

Научная статья  
УДК 662.754  
EDN: WVBFJ  
DOI: 10.21285/achb.906



## Получение углеводородов топливного ряда из возобновляемого сырья

Д.В. Соснина, А.А. Алтынов, Ю.С. Кокорина,  
М.В. Киргина, И.А. Богданов✉

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

**Аннотация.** Одним из активно развивающихся перспективных направлений в области производства компонентов моторных топлив из возобновляемого сырья является переработка растительных масел в различного рода каталитических процессах. Объектом исследования в данной работе являлось рапсовое масло и продукт его переработки на катализаторе гидроочистки. Выбор рапсового масла в качестве сырья для переработки обусловлен как тем, что на территории Российской Федерации большое количество посевных площадей занимает именно рапс (ввиду своей климатической неприхотливости), так и тем, что рапсовое масло не нашло широкого применения в пищевой промышленности и производится в основном для экспорта. Авторами исследован процесс каталитической переработки рапсового масла на катализаторе гидроочистки. Переработка осуществлялась на лабораторной каталитической установке при температуре 375 °С, давлении 7 МПа, объемной скорости подачи сырья 1 ч<sup>-1</sup>, расход водорода составил 2×10<sup>-4</sup> м<sup>3</sup>/ч. Для сырья и продукта каталитической переработки были определены физико-химические и низкотемпературные свойства. Также для полученного продукта каталитической переработки был определен компонентный состав. Рассмотрены основные направления химических превращений компонентов рапсового масла в углеводороды на катализаторе гидроочистки. Установлено, что из рапсового масла возможно получать углеводороды топливного ряда, в частности n-алканы, изо-алканы и алкены, которые являются перспективным сырьем для получения компонентов моторных топлив.

**Ключевые слова:** рапсовое масло, каталитическая переработка, катализатор гидроочистки, углеводороды, компоненты моторных топлив

**Финансирование.** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-23-00101, <https://rscf.ru/project/23-23-00101/>.

**Для цитирования:** Соснина Д.В., Алтынов А.А., Кокорина Ю.С., Киргина М.В., Богданов И.А. Получение углеводородов топливного ряда из возобновляемого сырья // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2024. Т. 14. N 1. С. 121–128. DOI: 10.21285/achb.906. EDN: WVBFJ.

### CHEMICAL TECHNOLOGY

Original article

## Production of fuel-grade hydrocarbons from renewable raw materials

Daria V. Sosnina, Andrey A. Altynov, Yulia S. Kokorina,  
Maria V. Kirgina, Ilya A. Bogdanov✉

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

**Abstract.** One of the actively developing areas in the current production of motor fuel components from renewable raw materials consists in the processing of vegetable oils using various catalytic processes. The object of research in this paper was rapeseed oil and the products of its processing on a hydrotreating catalyst. The choice of rapeseed oil as a raw material for processing is due to the large acreage it occupies on the territory of the Russian Federation as a result of its tolerance to harsh climates, as well as the fact that it is not widely used in the domestic food industry, currently being produced mainly for export. The authors investigated a process of catalytic processing of rapeseed oil

using a hydrotreating catalyst. The processing was carried out in a laboratory catalytic unit at a temperature of 375 °C, a pressure of 7 MPa, and a volume feed rate of 1 h<sup>-1</sup>; the hydrogen consumption was 2×10<sup>-4</sup> m<sup>3</sup>/h. Physicochemical and low-temperature properties were determined for the feedstock and catalytic processing product. In addition, the component composition was determined for the resulting catalytic reprocessing product. The main directions of chemical transformations of rapeseed oil components into hydrocarbons on a hydrotreating catalyst are considered. The possibility of using rapeseed oil as a feedstock for producing fuel hydrocarbons – in particular n-alkanes, iso-alkanes and alkenes, which are promising raw materials for the production of motor fuel components – is substantiated.

**Keywords:** rapeseed oil, catalytic processing, hydrotreating catalyst, hydrocarbons, motor fuel components

**Funding.** The Russian Science Foundation supported the research (grant no. 23-23-00101, <https://rscf.ru/project/23-23-00101/>).

**For citation:** Sosnina D.V., Altynov A.A., Kokorina Yu.S., Kirgina M.V., Bogdanov I.A. Production of fuel-grade hydrocarbons from renewable raw materials. *Izvestiya Vuzov. Prikladnaya Khimiya i Biotekhnologiya = Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2024;14(1):121-128. (In Russian). DOI: 10.21285/achb.906. EDN: WVBXFJ.

## ВВЕДЕНИЕ

Одной из глобальных проблем современности, которая может привести к экологической катастрофе, является перенаселение планеты. В свою очередь, перенаселение планеты влечет за собой значительный рост спроса на природные полезные ископаемые, в частности невозобновляемые, следствием чего является истощение их запасов.

Начиная с конца XX века мировая экономика активно развивается по пути так называемой зеленой экономики. В основе данного экономического направления лежит необходимость рационального использования невозобновляемых природных ресурсов [1, 2].

Сократить потребление невозобновляемых полезных ископаемых возможно за счет активного использования возобновляемых природных ресурсов [3, 4]. Предполагается, что замена нефтяного топлива альтернативным позволит значительно снизить затраты на добычу и переработку трудноизвлекаемых запасов нефти, сохранить их, а также снизить выбросы вредных веществ в атмосферу [5, 6].

Одним из перспективных направлений, которое активно развивается в настоящее время, является каталитическая переработка смесей нефтяного и растительного сырья [7–9].

В работе [7] представлены результаты совместной переработки растительного масла и вакуумного газойля и показано, что вовлечение до 5% масс. масла позволяет увеличить конверсию сырья, а также выход бензиновой фракции.

В работе [8] в результате совместной переработки прямогонной дизельной фракции и 10% об. подсолнечного масла были получены продукты, удовлетворяющие требованиям для арктического дизельного топлива.

Авторы работы [9] исследовали возможность получения бензиновой фракции в результате переработки вакуумного газойля и хлопкового масла. Максимальная доля масла, которую удалось вовлечь в переработку без значительного ухудшения свойств целевого продукта, составила 5% об.

Как можно видеть, совместная переработка нефтяного и растительного сырья позволяет вовлекать лишь небольшую долю возобновляемых источников

энергии. Это обуславливает необходимость проведения исследований, в основе которых лежит возможность получения топливных углеводородов в результате каталитической переработки чистого (100%) растительного сырья<sup>1</sup> [10–13].

В работе [10] был исследован процесс совместной переработки биомассы и отработанного растительного масла на различных цеолитных катализаторах и показано, что максимальный выход углеводородов C<sub>8</sub>-C<sub>14</sub> составил 87,28%.

Авторы работы [11] исследовали возможность получения биотоплива из масла кизила на цеолитных катализаторах. Результаты показали, что состав полученного в ходе переработки биотоплива в основном был представлен углеводородами с небольшим содержанием кислот, спиртов, сложных эфиров и кетонов, а наибольший суммарный выход углеводородов составил 89,07%.

В работах [12, 13] отражены результаты каталитической переработки пищевого подсолнечного масла. Максимальный выход продукта в работе [12] составил 30,1%, состав продукта представлен углеводородами ряда C<sub>7</sub>-C<sub>43</sub> и оксигенатами. В работе [13] каталитическая переработка подсолнечного масла позволила получить продукт, в составе которого н-октадекан занимает 65% масс., остальное приходится на смесь алкенов и изоалканов C<sub>18</sub> (18% масс.).

Е.А. Исаевой<sup>1</sup> в результате переработки рапсового масла на цеолитном катализаторе удалось получить продукт, доля углеводородов в котором составила 64% масс., из них 43% масс. приходится на ароматические углеводороды.

Ввиду вышесказанного целью проведенного исследования являлось получение из возобновляемого сырья на классическом катализаторе гидроочистки идентичных нефтяным углеводородам, которые могут быть использованы в качестве сырья процессов нефтепереработки для производства товарных моторных топлив и их компонентов. Объектом исследования служило рапсовое масло и продукт его переработки на катализаторе гидроочистки. Предметом исследования – состав и свойства сырья и продукта переработки, а также закономерности превращения веществ, входящих в

<sup>1</sup>Исаева Е.А. Получение углеводородов из возобновляемого сырья – триглицеридов жирных кислот – на цеолитных катализаторах типа MFI: дис. ... канд. тех. наук: 02.00.13. М., 2017. 133 с.

состав рапсового масла в процессе переработки на катализаторе гидроочистки. Выбор сырья каталитической переработки – рапсового масла – обусловлен несколькими факторами. Во-первых, на территории Российской Федерации большое количество посевных площадей занимает именно рапс (ввиду своей климатической неприхотливости), что определяет возможность его переработки и получения больших объемов рапсового масла. Во-вторых, рапсовое масло не нашло широкого применения в пищевой промышленности и производится исключительно для экспорта.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Переработка рапсового масла была осуществлена на каталитической установке CATACON с реактором проточного типа при температуре 375 °С, давлении 7 МПа, объемной скорости подачи сырья 1 ч<sup>-1</sup>, расход водорода составил 2×10<sup>-4</sup> м<sup>3</sup>/ч.

В качестве катализатора процесса был использован комплексный катализатор гидроочистки (табл. 1).

**Таблица 1.** Характеристики катализатора гидроочистки

**Table 1.** Hydrotreating catalyst characteristics

Характеристика	Значение
Номинальный размер частиц, мм	1,2×1,4
Состав	Со/Мо на активной окиси Al
Стехиометрическое количество серы, % масс.	11,0
Форма	Четырехлистник
Насыпная плотность, кг/м <sup>3</sup>	37,0
Средняя длина, мм	1,2
Механическая прочность при раздавливании, фунт/мм	4,0
Потери на истирание, % масс.	2,0

Для полученного продукта переработки рапсового масла на катализаторе гидроочистки были определены состав и базовые свойства, такие как:

- кинематическая и динамическая вязкость, а также плотность при температуре 40 °С (определение проводилось на вискозиметре Штабингера в соответствии с методикой, представленной в ГОСТ 33-2016<sup>2</sup> и ISO 12185:1996<sup>3</sup>);

- молекулярная масса (определение проводилось автоматическим приборе КРИОН-1 в соответствии с методикой, представленной в руководстве по эксплуатации ТКЛШ 2.998.042 РЭ<sup>4</sup>);

- температура застывания (метод А) и температура помутнения (метод Б) (определение осуществлялось с использованием жидкостного низкотемпературного

криостата в соответствии с методикой, представленной в ГОСТ 5066-2018<sup>5</sup>);

- компонентный состав (определение проводилось методом газовой хромато-масс-спектрометрии на приборе «Хроматэк Кристалл 5000.2» с колонкой НР-1-MS (30 м; 0,25 мм; 0,25 мкм)).

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для сырья (рапсового масла) и продукта его переработки на катализаторе гидроочистки в соответствии с представленными в вышеуказанных документах методами исследования были определены физико-химические и низкотемпературные свойства (табл. 2).

**Таблица 2.** Физико-химические свойства рапсового масла и продукта его каталитической переработки

**Table 2.** Physico-chemical parameters of feedstock and products of rapeseed oil catalytic processing

Свойство	Сырье	Продукт
Кинематическая вязкость при 40 °С, мм <sup>2</sup> /с	32,95	13,77
Динамическая вязкость при 40 °С, мПа·с	29,78	11,72
Плотность при 40 °С, кг/м <sup>3</sup>	904,0	851,4
Молекулярная масса, г/моль	743,9	333,0
Содержание серы, мг/кг	0	0
Температура помутнения, °С	-2	24
Температура застывания, °С	-15	0

Полученные данные показывают, что в результате переработки наблюдается снижение кинематической (на 58,2%) и динамической (на 60,6%) вязкости и молекулярной массы (на 55,2%), а также плотности продукта по сравнению с сырьем (на 5,8%). Кроме того, отсутствие серы в составе рапсового масла позволяет получать экологически чистый продукт, в котором сера также отсутствует.

Что касается результатов определения низкотемпературных свойств, можно видеть, что при переработке рапсового масла на катализаторе гидроочистки низкотемпературные свойства продукта ухудшаются, что обусловлено образованием длинноцепочечных н-алканов из жирных кислот рапсового масла, которые мутнеют и застывают при положительных температурах.

Наличие в продукте переработки рапсового масла углеводородов, в частности н-алканов, наглядно отражает результаты определения компонентного состава полученного продукта методом газовой хромато-масс-спектрометрии (табл. 3).

<sup>2</sup>ГОСТ 33-2016. Нефть и нефтепродукты. Прозрачные и непрозрачные жидкости. Определение кинематической и динамической вязкости. Введ. 01.07.2018. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200145229> (дата обращения: 15.09.2023).

<sup>3</sup>ISO 12185:1996. Crude petroleum and petroleum products. Determination of density. Oscillating U-tube method. Режим доступа: <https://www.standards.ru/document/3630660.aspx> (дата обращения: 15.09.2023).

<sup>4</sup>Руководство по эксплуатации ТКЛШ 2.998.042 РЭ. Рекомендации по измерению молекулярной массы нефти методом криоскопии в бензоле на установке КРИОН-1. Режим доступа: <https://cdn.termexlab.ru/files/c9a56e94/50bd/4281/8d68/b35f5373ac09.pdf> (дата обращения: 15.09.2023).

<sup>5</sup>ГОСТ 5066-2018. Топлива моторные. Методы определения температур помутнения, начала кристаллизации и замерзания. Введ. 01.07.2019. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200160608> (дата обращения: 15.09.2023).

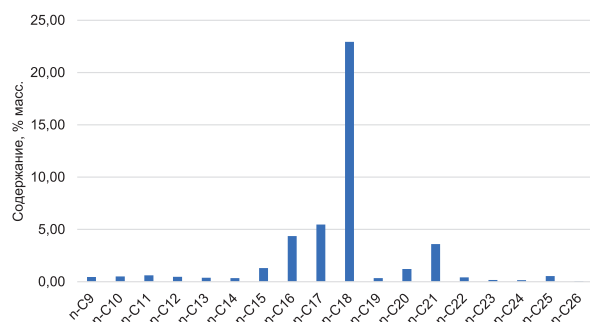
**Таблица 3.** Компонентный состав продукта каталитической переработки

**Table 3.** Component composition of the catalytic processing product

Группа углеводородов	Содержание, % масс.
Н-алканы	43,33
Изоалканы	3,18
Алкены	5,38
Органические кислоты	32,37

Как можно видеть, большая доля в составе продукта переработки приходится на н-алканы, а также непрореагировавшие и частично прореагировавшие жирные кислоты, которые входят в состав рапсового масла. Кроме того, в продукте обнаружено небольшое содержание изоалканов и алкенов.

Более подробный состав, который демонстрирует длину цепи н-алканов, входящих в состав продукта каталитической переработки, представлен на рис. 1.



**Рис. 1.** Парафиновый профиль продукта каталитической переработки

**Fig. 1.** Paraffin profile of catalytic processing product

Из результатов, представленных на рис. 1, можно видеть, что н-алканы представлены преимущественно молекулами с длиной цепи  $C_9$ - $C_{26}$ . Причем наибольшая доля приходится на н-алканы с длиной цепи  $C_{18}$  (22,94% масс.), что обусловлено составом рапсового масла (в составе рапсового масла преобладают олеиновая, линолевая и линоленовая кислоты) с количеством атомов углерода в цепи 18 [14, 15].

Полученные результаты определения компонентного состава находят свое объяснение в реакциях, которым подвергаются жирные кислоты на катализаторах гидроочистки (рис. 2).

Так, согласно работам [16, 17], жирные кислоты, входящие в состав растительных масел, в том числе и рапсового масла, в процессе гидроочистки в первую

очередь гидрируются, а затем подвергаются реакциям термического разложения с образованием преимущественно одноосновных жирных кислот. Образовавшиеся одноосновные кислоты, в свою очередь, подвергаются реакциям декарбонизации, декарбоксилирования и гидродеоксигенации, в результате чего образуются длинноцепочечные н-алканы. Длинноцепочечные н-алканы вступают в реакции крекинга, в результате которых образуются н-алканы с меньшей длиной углеводородной цепи (см. рис. 1, 2). Кроме того, в составе полученного продукта также наблюдается наличие неидентифицированных соединений в количестве 15,74% масс.

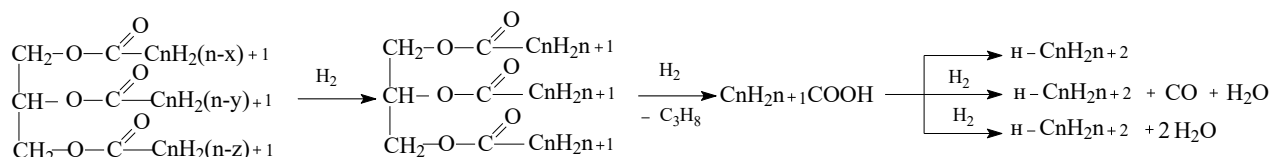
Выход целевого продукта в результате каталитической переработки рапсового масла составил 98,2% об.

Ранее авторами были представлены результаты исследования синтеза биодизельного топлива из рапсового масла в процессе переэтерификации в присутствии щелочного катализатора [18], а также совместной переработки прямогонной дизельной фракции и рапсового масла на цеолитном катализаторе [19, 20].

Было установлено, что выход целевого продукта в процессе синтеза биодизельного топлива составляет порядка 45–60% об., а выход целевого жидкого продукта процесса совместной переработки прямогонной дизельной фракции и рапсового масла – порядка 70–90% об. Также было установлено, что выход целевого продукта при переработке смесей прямогонной дизельной фракции и рапсового масла на цеолитном катализаторе снижался при увеличении доли масла, вовлекаемого в переработку.

Кроме того, результаты определения свойств биодизельного топлива, полученного из рапсового масла, показали, что продукт реакции переэтерификации не пригоден для применения в чистом виде в климатических условиях Российской Федерации, особенно в зимний период, поскольку обладает неудовлетворительными физико-химическими и низкотемпературными свойствами. Биодизельное топливо возможно использовать в качестве смесового компонента товарных дизельных топлив. При этом оптимальная доля биодизельного топлива в смесях с дизельным топливом составляет 5–20% об. При этом важно отметить, что биодизельное топливо, как и продукт переработки рапсового масла на катализаторе гидроочистки, не содержит в своем составе серы и серосодержащих соединений и позволяет улучшить экологические свойства товарных топлив.

Переработка смесей прямогонной дизельной фракции и рапсового масла на цеолитном катализаторе позволяет получать продукты, соответствующие по своим свойствам требованиям для зимней и арктической марки дизельных топлив. Кроме того, вовлечение рапсового масла в переработку приводит к снижению массовой доли серы в продукте. Тем не менее совместная перера-



**Рис. 2.** Типовые реакции превращения жирных кислот в присутствии водорода

**Fig. 2.** Typical reactions for the fatty acids transformation in the presence of hydrogen



ботка на цеолитном катализаторе позволяет вовлекать лишь 10–20% об. рапсового масла без значительного снижения выхода целевых продуктов и ухудшения их свойств.

Таким образом, можно резюмировать, что из представленных технологий переработки рапсового масла с целью получения топливных компонентов наиболее перспективной является именно переработка масла на катализаторе гидроочистки. Данная технология обеспечивает наибольший выход целевого экологически чистого продукта при переработке рапсового масла.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе исследования была реализована переработка рапсового масла на классическом катализаторе гидроочистки при температуре 375 °С, давлении 7 МПа, объемной скорости подачи сырья 1 ч<sup>-1</sup> и расходе водорода 2×10<sup>-4</sup> м<sup>3</sup>/ч.

Показано, что переработка рапсового масла на катализаторе гидроочистки позволяет получать угле-

водороды топливного ряда. Наибольшая доля в составе продукта переработки при этом приходится на н-алканы C<sub>9</sub>-C<sub>26</sub>. Также можно видеть, что в составе продукта существенная доля приходится на непрореагировавшие органические кислоты, что обуславливает необходимость подбора оптимальных параметров процесса с целью повышения конверсии сырья и выхода целевых продуктов процесса – углеводородов топливного ряда.

Помимо этого, определены свойства сырья и продукта каталитической переработки. Показано, что при каталитической переработке рапсового масла на катализаторе гидроочистки наблюдается значительное снижение вязкости, плотности, молекулярной массы и плотности, а также ухудшение низкотемпературных свойств продукта по сравнению с сырьем.

Установлено, что ухудшение низкотемпературных свойств продукта обусловлено образованием длинноцепочечных н-алканов из жирных кислот рапсового масла, которые мутнеют и застывают при положительных температурах.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Вертакова Ю.В. Альтернативная энергетика. Развитие зеленой экономики в энергетике // Энергетическая безопасность: сб. науч. статей II Междунар. молодеж. конгр. (г. Курск, 28–29 ноября 2017 г.). Курск: Университетская книга, 2017. С. 24–26. EDN: YUZCFN.
2. Шпарова С.С. «Зеленая» экономика – процесс перехода мировых экономик к развитию социально-экономических зеленых ресурсов // Мировая экономика: проблемы безопасности. 2021. N 2. С. 81–84. EDN: MXXNLM.
3. Беренблум А.С., Подошколова Т.А., Шамсиев Р.С., Кацман Е.А., Данюшевский В.Я., Флид В.Р. Каталитическая химия получения углеводородных топлив из растительных масел и жиров // Катализ в промышленности. 2012. N 3. С. 84–91. EDN: NOLWUH.
4. Андреев О.С. Возобновляемые источники энергии и проблемы развития нетрадиционных источников энергии // Конкурентоспособность в глобальном мире: экономика, наука, технологии. 2023. N 2. С. 200–203. EDN: GUWSHK.
5. Бекулова С.Р. Возобновляемые источники энергии в условиях новой промышленной революции: мировой и отечественный опыт // Мир новой экономики. 2019. T. 13. N 4. С. 14–21. DOI: 10.26794/2220-6469-2019-13-4-14-21. EDN: OOMEKA.
6. Роков А.И., Иохимович Е.Д. Экономические аспекты разработки возобновляемых источников энергии // Стратегии бизнеса. 2020. T. 8. N. 2. С. 55–59. DOI: 10.17747/2311-7184-2020-2-55-59. EDN: FLOHOB.
7. Липин П.В., Потапенко О.В., Сорокина Т.П., Доронин В.П. Закономерности совместных превращений вакуумных газойлей с растительными маслами на бицеолитных катализаторах крекинга // Нефтехимия. 2019. T. 59. N 4. С. 367–377. DOI: 10.1134/S0028242119040099. EDN: GWTKMU.
8. Sosnina D.V., Belozertzeva N.E., Altynov A.A., Bogdanov I.A., Kirgina M.V. Investigation of co-processing of the straight-run diesel fraction and sunflower oil over a zeolite catalyst of ZSM-5 type // Chemistry for Sustainable Development. 2022. Vol. 30, no. 4. P. 408–414. DOI: 10.15372/CSD2022398. EDN: JKGKHV.
9. Мамедова Т.А., Андрищенко Н.К., Лятифова Т.С., Аскерова Э.Н., Теюбов Х.Ш., Кесемени Х.Г. Получение бензинов каталитического крекинга переработкой смеси нефтяного и растительного сырья // Нефтепереработка и нефтехимия. Научно-технические достижения и передовой опыт. 2012. N 11. С. 15–18. EDN: PWLDXF.
10. Dada T.K., Vuppaladiyam A., Duan A.X., Kumar R., Antunes E. Probing the effect of Cu-SrO loading on catalyst supports (ZSM-5, Y-zeolite, activated carbon, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, and ZrO<sub>2</sub>) for aromatics production during catalytic co-pyrolysis of biomass and waste cooking oil // Bioresource Technology. 2022. Vol. 360. P. 127515. DOI: 10.1016/j.biortech.2022.127515.
11. Li C., Ma J., Xiao Z., Stanton H., Liu R., Zuo S., et al. Catalytic cracking of Swida wilsoniana oil for hydrocarbon biofuel over Cu-modified ZSM-5 zeolite // Fuel. 2018. Vol. 218. P. 59–66. DOI: 10.1016/j.fuel.2018.01.026.
12. Zhao X., Wei L., Julson J., Qiao Q., Dubey A., Anderson G. Catalytic cracking of non-edible sunflower oil over ZSM-5 for hydrocarbon bio-jet fuel // New Biotechnology. 2015. Vol. 32, no. 2. P. 300–312. DOI: 10.1016/j.nbt.2015.01.004.
13. Smirnov A., Wang W., Kikhtyanin O., Xiao L., Wu W., Kubička D. Hydroconversion of sunflower oil to fatty alcohols and hydrocarbons using CuZn and CuZn-HBEA-based catalysts // Catalysis Today. 2023. Vol. 424. P. 113841. DOI: 10.1016/j.cattod.2022.07.009.
14. Остриков А.Н., Горбатова А.В., Копылов М.В., Аникин А.А. Показатели качества рапсового масла холодного отжима // Пищевая промышленность. 2017. N 9. С. 52–55. EDN: ZGWTAR.
15. Остриков А.Н., Горбатова А.В., Аникин А.А., Копылов М.В. Анализ жирнокислотного состава рапсового масла // Масложировая промышленность. 2016. N 6. С. 18–21. EDN: XFWDBP.
16. Katikaneni S.P.R., Adjaye J.D., Idem R.O., Bakhshi N.N. Catalytic conversion of canola oil over potassium-impregnated HZSM-5 catalysts: C<sub>2</sub>-C<sub>4</sub> olefin production and model reaction studies // Industrial & Engineering Chemistry Research. 1996. Vol. 35, no. 10. P. 3332–3346. DOI: 10.1021/ie950740u.
17. Li Z., Wang W., Liu X., Qi S., Lan D., Wang Y. Effect of different degumming on the retention of bioactive com-

ponents, acylglycerol and phospholipid composition of rapeseed oil // *Process Biochemistry*. 2023. Vol. 133. P. 190–199. DOI: 10.1016/j.procbio.2023.08.019.

**18.** Белозерцева Н.Е., Торчакова О.М., Богданов И.А., Киргина М.В. Исследование целесообразности использования биодизельных топлив в качестве смешанного компонента товарных дизельных топлив // *Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология*. 2022. Т. 12. N 1. С. 130–140. DOI: 10.21285/2227-2925-2022-12-1-130-140. EDN: WJTELR.

**19.** Соснина Д.В., Богданов И.А., Алтынов А.А. Получение компонентов моторных топлив переработкой смеси дизельная фракция/рапсовое масло на цеолите // *Химия*

и химическая технология в XXI веке: материалы XXIV Междунар. науч.-практ. Конф. студентов и молодых ученых им. выдающихся химиков Л.П. Кулёва и Н.М. Кижнера, посвящ. 85-летию со дня рождения проф. А.В. Кравцова. (г. Томск, 15–19 мая 2023 г.). Томск: Изд-во ТПУ, 2023. Т. 2. С. 118–119. EDN: MSZBSS.

**20.** Соснина Д.В., Алтынов А.А., Киргина М.В., Богданов И.А. Получение компонентов моторных топлив каталитической переработкой смесей прямогонной дизельной фракции и рапсового масла // *Ползуновский вестник*. 2023. N. 4. С. 237–243. DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2023.04.030. EDN: NJFSDQ.

## REFERENCES

**1.** Vertakova Yu.V. Alternative energy. Development of a green economy in the energy sector. In: *Energeticheskaya bezopasnost': sb. nauch. statei II Mezhdunar. molodezh. kongr. = Energy security: Proc. of the 2<sup>nd</sup> International Youth Congress*. 28–29 November 2017, Kursk. Kursk: Universitetskaya kniga; 2017, p. 24–26. (In Russian). EDN: YUZCFN.

**2.** Sharova S.S. The “green” economy is the process of transition of world economies to the development of socio-economic green resources the “green” economy is the process of transition of world economies to the development of socio-economic green resources. *Mirovaya ekonomika: problemy bezopasnosti = World Economy: Security Problems*. 2021;2:81–84. (In Russian). EDN: MXXNLM.

**3.** Berenblyum A.S., Podoplelova T.A., Shamsiev R.S., Katsman E.A., Danyushevsky V.Ya., Flid V.R. Catalytic chemistry of preparation of hydrocarbon fuels from vegetable oils and fats. *Kataliz v promyshlennosti = Catalysis in Industry*. 2012;3:84–91. (In Russian). EDN: NOLWUH.

**4.** Andreev O.S. Erneuerbare energiequellen und probleme der entwicklung von nicht-konventionellen energiequellen. *Konkurentospoonsnost' v global'nom mire: ekonomika, nauka, tekhnologii = Competitiveness in the global world: economics, science, technology*. 2023;2:200–203. (In Russian). EDN: GUWSHK.

**5.** Bekulova S.R. Renewable energy sources in the new industrial revolution: world and domestic experience. *Mir novoi ekonomiki = The world of new economy*. 2019;13(4):14–21. (In Russian). DOI: 10.26794/2220-6469-2019-13-4-14-21. EDN: OOMEKA.

**6.** Rokov A., Lokhimovich E. Economic aspects of developing renewable energy sources. *Strategii biznesa = Business Strategies*. 2020;8(2):55–59. (In Russian). DOI: 10.17747/2311-7184-2020-2-55-59. EDN: FLOHOB.

**7.** Lipin P.V., Potapenko O.V., Sorokina T.P., Doronin V.P. Key features of cotransformation of vacuum gas oils and vegetable oils on dual-zeolite cracking catalysts. *Neftekhimiya*. 2019. T. 59. N 4. S. 367–377. (In Russian). DOI: 10.1134/S0028242119040099. EDN: GWTMMU.

**8.** Sosnina D.V., Belozertseva N.E., Altynov A.A., Bogdanov I.A., Kirgina M.V. Investigation of co-processing of the straight-run diesel fraction and sunflower oil over a zeolite catalyst of ZSM-5 type. *Chemistry for Sustainable Development*. 2022;30(4):408–414. DOI: 10.15372/CSD2022398. EDN: JKGKHV.

**9.** Mamedova T.A., Andrushenko N.K., Lyatifova T.S., Askerova E.N., Teyubov Kh.Sh., Kesemenli Kh.G. Production of catalytic cracking gasoline by processing the mixture of

petroleum and vegetable raw material. *Neftepererabotka i neftekhimiya. Nauchno-tekhnicheskie dostizheniya i peredovoi opyt*. 2012;11:15–18. (In Russian). EDN: PWLDFX.

**10.** Dada T.K., Vuppaladadiyam A., Duan A.X., Kumar R., Antunes E. Probing the effect of Cu-SrO loading on catalyst supports (ZSM-5, Y-zeolite, activated carbon, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, and ZrO<sub>2</sub>) for aromatics production during catalytic co-pyrolysis of biomass and waste cooking oil. *Bioresource Technology*. 2022;360:127515. DOI: 10.1016/j.biortech.2022.127515.

**11.** Li C., Ma J., Xiao Z., Stanton H., Liu R., Zuo S., et al. Catalytic cracking of Swida wilsoniana oil for hydrocarbon biofuel over Cu-modified ZSM-5 zeolite. *Fuel*. 2018;218:59–66. DOI: 10.1016/j.fuel.2018.01.026.

**12.** Zhao X., Wei L., Julson J., Qiao Q., Dubey A., Anderson G. Catalytic cracking of non-edible sunflower oil over ZSM-5 for hydrocarbon bio-jet fuel. *New Biotechnology*. 2015;32(2):300–312. DOI: 10.1016/j.nbt.2015.01.004.

**13.** Smirnov A., Wang W., Kikhtyanin O., Xiao L., Wu W., Kubička D. Hydroconversion of sunflower oil to fatty alcohols and hydrocarbons using CuZn and CuZn-HBEA-based catalysts. *Catalysis Today*. 2023;424:113841. DOI: 10.1016/j.cattod.2022.07.009.

**14.** Ostrikov A.N., Gorbatoва A.V., Kopylov M.V., Anikin A.A. Quality parameters of rapeseed cold pressed oil. *Pishchevaya promyshlennost' = Food Industry*. 2017;9:52–55. (In Russian). EDN: ZGWTAR.

**15.** Ostrikov A.N., Gorbatoва A.V., Anikin A.A., Kopylov M.V. Analysis of fatty acid composition of rapeseed oil. *Maslozhirovaya promyshlennost'*. 2016;6:18–21. (In Russian). EDN: XFWDBP.

**16.** Katikaneni S.P.R., Adjaye J.D., Idem R.O., Bakhshi N.N. Catalytic conversion of canola oil over potassium-impregnated HZSM-5 catalysts: C<sub>2</sub>–C<sub>4</sub> olefin production and model reaction studies. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 1996;35(10):3332–3346. DOI: 10.1021/ie950740u.

**17.** Li Z., Wang W., Liu X., Qi S., Lan D., Wang Y. Effect of different degumming on the retention of bioactive components, acylglycerol and phospholipid composition of rapeseed oil. *Process Biochemistry*. 2023;133:190–199. DOI: 10.1016/j.procbio.2023.08.019.

**18.** 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). DOI: 10.21285/2227-2925-2022-12-1-130-140. EDN: WJTELR.

**19.** Sosnina D.V., Bogdanov I.A., Altynov A.A. Fuel components production by processing of diesel fraction and rapeseed oil blends on zeolite catalyst. In: *Khimiya i khimi-cheskaya tekhnologiya v XXI veke: materialy XXIV Mezhdunar. nauch.-prakt. Konf. studentov i molodykh uchenykh im. vydayushchikhsya khimikov L.P. Kuleva i N.M. Kizhnera, posvyashch. 85-letiyu so dnya rozhdeniya prof. A.V. Kravtsova = Chemistry and chemical technology in the 21<sup>st</sup> century: Proc. of the 24<sup>th</sup> International Scientific and Practical Conference of Students and Young*

*Scientists named after outstanding chemists L.P. Kulev and N.M. Kizhner, dedicated to 85 anniversary of prof. A.V. Kraftsov.* 15–19 May 2023, Tomsk. Tomsk: National Research Tomsk Polytechnic University; 2023, vol. 2, p. 118–119. (In Russian). EDN: MSZBSS.

**20.** Sosnina D.V., Altynov A.A., Kirgina M.V., Bogdanov I.A. Production components of fuels by catalytic processing of diesel fraction and rapeseed oil blends. *Polzunovskii vestnik.* 2023;4:237–243. (In Russian). DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2023.04.030. EDN: NJFSDQ.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Соснина Дарья Вячеславовна,**  
аспирант, инженер,  
Национальный исследовательский  
Томский политехнический университет,  
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30,  
Российская Федерация,  
dvs66@tpu.ru  
<https://orcid.org/0009-0004-7686-4742>

**Алтынов Андрей Андреевич,**  
инженер,  
Национальный исследовательский  
Томский политехнический университет,  
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30,  
Российская Федерация,  
altynov\_andrey@tpu.ru  
<https://orcid.org/0000-0002-7216-1773>

**Кокорина Юлия Станиславовна,**  
студент,  
Национальный исследовательский  
Томский политехнический университет,  
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30,  
Российская Федерация,  
ysk14@tpu.ru  
<https://orcid.org/0009-0004-9503-6694>

**Киргина Мария Владимировна,**  
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>

**Богданов Илья Александрович,**  
ассистент,  
Национальный исследовательский  
Томский политехнический университет,  
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30,  
Российская Федерация,  
✉ iab12@tpu.ru  
<https://orcid.org/0000-0002-2327-5395>

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Daria V. Sosnina,**  
Postgraduate Student, Engineer,  
National Research Tomsk Polytechnic University,  
30, Lenin Ave., Tomsk, 634050,  
Russian Federation,  
dvs66@tpu.ru  
<https://orcid.org/0009-0004-7686-4742>

**Andrey A. Altynov,**  
Engineer,  
National Research Tomsk Polytechnic University,  
30, Lenin Ave., Tomsk, 634050,  
Russian Federation,  
altynov\_andrey@tpu.ru  
<https://orcid.org/0000-0002-7216-1773>

**Yulia S. Kokorina,**  
Student,  
National Research Tomsk Polytechnic University,  
30, Lenin Ave., Tomsk, 634050,  
Russian Federation,  
ysk14@tpu.ru  
<https://orcid.org/0009-0004-9503-6694>

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

**Ilya A. Bogdanov,**  
Assistant,  
National Research Tomsk Polytechnic University,  
30, Lenin Ave., Tomsk, 634050,  
Russian Federation,  
✉ iab12@tpu.ru  
<https://orcid.org/0000-0002-2327-5395>

**Вклад авторов**

Д.В. Соснина – проведение экспериментов, обработка полученных данных, написание текста статьи.

А.А. Алтынов – разработка концепции исследования, развитие методологии, проведение экспериментов.

Ю.С. Кокорина – проведение экспериментов, обработка полученных данных.

М.В. Киргина, И.А. Богданов – разработка концепции исследования, развитие методологии, написание текста статьи.

**Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

**Информация о статье**

Поступила в редакцию 30.10.2023.

Одобрена после рецензирования 11.12.2023.

Принята к публикации 29.02.2024.

**Contribution of the authors**

Daria V. Sosnina – conducting experiments, data obtained processing, writing the text of the manuscript.

Andrey A. Altynov – research concept development, methodology development, conducting experiments.

Yulia S. Kokorina – conducting experiments, obtained data processing.

Maria V. Kirgina, Ilya A. Bogdanov – research concept development, methodology development, writing the text of the manuscript.

**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 30.10.2023.

Approved after reviewing 11.12.2023.

Accepted for publication 29.02.2024.