 2011. 536 с.
9. Кучкина А. Ю., Сущик Н. Н. Источники сырья, методы и перспективы получения биодизельного топлива // *Журнал Сибирского федерального университета. Биология*. 2014. N 1. С. 14–42.
10. Власкин М. С., Чернова Н. И., Киселева С. В., Попель О. С., Жук А. З. Гидротермальное сжижение микроводорослей для получения биотоплив: современное состояние и перспективы развития // *Теплоэнергетика*. 2017. N 9. С. 5–16. <https://doi.org/10.1134/S0040363617090107>.
11. Бусин И. В., Ликсутина А. П., Корнев А. Ю. Биотопливо из отходов животноводства // *Сельский механизатор*. 2021. N 7. С. 29–31. <https://doi.org/10.47336/0131-7393-2021-7-29-30-31>.
12. Викаш Бабу П. Д., Ашиш Таплиял П. Д., Гириеш Кумар Пател П. Д. Возобновляемая энергия: Производство биотоплива / пер. с англ. Беверли, МА: Scrivener Publishing LLC, 2014. 250 с.
13. Белозерцева Н. Е., Богданов И. А., Бальжанова А. Т., Торчакова О. М., Соснина Д. В., Белинская Н. С. [и др.]. Использование биодизеля в качестве смешанного компонента товарных дизельных топлив // *Химия в интересах устойчивого развития*. 2020. Т. 28. N 2. С. 131–140. <https://doi.org/10.15372/KhUR2020211>.
14. Чернова Н. И., Киселева С. В., Попель О. С. Эффективность производства биодизеля из микроводорослей // *Теплоэнергетика*. 2014. N 6. С. 14–21. <https://doi.org/10.1134/S0040363614060010>.
15. Снопе М., Маки-Арвела П., Симакова И. Л., Миллюйа 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.
16. Obed M. A., Mamat R., Abdullah N. R., Abdullah A. A. Analysis of blended fuel properties and engine performance with palm biodiesel–diesel blended fuel // *Renewable Energy*. 2016. Vol. 86. P. 59–67. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.07.103>.
17. Tanzer E., Yesilyurt M. K. Influence of blending ratio on the physicochemical properties of safflower oil methyl ester–safflower oil, safflower oil methyl ester–diesel and safflower oil–diesel // *Renewable Energy*. 2016. Vol. 95. P. 233–247. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.04.009>.
18. Foroutan R., Esmaeili H., Mousavi S. M., Hashemic S. A., Yeganeha G. The physical properties of biodiesel–diesel fuel produced via transesterification process from different oil sources // *Physical Chemistry Research*. 2019. Vol. 7, no. 2. P. 415–424. <https://doi.org/10.22036/pcr.2019.173224.1600>.
19. 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. Т. 10. N 1. С. 114–123. <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2020-10-1-114-123>.
20. Белозерцева Н. Е., Соснина Д. В., Бальжанова А. Т., Богданов И. А., Киргина М. В. Исследование влияния параметров синтеза биодизельного топлива реакцией переэтерификации на выход и ключевые характеристики продукта // *Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета)*. 2021. N 56. С. 23–29.

REFERENCES

1. Zaharova E. A., Lihacheva N. A. Environmental performance evaluation of oil refineries. *Khimiya i tekhnologiya topliv i masel = Chemistry and Technology of Fuels and Oils*. 2021;57(3):482-486. (In Russian). <https://doi.org/10.32935/0023-1169-2021-625-3-49-52>.
2. Golovin M. S., Kydryavtseva O. V. State policy for transport biofuel industry development in the European Union. *Gosudarstvennoe upravlenie. Elektronnyi vestnik = Public Administration. E-journal*. 2020;(78):72-90. (In Russian). <https://doi.org/10.24411/2070-1381-2020-10034>.

3. Rahimov E. A. Effect of alternative fuels on the environment. *Transport na alternativnom toplive = Alternative Fuel Transport*. 2020;(2):64-70. (In Russian).
4. Medvedeva N. D. Prospects for the development of biofuel production: world experience. *Ekonomika, trud, upravlenie v sel'skom khozyaistve = Economy, Labor, Management in Agriculture*. 2019;(3):45-53. (In Russian).
5. Rühl Ch. BP global energy outlook 2030. *Vo-prosy Ekonomiki*. 2013;(5):109-128. (In Russian).
6. Goncharov S. V., Karpachev V. V. Perspectives of development of biodiesel in Russia. *Maslichnye kul'tury*. 2021;(3):71-77. (In Russian). <https://doi.org/10.25230/2412-608X-2021-3-187-71-77>.
7. Borovitskaya P. S., Varlamova E. S. Problems and prospects for the development of the Russian biofuel market. *Ekonomicheskie issledovaniya i razrabotki. Nauchno-issledovatel'skii zhurnal = Economic Development. Research Journal*. 2021;(2):63-76. (In Russian).
8. Markov V. A., Devyanin S. N., Semenov V. G., Shakhov A. V., Bagrov V. V. *The use of vegetable oils and fuels based on them in diesel engines*. Moscow: Inzhener; 2011. 536 p. (In Russian).
9. Kuchkina A. Yu., Sushchika N. N. Feedstocks, methods and perspectives of biodiesel production. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Biologiya = Journal of Siberian Federal University. Biology*. 2014;(1):14-42. (In Russian).
10. Vlaskin M. S., Popel' O. S., Zhuk A. Z., Chernova N. I., Kiseleva S. V. Hydrothermal liquefaction of microalgae to produce biofuels: state of the art and future prospects. *Teploenergetika = Thermal Engineering*. 2017;(9):5-16. (In Russian). <https://doi.org/10.1134/S0040363617090107>.
11. Busin I. V., Liksutina A. P., Kornev A. Yu. Biofuels from animal waste. *Sel'skii mekhanizator*. 2021;(7):29-31. (In Russian). <https://doi.org/10.47336/0131-7393-2021-7-29-30-31>.
12. Vikash B., Ashish T., Girijesh Kumar Patel P. D. Biofuels production; 2013. 392 p. (Russ. ed.: Vikash Babu P. D., Ashish Tapliyal P. D., Girish Kumar Patel' P. D. *Vozobnovlyaemaya energiya: Proizvodstvo biotopliva*. Beverli, MA: Scrivener Publishing LLC; 2014. 250 p.).
13. Belozertseva N. E., Bogdanov I. A., Balzhanova A. T., Torchakova O. M., Sosnina D. V., Belinskaya N. S., et al. The use of biodiesel as a blend component of commercial diesel fuels. *Khimiya v interesakh ustoichivogo razvitiya = Chemistry for Sustainable Development*. 2020;28(2):131-140. (In Russian). <https://doi.org/10.15372/KhUR2020211>.
14. Chernova N. I., Kiseleva S. V., Popel' O. S. Efficiency of the biodiesel production from microalgae. *Teploenergetika = Thermal Engineering*. 2014;(6):14-21. (In Russian). <https://doi.org/10.1134/S0040363614060010>.
15. Snore M., Maki-Arvela P., Simakova I. L., Millyuoia Yu., Murzin D. Yu. Overview of catalytic methods for the production of biodiesel from natural oils and fats. *Sverkhkriticheskie flyuidy: teoriya i praktika = Supercritical Fluids: Theory and Practice*. 2009;4(1):3-17. (In Russian).
16. Obed M. A., Mamat R., Abdullah N. R., Abdullah A. A. Analysis of blended fuel properties and engine performance with palm biodiesel–diesel blended fuel. *Renewable Energy*. 2016;86:59-67. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.07.103>.
17. Tanzer E., Yesilyurt M. K. Influence of blending ratio on the physicochemical properties of safflower oil methyl ester-safflower oil, safflower oil methyl ester-diesel and safflower oil-diesel. *Renewable Energy*. 2016;95:233-247. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.04.009>.
18. Foroutan R., Esmaeili H., Mousavi S. M., Hashemic S. A., Yeganeha G. The physical properties of biodiesel-diesel fuel produced via transesterification process from different oil sources. *Physical Chemistry Research*. 2019;7(2):415-424. <https://doi.org/10.22036/pcr.2019.173224.1600>.
19. Belozertseva N. E., Bogdanov I. A., Altynov A. A., Balzhanova A. T., Belinskaya N. S., Kirgina M. V. 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>.
20. Belozertseva N. E., Sosnina D. V., Balzhanova A. T., Bogdanov I. A., Kirgina M. V. Parameters influence investigation of the biodiesel fuel synthesis by the transesterification reaction on the product yield and key characteristics. *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo instituta (tekhnicheskogo universiteta) = Bulletin of the Saint Petersburg State Institute of Technology (Technical University)*. 2021;56:23-29. (In Russian).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Н. Е. Белозерцева,
аспирант,
Национальный исследовательский
Томский политехнический университет,
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30,
Российская Федерация,
belozertsevanatasha@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-8589-4565>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Natalia E. Belozertseva,
Postgraduate Student,
National Research Tomsk Polytechnic
University,
634050, Tomsk, Lenin Ave., 30,
Russian Federation,
belozertsevanatasha@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-8589-4565>

О. М. Торчакова,
Национальный исследовательский
Томский политехнический университет,
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30,
Российская Федерация,
omt2@tpu.ru
<https://orcid.org/0000-0002-4384-5092>

И. А. Богданов,
аспирант, инженер-исследователь,
Национальный исследовательский
Томский политехнический университет,
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30,
Российская Федерация,
bogdanov_ilya@tpu.ru
<https://orcid.org/0000-0002-2327-5395>

М. В. Киргина,
к.т.н., доцент,
Национальный исследовательский
Томский политехнический университет,
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30,
Российская Федерация,
mkirgina@tpu.ru
<https://orcid.org/0000-0001-7407-8845>

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад
в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта
интересов.

*Все авторы прочитали и одобрили
окончательный вариант рукописи.*

Информация о статье

*Поступила в редакцию 02.10.2021.
Одобрена после рецензирования 15.02.2022.
Принята к публикации 28.02.2022.*

Olga M. Torchakova,
National Research Tomsk Polytechnic
University,
634050, Tomsk, Lenin Ave., 30,
Russian Federation,
omt2@tpu.ru
<https://orcid.org/0000-0002-4384-5092>

Ilya A. Bogdanov,
Postgraduate Student, Researcher,
National Research Tomsk Polytechnic
University,
634050, Tomsk, Lenin Ave., 30,
Russian Federation,
bogdanov_ilya@tpu.ru
<https://orcid.org/0000-0002-2327-5395>

Maria V. Kirgina,
Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor,
National Research Tomsk Polytechnic
University,
634050, Tomsk, Lenin Ave., 30,
Russian Federation,
mkirgina@tpu.ru
<https://orcid.org/0000-0001-7407-8845>

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Conflict 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.*

Information about the article

*The article was submitted 02.10.2021.
Approved after reviewing 15.02.2022.
Accepted for publication 28.02.2022.*